

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Roberta Cristina de Oliveira Madeira**

**Estudo da correlação entre “ratcheting” uniaxial e  
relaxação da tensão média 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

Junho de 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus que durante todo os períodos da minha graduação Ele me deu forças e me abençoou com pessoas maravilhosas que me ensinaram, me ajudaram e contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

Ao orientador Marco Antônio Meggiolaro pela oportunidade de desenvolver esse projeto que foi desafiador, sua paciência e apoio foram fundamentais para a construção desse trabalho, foi uma honra tê-lo como meu orientador

Aos meus pais Paulo Roberto e Kátia Cristina, meus irmãos: Adelle Cristina, Caroline Cristina, Tereza Cristina, Paulo Roberto Jr, Vitória Cristina e Ana Cristina, por todas as palavras de incentivo, consolos, conselhos, compreensão, amor e paciência, contribuíram para meu amadurecimento e me motivaram a seguir em frente.

Ao Adrian Giassone que se tornou um grande amigo, agradeço por todos os conselhos, parceria, apoio, troca de experiência e por facilitar meus horários de jornada de trabalho para conseguir conciliar meus compromissos profissionais e acadêmicos.

A minha grande amiga Nathalia Cortat que sempre esteve comigo, todo seu apoio e incentivo foram fundamentais nessa jornada.

Ao meu amigo Anderson Neves, pela parceria profissional, por me aconselhar a cursar Engenharia Mecânica na PUC-Rio.

A minha amiga Lara Berghe por caminhar junto, sendo uma grande parceira nos estudos e na vida.

Ao Euclides e Marques que se tornaram grandes amigos, pelas risadas, paciência, conselhos e por toda ajuda para realização dos experimentos que representam a peça principal para a realização desse trabalho.

## **RESUMO**

### **Estudo da correlação entre “ratcheting” uniaxial e relaxação da tensão média em materiais metálicos**

“Ratcheting” uniaxial é um fenômeno que ocorre em materiais metálicos submetidos a carregamentos uniaxiais cíclicos não balanceados controlados por tensão, i.e., nos quais a tensão média não é nula. Nesse caso, o material sofre acúmulo sucessivo de deformações plásticas a cada ciclo, com sinal igual ao da componente média aplicada (e.g. acúmulo de deformações trativas para tensão média trativa). Outro fenômeno presente em histórias uniaxiais não-balanceadas é a relaxação da tensão média (“mean-stress relaxation”), no qual ocorre o problema inverso do “ratcheting” uniaxial: nesse caso, o material é submetido a carregamentos uniaxiais cíclicos não-balanceados controlados por deformação, i. e., com deformação média não-nula, o que provoca uma sucessiva redução da tensão média resultante até zero. O estudo desses dois fenômenos complementares são importantes, pois as vidas à fadiga de materiais metálicos são afetadas pelos efeitos das tensões médias que podem relaxar, e podem ser abreviadas por falhas prematuras do material caso deformações plásticas acumuladas de “ratcheting” atinjam a ductilidade do material. Para o estudo desses fenômenos, serão realizados em corpos de prova metálicos ensaios de fadiga uniaxial sob controle de tensão ou de deformação, ambos com componentes médias não-nulas. A partir dos experimentos, espera-se ajustar modelos matemáticos, ou propor novos modelos para ajustar as taxas de “ratcheting” ou de relaxação da tensão média, e eventualmente estabelecer uma correlação entre esses dois fenômenos.

**Palavra-chave:** “Ratcheting” uniaxial; Relaxação da tensão média; Tensão média não nula, Deformação média não nula; fadiga uniaxial; Deformação média não-nula; Correlação.

**Área de concentração:** Comportamento Mecânico dos Materiais

**Linha de Pesquisa:** Plasticidade

## **ABSTRACT**

### **Study of the correlation between uniaxial ratcheting and mean stress relaxation in metallic materials**

Uniaxial "Ratcheting" is a phenomenon that occurs in metallic materials submitted to unbalanced cyclic uniaxial loads controlled by stress, that is, in which the mean stress is not zero. In this case, the material suffers successive accumulation of plastic deformations at each cycle, with a sign equal to the average applied component (usually an accumulation of deformations in tensile for mean tension in tensile). Another phenomenon present in unbalanced uniaxial histories is mean-stress relaxation, in which the inverse problem of uniaxial ratcheting occurs: in this case, the material is subjected to unbalanced cyclic uniaxial loadings controlled by strain, that is, with non-zero mean strain, which causes a successive reduction of the resulting mean stress to zero. The study of these two complementary phenomena is important, as the fatigue lives of metallic materials are affected by the effects of average stresses that can relax, and can be abbreviated by premature failure of the material if accumulated plastic deformations from "ratcheting" reach the material's ductility. For the study of these phenomena, uniaxial fatigue tests under stress or strain control will be performed on metallic specimens, both with non-zero mean components. From the experiments, it is expected to adjust mathematical models or to propose new models to adjust the rates of "ratcheting" or relaxation of the mean stress, and eventually establish a correlation between these two phenomena.

**Keywords:** Uniaxial ratcheting; Mean-stress relaxation; non-zero mean stress, non-zero mean strain; Uniaxial fatigue; Correlation.

**Concentration Area:** Mechanical Behavior of Materials

**Research type:** Plasticity

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	8
1.1 Motivação.....	8
1.2 Roteiro do trabalho.....	10
2. Fundamento teórico .....	11
2.1 Falha por fadiga .....	11
2.1.1 Metodologias para determinar a vida à fadiga .....	11
2.2 Plasticidade incremental .....	12
2.2.1 Superfície de escoamento .....	13
2.2.2 Endurecimento cinemático.....	14
2.2.3 Endurecimento isotrópico (ou amolecimento) .....	15
2.2.4 Ratcheting .....	17
2.2.5 Relaxação da tensão média ( <i>mean stress relaxation</i> ).....	20
3. Procedimento experimental.....	22
3.1 Equipamentos utilizados.....	22
3.1.1 Máquina de ensaio .....	22
3.1.2 Medidor de deformação (clip gage) .....	23
3.3 Escolha SAE 1020 .....	27
3.2.2 Geometria Corpo de prova para ensaio “ratcheting” uniaxial .....	28
3.4 “Ratcheting” uniaxial, material SAE 1020 .....	28
3.5 Relaxação da tensão média .....	34
4. Correlação entre os fenômenos “ratcheting” e relaxação da tensão média .....	39
5. Conclusões .....	45
Referências bibliográficas .....	47

## Lista de figuras

Figura 2.1: Curva monotônica ilustrativa Tensão( $\sigma$ ) x Deformação( $\epsilon$ ) de um carregamento trativo uniaxial, Neves [10].....	13
Figura 2.2: Plasticidade ideal, Neves [10] .....	14
Figura 2.3: Encruamento cinemático, Sanchez [11] .....	15
Figura 2.4: Endurecimento isotrópico para um material que endurece por deformação, Sanchez [11] .....	16
Figura 2.5: Resposta para ensaio de fadiga uniaxial: a) amolecimento cíclico controlado por deformação; b) endurecimento cíclico controlado por deformação; c) endurecimento cíclico controlado por tensão; e d) amolecimento cíclico controlado por tensão, onde t é o tempo, Sanchez [11] .....	17
Figura 2.6: Gráfico do comportamento dos laços de histerese para o fenômeno "Ratcheting", Castro e Meggiolaro [9] .....	18
Figura 2.7: "Ratcheting" uniaxial para um material submetido a uma história de tensões desequilibradas com (a) alta e (b) baixa amplitude de deformação, Sanchez [11] .....	19
Figura 2.8: Gráfico do comportamento dos laços de histerese para o fenômeno "Mean-stress relaxation", Castro e Meggiolaro [9] .....	20
Figura 3.1: (a) Máquina de ensaios universal servo-hidráulica; (b) interface computacional do software de controle do ensaio. ....	22
Figura 3.2: Clip gage utilizado no ensaio.....	23
Figura 3.3: Laços de histerese sob controle de deformação do material 4140 .....	24
Figura 3.4: Laços de histerese sob controle de deformação do material 4340 .....	24
Figura 3.5: Laços de histerese incrementais para o material 4140.....	25
Figura 3.6: Laços de histerese incrementais para o material 4340.....	25
Figura 3.7: Tensão média por ciclo para o material 4340 .....	26
Figura 3.8: Tensão média por ciclo para o material 4340 .....	26
Figura 3.9: Curva Tensão x deformação, ensaio de tração .....	27
Figura 3.10: Corpo de prova utilizado no ensaio .....	28
Figura 3.11: Laços de histerese sob controle de deformação completo .....	29
Figura 3.12: Laços de histerese estabilizados sob controle de deformação .....	29
Figura 3.13: Laços de histerese sob controle de força .....	30

Figura 3.14: Laços de histerese estabilizados sob controle de carga .....	31
Figura 3.15: Laços de histerese para fenômeno de “ratcheting” .....	31
Figura 3.16: Laços de histerese com incremento de 100 ciclos, intervalo 4150 a 5300 ciclos. ....	32
Figura 3.17: Curva da evolução da deformação de “ratcheting” por ciclo .....	32
Figura 3.18: Taxa de “ratcheting” por ciclo (gráfico da média móvel a cada 6 ciclos) .....	33
Figura 3.19 Taxa de “ratcheting” para intervalo de 4300 a 5300 ciclo .....	33
Figura 3.20: Laços de histerese sob amplitude de deformação de $\epsilon_{\min}=0\%$ a $\epsilon_{\max}=+0,4\%$ . ....	34
Figura 3.21: Laços de histerese sob amplitude de deformação de $\epsilon_{\min}= -0,4\%$ a $\epsilon_{\max}=0\%$ . ....	35
Figura 3.22: Gráfico tensão real média por ciclo para duas sequências de carregamento cíclico sob amplitude de deformação $\epsilon_{\min}=0\%$ a $\epsilon_{\max}=+0,4\%$ . ....	35
Figura 3.23: Gráfico tensão real média por ciclo para duas sequências de carregamento cíclico sob amplitude de deformação $\epsilon_{\min}= -0,4\%$ a $\epsilon_{\max}= 0\%$ .....	36
Figura 3.24: Laços de histerese sob amplitude de deformação de $\epsilon_{\min}= 0\%$ a $\epsilon_{\max}=0,5\%$ .....	36
Figura 3.25: Gráfico tensão real média por ciclo sob amplitude de deformação $\epsilon_{\min}= 0\%$ a $\epsilon_{\max}= 0,5\%$ . ....	37
Figura 3.26: Gráfico tensão real média por ciclo para duas sequências de carregamento cíclico de deformação positiva. ....	37
 Figura 4.1: Curva da evolução da deformação de “ratcheting” por deformação plástica acumulada p.....	39
Figura 4.2: Taxa de “ratcheting” em função da deformação plástica acumulada .....	40
Figura 4.3: União dos gráficos das amplitudes de deformação .....	40
Figura 4.4: Ajuste para curva amplitude de deformação $\epsilon_{\min}= 0\%$ a $\epsilon_{\max}= 0,4\%$ ...	42
Figura 4.5: Ajusta para curva amplitude de deformação $\epsilon_{\min}= -0,4\%$ a $\epsilon_{\max}= 0\%$ .	43
Figura 4.6: Ajusta para curva amplitude de deformação $\epsilon_{\min}= 0\%$ a $\epsilon_{\max}= 0,5\%$ ...	43
Figura 4.7: Ajuste para média móvel da taxa de “ratcheting” .....	44

## **Lista de tabelas**

Tabela 1: Propriedade mecânicas de engenharia .....	28
Tabela 2: Propriedade mecânica real.....	28

## 1. Introdução

### 1.1 Motivação

A previsão da vida a fadiga é de suma importância para componentes metálicos que sofrem carregamentos cíclicos com tensões além do seu limite de escoamento durante o serviço, e isso causa pode causar fragilidade na estrutura metálica levando-a à falha. Um exemplo prático é apresentado por Peres [1], que realizou seu estudo em tubulações pressurizadas submetidas a um carregamento axial cíclico sob fenômeno “ratcheting” e consequentemente apresentam aumento crescente da deformação na direção tangencial, causando consequentemente um aumento incremental de seu diâmetro. Então foi desenvolvida uma simulação numérica do fenômeno “ratcheting” em tubulações elasto-viscoplásticas com paredes finas sob pressão interna e submetidas à uma carga axial cíclica, dando sua contribuição para que o fenômeno de “ratcheting” seja evitado em um projeto para que não ocorra falha precoce desse tipo de estrutura metálica.

O relaxamento da tensão média ("mean-stress relaxation"), por outro lado, tem muito sido estudado para obtenção de um projeto seguro contra fadiga devido aos efeitos significativos da tensão média na vida à fadiga de materiais metálicos, Hao, Ye, Chen e Liu [2] realizaram estudo nesse seguimento e identificaram que a tensão média de tração (onde, incremento da deformação média por ciclo é positiva) é prejudicial à vida em fadiga, enquanto a tensão média de compressão (onde, incremento da deformação média por ciclo é negativa) é benéfico, esse efeito foi observado para amplitudes de deformação baixa (0,6% e 0,8%), verificou-se que tensão média trativa cresce com o aumento da taxa de deformação, facilita o início e crescimento de trinca, outros estudos para diferentes ligas metálicas realizados por: Lin e Chu [3], Tao e Xia [4], Koh [5] e Huang [6] também observaram esse efeito. Ainda segundo Hao, Ye, Chen e Liu [2], para amplitudes de deformação altas (1,5% e 2%), observou-se que tensão média trativa reduziu para zero, sendo um efeito benéfico ao material, e nesse caso o material se torna estável. Date [17] também observou para o aço inoxidável 316R, não houve diminuição nítida na vida útil do material no ensaio de fadiga por “ratcheting” compressivo, ao contrário, para “ratcheting” tração a vida útil à fadiga do material diminuiu.

Hao, Ye, Chen e Liu [2] escreveram em seu estudo que os modelos convencionais para previsão da vida a fadiga, como por exemplo o modelo de Morrow, leva em consideração o efeito da tensão média como uma constante, e isso pode levar à superestimação ou subestimação da vida em fadiga.

Há diversos modelos propostos para a modelagem dos fenômenos de “ratcheting” e relaxação da tensão média. Neves [10], por exemplo, propôs um novo modelo de previsão da vida em fadiga é introduzido incorporando a tensão média e os efeitos da “ratcheting” sob cargas uniaxiais, o modelo é baseado em exaustão por ductilidade, onde no equacionamento é levado em consideração os efeitos da taxa média de deformação por “ratcheting” para caracterizar o dano por fadiga por “ratcheting” em regime de fadiga de baixo ciclo. Neves [10] cita em seu trabalho as investigações de Paul [16] com aço SA333 e, Lin e Chu [3] com cobre Elbrodur, apesar de utilizarem materiais diferentes, observaram que a curva do ciclo de vida de deformação para “ratcheting” tem três estágios principais (primário, estado estacionário e terciário); onde no primeiro estágio a deformação de “ratcheting” e a redução de área são pequenas, a deformação diminui devido à estabilização gradual da estrutura. No estado estacionário a taxa de “ratcheting” é mantida constante, e por fim, no estágio terciário há uma redução substancial da área da seção transversal e esta alteração dimensional da amostra ajuda a aumentar a tensão real máxima para um valor elevado causando instabilidade e a estricção são frequentemente observados. Segundo Lim, Kim e Seong [7] o desenvolvimento e verificação de modelos constitutivos para análise de “ratcheting”, a simulação do comportamento de “ratcheting” deve continuar até que o estado estacionário se desenvolva, e o modelo deve ser capaz de prever a taxa de estado estacionário adequadamente. Então, a taxa de estado estacionário pode ser utilizada para prever a deformação de “ratcheting” na falha usando a vida de fadiga prevista a partir de um modelo de vida de fadiga.

Como o efeito da tensão média pode relaxar, afetando positivamente a vida a fadiga do material é importante desenvolver um modelo confiável para prever o relaxamento de tensão médio durante o processo de fadiga por “ratcheting”, permitindo-se projetar e manter com eficiência a integridade estrutural dos componentes de engenharia.

## 1.2 Roteiro do trabalho

O capítulo 2 discute os fundamentos teóricos dos fenômenos “ratcheting” e relaxação da tensão média, esclarece a razão pela qual ocorrem esses fenômenos. Entretanto, antes de discutir esses dois fenômenos, é necessário abordar os conceitos básicos sobre falha por fadiga, superfície de escoamento, plasticidade incremental e por fim abordar o conceito de “ratcheting” e relaxação da tensão média.

No capítulo 3 são apresentados resultados dos ensaios conduzidos no Laboratório de Estruturas de Materiais – PUC-Rio, as especificações do material utilizado, máquina, software e clip gage, resultados experimentais “ratcheting” e do ensaio de relaxação da tensão média

O capítulo 4 apresenta as curvas dos resultados de ensaio em função da deformação plástica acumulada respectiva de cada ensaio de “ratcheting” e relaxação da tensão média e os ajustes matemáticos dessas curvas.

## 2. Fundamento teórico

### 2.1 Falha por fadiga

Fadiga ocorre devido à aplicação sucessiva de cargas variáveis, isto é, submetendo o material a cargas trativas e compressivas constantemente. De acordo com Castro e Meggiolaro [8] essa sequência de movimentos “gera e/ou propaga paulatinamente uma trinca, causando a fratura na peça”. Segundo também Castro e Meggiolaro [8] a falha por fadiga é definida “como uma falha localizada, progressiva e cumulativa”, ou seja, deve-se tratar como problema local na peça onde a trinca se propaga devido a aplicação sucessiva de cargas variáveis que faz com que o material acumule deformação a cada estímulo de carregamento e os acidentes causados pela falha por fadiga são classificados como falhas “mecânicas” causadas pelas cargas de serviço e em muitos casos não são perceptíveis, isto é, a iniciação da trinca não é vista a olho nu ao ponto de se poder fazer uma intervenção local na peça para evitar com que a trinca continue se propagando ou que haja substituição da peça, e dessa forma a falha pode ser catastrófica, ocorrendo de forma quase instantânea. Sendo assim, a previsão/modelagem desse tipo de falha é de suma importância em projetos de engenharia.

#### 2.1.1 Metodologias para determinar a vida à fadiga

As principais metodologias tradicionais de dimensionamento à vida a fadiga, são classificadas por três métodos de ensaio (Castro e Meggiolaro [8]):

- I. **SN** ou Wöhler: correlaciona a curva de tensão pelo número ciclos ao qual o corpo de prova é submetido. Este método prevê vida longa de fadiga associada à deformação elástica ou prevê a iniciação da trinca.
- II.  **$\epsilon N$**  ou de Coffin-Manson: correlaciona a curva de deformação pelo número de ciclos ao qual o corpo de prova é submetido. É um método considerado mais complexo que o SN, considera a vida de fadiga até a iniciação da trinca.

- III. **da/dN** ou de Paris, modela e prevê a vida de fadiga no estágio de crescimento da trinca. Este método baseia-se nos conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica.

Os três métodos acima têm como principal característica históricos de carregamentos cíclicos uniaxiais simétricos, isto é, as gamas tensão média  $\left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right)$  e as gamas de deformação média  $\left(\frac{\Delta\varepsilon}{2}\right)$  são nulas. Contudo, os fenômenos de “ratcheting” e relaxação da tensão média não se comportam da mesma forma, o histórico de carregamento cíclico uniaxial não é simétrico, seja para gama de tensão média no caso de “ratcheting” ou para a gama de deformação média no caso de relaxação da tensão média. Vale destacar que há dois tipos de carregamentos: uniaxial, carregamento em tração e/ou compressão e multiaxial que inclui a o carregamento torcional. O presente estudo foi elaborado somente para históricos de carregamentos uniaxiais.

Onde matematicamente:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{2} \quad (2)$$

## 2.2 Plasticidade incremental

A plasticidade incremental descreve o comportamento elastoplástico de um metal submetido a carregamentos sucessivos de cargas variáveis através da evolução da curva tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\varepsilon$ ), onde a deformação plástica cíclica induz variações no comportamento do material.

### 2.2.1 Superfície de escoamento

Quando não há variação nos níveis da taxa de carregamento no endurecimento por deformação, a modelagem para esse tipo de carregamento é baseada no conceito de superfície de escoamento, que separa os domínios em duas regiões: plásticas e elástica.

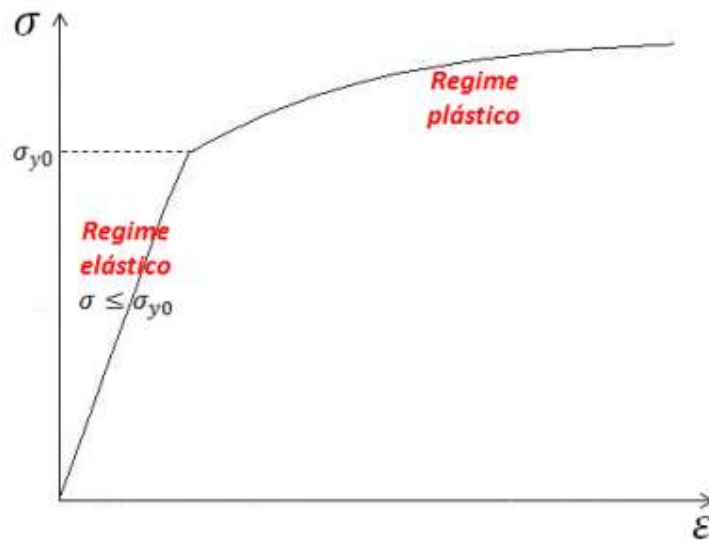


Figura 2.1: Curva monotônica ilustrativa Tensão( $\sigma$ ) x Deformação( $\epsilon$ ) de um carregamento trativo uniaxial, Neves [10]

No regime elástico, o material apresenta um comportamento linear elástico. A característica principal dessa região é que o material não sofre deformação permanente, em outras palavras, se o material for carregado e descarregado em qualquer tensão ( $\sigma$ ) abaixo de  $\sigma_{y0}$ , ele não apresenta mudança em sua estrutura, voltando ao seu tamanho original.

Por outro lado, no regime plástico o material não se comporta mais de forma linear e as deformações são irreversíveis, isto é, ao remover o carregamento acima da tensão arbitrária  $\sigma_{y0}$  imposta ao material, ele apresenta deformação permanente, tendo sua geometria inicial modificada.

A deformação plástica provoca um aumento do limite de escoamento do material e do seu módulo de elasticidade, tornando-o mais rígido. A evolução do limite de escoamento e subsequentemente a evolução da deformação plástica é descrito como endurecimento.

A superfície de escoamento é descrita por modelos de endurecimento. Segundo Castro e Maggiolaro [9], no interior das superfícies de escoamento as tensões são consideradas como puramente elásticas, outra forma de descrever deformação plástica é quando o estado de tensão ao atingir a superfície, tenta-se locomover para fora dela. Nas deformações plásticas posteriores o estado de tensão permanece na superfície de escoamento, pois ela altera sua geometria e/ou translada impedindo que o ponto de tensão se mova para fora dela, mantendo-o em sua superfície.

Um caso ideal é quando não ocorre endurecimento, a superfície de escoamento não se altera, sendo assim a deformação plástica cíclica não provoca variações no limite de escoamento ( $\sigma_y$ ) que define o raio da superfície de escoamento, conforme Figura 2.2.

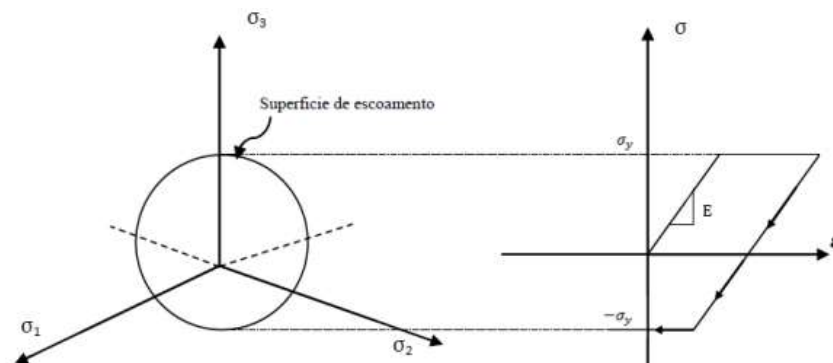


Figura 2.2: Plasticidade ideal, Neves [10]

As demais seções dedicam-se a alguns modelos de plasticidade incremental que descrevem o comportamento de tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\epsilon$ ) cíclico do material, de acordo com variável a ser controlada ( $\sigma$  ou  $\epsilon$ ), o material pode apresentar estabilidade ou instabilidade e em resposta a isso, a fadiga do material pode aumentar ou diminuir.

### 2.2.2 Endurecimento cinemático

Endurecimento cinemático é explicado pelo efeito Bauschinger (em homenagem ao alemão Johann Bauschinger), que modela o comportamento de um material metálico ao ser carregado em uma direção (por exemplo, tração) acima do

seu limite de escoamento, a sua resistência ao escoamento na direção oposta (compressão) é reduzida em valor absoluto.

A Figura 2.3 mostra de forma genérica este feito para um histórico de carga uniaxial representado no diagrama  $\sigma_x \times \tau_{xy}\sqrt{3}$ . Neste caso, a superfície inicial de escoamento  $\sigma_{mises} = S_y$ , translada sem mudar sua geometria preservando seu raio  $r = S_y$ . Quando o centro da superfície inicial de escoamento translada na direção x no espaço de tensão de Mises por  $(\sigma_{mises} = \sigma_{m\acute{a}x} - S_y)$ , a superfície resultante (superfície transladada) cruzará o eixo x na nova tensão de escoamento à tração  $(\sigma_{m\acute{a}x} - S_y + S_y = \sigma_{m\acute{a}x})$  e na nova tensão de escoamento compressivo  $(\sigma_{m\acute{a}x} - S_y - S_y) = (\sigma_{m\acute{a}x} - 2S_y)$ . A superfície de escoamento sofre apenas translação cinemática.

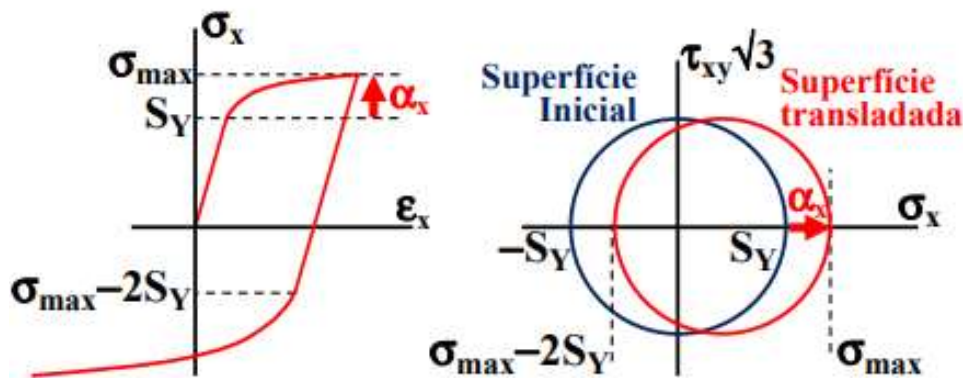


Figura 2.3: Encruamento cinemático, Sanchez [11]

O vetor de translação  $\alpha$  é responsável por armazenar a memória plástica e também representa a nova posição do centro da superfície de escoamento. A resistência à tração do primeiro ciclo translada o centro da superfície de escoamento no diagrama  $\sigma_x \times \tau_{xy}\sqrt{3}$  do seu valor inicial  $\vec{\alpha} = [0 \ 0]^T$  para  $\vec{\alpha} = [\alpha_x \ \alpha_y]^T = [\sigma_{max} - S_y \ 0]^T$ .

### 2.2.3 Endurecimento isotrópico (ou amolecimento)

O endurecimento isotrópico causa mudanças na microestrutura do material durante os carregamentos cíclicos iniciais, causando aumento ou diminuição da resistência à deformação plástica do material. O fato de um material metálico

endurecer ou amolecer, está ligado também ao tipo de tratamento térmico que ele recebe. Metais recozidos, tendem a endurecer por deformação ciclicamente, pois ao ser submetido a este tipo de tratamento a sua densidade de deslocamento e resistência escoamento  $S_y$  diminui até alcançar um limite de escoamento cíclico mais alto  $S_{yc}$ . Metais temperados tendem a amolecer ciclicamente ( $S_{yc} < S_y$ ). Em geral, metais submetidos à deformação plástica cíclica uniaxial, amolecem ou endurecem até um estado quase estável.

Observando a Figura 2.4 nota-se que o raio da superfície de escoamento muda gradualmente de  $S_y$  para  $S_{yc}$ , representando a expansão da superfície, na contração acontece o oposto, o raio da superfície diminui ( $S_{yc} < S_y$ ). Em ambos os casos a mudança no tamanho do raio ocorre uniformemente em todas as direções, esse fenômeno é chamado de endurecimento isotrópico (ou amolecimento)

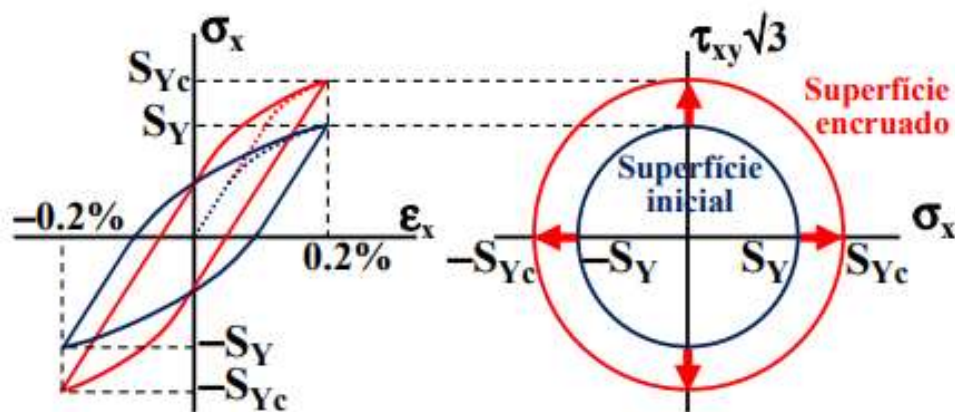


Figura 2.4: Endurecimento isotrópico para um material que endurece por deformação, Sanchez [11]

A resposta gráfica de tensão uniaxial ( $\sigma$ ) e deformação plástica ( $\epsilon_{pl}$ ) de um material metálico caracteriza seu comportamento de amolecimento ou endurecimento isentrópicos, de acordo com variável controlada (vide Figura 2.5).

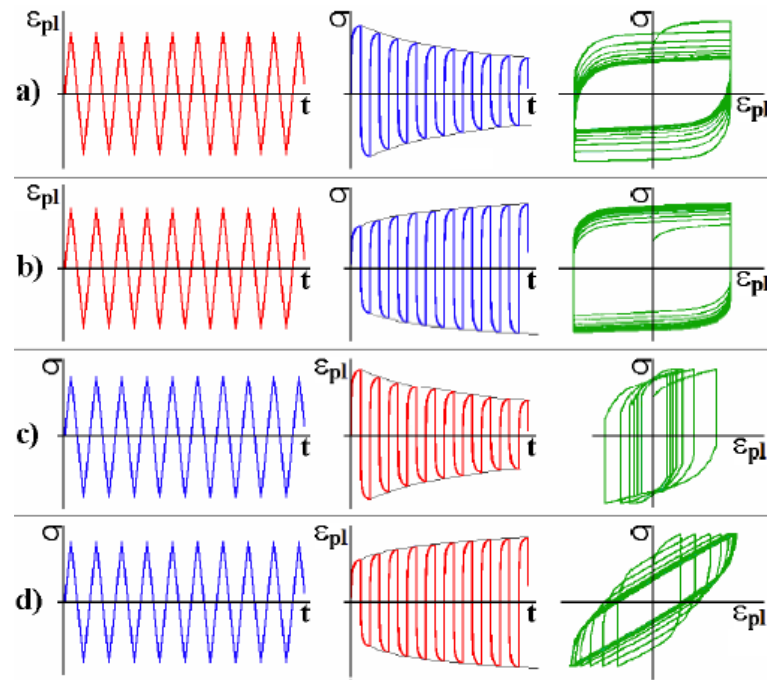


Figura 2.5: Resposta para ensaio de fadiga uniaxial: a) amolecimento cíclico controlado por deformação; b) endurecimento cíclico controlado por deformação; c) endurecimento cíclico controlado por tensão; e d) amolecimento cíclico controlado por tensão, onde  $t$  é o tempo, Sanchez [11]

#### 2.2.4 Ratcheting

Materiais submetidos a carregamentos uniaxiais cíclicos não-balanceados podem apresentar um acúmulo gradativo de deformações plásticas a cada carregamento, caracterizando o fenômeno “ratcheting”. Por essa razão este fenômeno é chamado equivocadamente de fluência cíclica, não sendo uma boa tradução, pois não precisa de altas temperaturas ou taxa de deformação. “Ratcheting” está associando à históricos de carga uniaxial ou multiaxial com tensões médias não nulas, isto é, histórico de carregamentos cíclicos que provocam os efeitos de acúmulo gradativo de deformações instáveis associados a “ratcheting” é chamando de histórico desequilibrado ou não balanceado. A deformação, nesse caso, é constante em uma certa direção e pode afetar a vida a fadiga do material negativamente devido à exaustão precoce da ductilidade do material, muito antes do que a vida de iniciação da trinca por fadiga obtida através dos métodos tradicionais de ensaio SN ou  $\epsilon N$ . E

essa falha pode ocorrer independente da temperatura. Apesar da resistência ao escoamento, o comportamento de endurecimento ou amolecimento do material e efeitos de taxa de deformação são introduzidos pelo efeito da temperatura e também podem afetar “ratcheting”. O comportamento cíclico dos materiais é descrito segundo comportamento Masing/ não-Masing.

O comportamento de Masing ocorre quando os laços de histerese são geometricamente semelhantes, embora estejam sujeitos a diferentes gamas de deformação, isto é, os laços de histerese se sobrepõem a cada ciclo para diferentes amplitudes de deformação. O comportamento não-Masing é o inverso do comportamento Masing, isto é, os laços de histerese não são geometricamente semelhantes e consequentemente não se fecham mesmo sob carregamentos de amplitude constante. Segundo Masing [12], as discordâncias geradas ao longo de um certo plano de deslizamento dentro de um grão de material durante um evento de carregamento sob tração são canceladas após um descarregamento compressivo simétrico, o que explicaria do ponto de vista microscópico o comportamento semelhante com laços que se fecham. Por outro lado, a instabilidade de um plano atômico dentro de um grão durante o evento de carregamento e descarregamento contínuo provoca acúmulo de deformações plásticas no material, característica do comportamento não-Masing.

A Figura 2.6 mostra uma simulação de “ratcheting” para um material simplificado de modelagem bilinear que apresenta comportamento não-Masing.

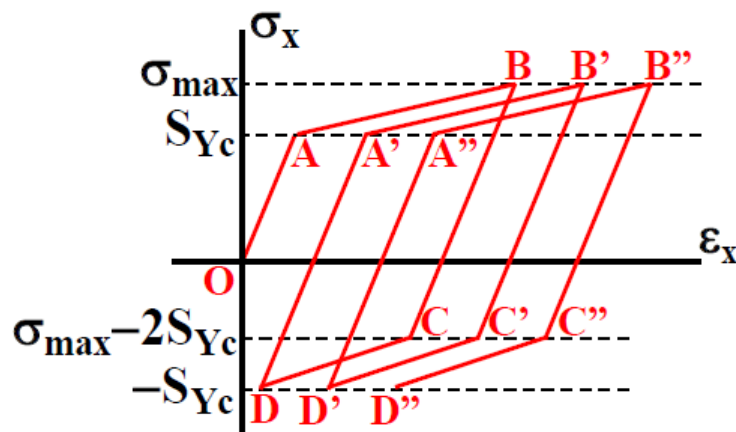


Figura 2.6: Gráfico do comportamento dos laços de histerese para o fenômeno “Ratcheting”, Castro e Meggiolaro [9]

Os trechos trativos AB, A'B' e A''B'' não são paralelos aos compressivos CD, C'D', e C''D'', uma assimetria que impossibilita os laços de fecharem, acumulando deformações a cada ciclo.

O gráfico da Figura 2.5 (d) que representa amolecimento isentrópico sob controle de tensão, pode ser confundido com o gráfico da Figura 2.6 acima, pois no amolecimento o acúmulo da deformação plástica também pode ocorrer. Na Figura 2.6, a deformação de “ratcheting”  $\varepsilon_{ri}$  é igual a  $\varepsilon_{r1} = (\varepsilon_B + \varepsilon_D) / 2$  após o primeiro ciclo, após o segundo ciclo como  $\varepsilon_{r2} = (\varepsilon_{B'} + \varepsilon_{D'}) / 2$ , após o terceiro como  $\varepsilon_{r3} = (\varepsilon_{B''} + \varepsilon_{D''}) / 2$ , e assim por diante. A taxa de ratcheting por ciclo, definida por  $d\varepsilon/dN$  é igual a  $d\varepsilon/dN = (\varepsilon_{ri+1} - \varepsilon_{ri})$  a diferença entre as deformações de “ratcheting” de ciclos consecutivos. A taxa de “ratcheting” é importante, pois ela diferencia o comportamento não-Masing assimétrico ( $\sigma \times \varepsilon$ ) dos efeitos de endurecimento/ amolecimento isotrópico. Enquanto que em comportamentos transientes de Masing resulta  $\varepsilon_{ri} = 0$  e, portanto,  $d\varepsilon/dN = 0$ , em “ratcheting” esses parâmetros são diferentes de zero. A taxa  $d\varepsilon/dN$  pode aumentar tanto com a faixa de tensão quanto com a tensão média, contudo é mais sensível à tensão média e ela, geralmente, varia com o número de ciclos, mesmo com histórico de carregamentos de amplitude constante. Observando a Figura 2.7 (a), analisa-se que para histórico de carregamento com grandes amplitudes a taxa  $d\varepsilon/dN$  tende a aumentar, levando o material à falha devido ao esgotamento da sua ductilidade. Porém, para histórias de carregamento com amplitude de deformações baixa, a taxa diminui até atingindo o estado estacionário com  $d\varepsilon/dN = 0$ , se assemelhando a um ciclo de histerese estável que fecha totalmente, conforme mostra Figura 2.7 (b).

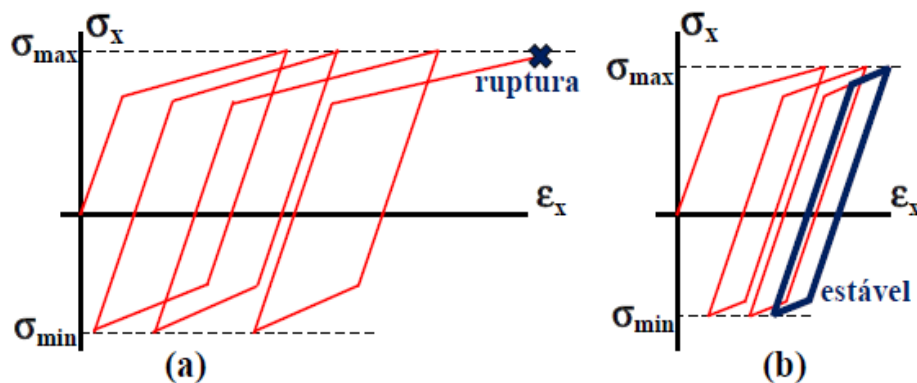


Figura 2.7: “Ratcheting” uniaxial para um material submetido a uma história de tensões desequilibradas com (a) alta e (b) baixa amplitude de deformação, Sanchez [11]

### 2.2.5 Relaxação da tensão média (*mean stress relaxation*)

A relaxação da tensão média (*mean stress relaxation*) ocorre com histórico de carregamento cíclicos não balanceados por controle de deformação com uma tensão média inicial, estando intimamente ligado à “ratcheting”. A deformação média tende a zero, tendo em não balanceadas uniaxial quanto multiaxial.

No fenômeno de relaxação da tensão média, os laços de histerese também não se fecham devido a um comportamento não-Masing, porém nesse caso a tensão média tende gradualmente a zero. Os laços desse fenômeno são ilustrados na Figura 2.8.

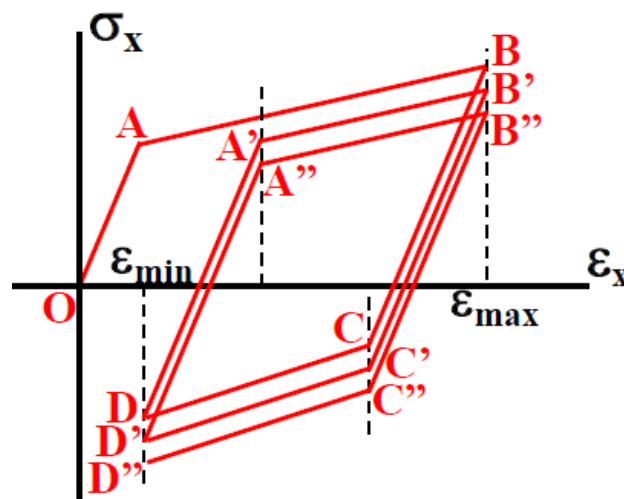


Figura 2.8: Gráfico do comportamento dos laços de histerese para o fenômeno "Mean-stress relaxation", Castro e Meggiolaro [9]

Observando a Figura 2.8, o comportamento não-Masing faz com que as inclinações dos trechos AB, A'B' e A''B'' não sejam paralelos aos segmentos CD, C'D' e C''D'', provocando laços de histerese abertos com tensão média tendendo a zero. Esse fenômeno pode ser favorável ao material se o carregamento original tinha tensão média trativa, pois os danos à fadiga são minimizados com a diminuição das tensões médias a cada ciclo. Note que esse fenômeno é de natureza diferente do encruamento isotrópico (em geral, amolecimento cíclico), uma vez que os trechos AB, A'B' e A''B'' simulados na figura são paralelos entre si, denotando estabilização do encruamento na parte trativa (e analogamente na parte compressiva).

O efeito do endurecimento ou amolecimento isentrópico pode ser confundido com os efeitos da relaxação da tensão média, pois são aparentemente semelhantes graficamente. Para diferenciar esses comportamentos, o parâmetro da tensão média deve ser avaliado e não a tensão máxima. Comparando os gráficos das Figuras 2.7 e 2.6(a), nota-se que também há redução gradual da tensão máxima para o caso de amolecimento isotrópico controlado por tensão. Sendo assim, é crucial avaliar os efeitos transitórios da evolução da tensão média e a variação da amplitude ou intervalo de tensão.

### 3. Procedimento experimental

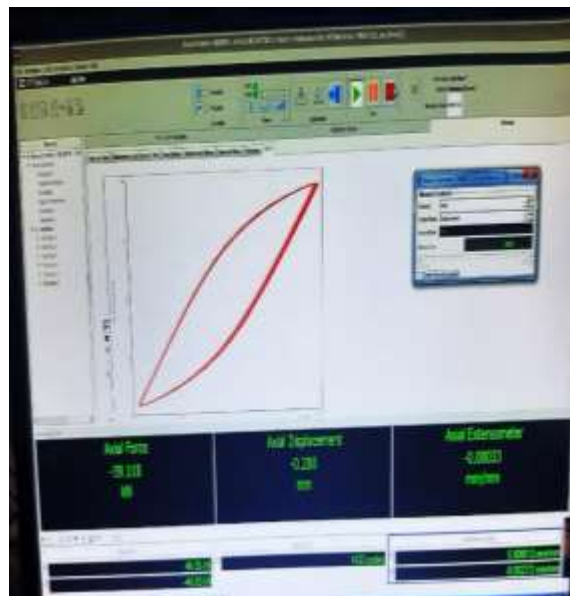
#### 3.1 Equipamentos utilizados

##### 3.1.1 Máquina de ensaio

A máquina utilizada para aplicação de força é constituída de um atuador hidráulico para ensaios dinâmicos e estáticos, com capacidade de 1000 kN e modelo MTS 311.31. Possui um sistema automatizado com configurações para elaborar o ensaio de acordo com os parâmetros desejados para controle, seja em força ou deformação, a aquisição e armazenamento de dados são geradas de forma automática fornecendo uma tabela completa com todas as medições solicitadas durante o ensaio.



(a)



(b)

Figura 3.1: (a) Máquina de ensaios universal servo-hidráulica; (b) interface computacional do software de controle do ensaio.

### 3.1.2 Medidor de deformação (clip gage)

O clip utilizado para controle e leitura da deformação foi do fabricante MTS, abertura máxima de 1mm (faixa de 10% de deformação).



Figura 3.2: Clip gage utilizado no ensaio

## 3.2 Ensaio nos materiais DIN42CrMo4 e DIN34CrMo6

Antes do ensaio de “ratcheting” uniaxial, os corpos de prova foram submetidos a cargas cíclicas sob controle de deformação. Variou-se entre a deformação  $\epsilon_{\text{máx}} = +0,5\%$  e  $\epsilon_{\text{mín}} = -0,5\%$ , até se obter os laços de histerese estabilizados. Essa fase inicial é realizada com o intuito de minimizar a influência do encruamento isotrópico no fenômeno de “ratcheting”, pois antes da estabilização dos laços os materiais sofrem amolecimento ou endurecimento e esses dois comportamentos exercem influência no fenômeno na taxa de “ratcheting”. Todo ensaio foi conduzido a frequência de 0,5Hz.

Inicialmente os materiais escolhidos para realizar os ensaios foram DIN42CrMo4, material equivalente ao 4140 e DIN34CrMo6, equivalente ao 4340. Porém o comportamento desses materiais não foi satisfatório. Uma das grandes dificuldades no ensaio foi a estabilização dos materiais na primeira fase de ensaio em controle de carga. As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam os laços de histerese do 4140 e 4340, respectivamente.

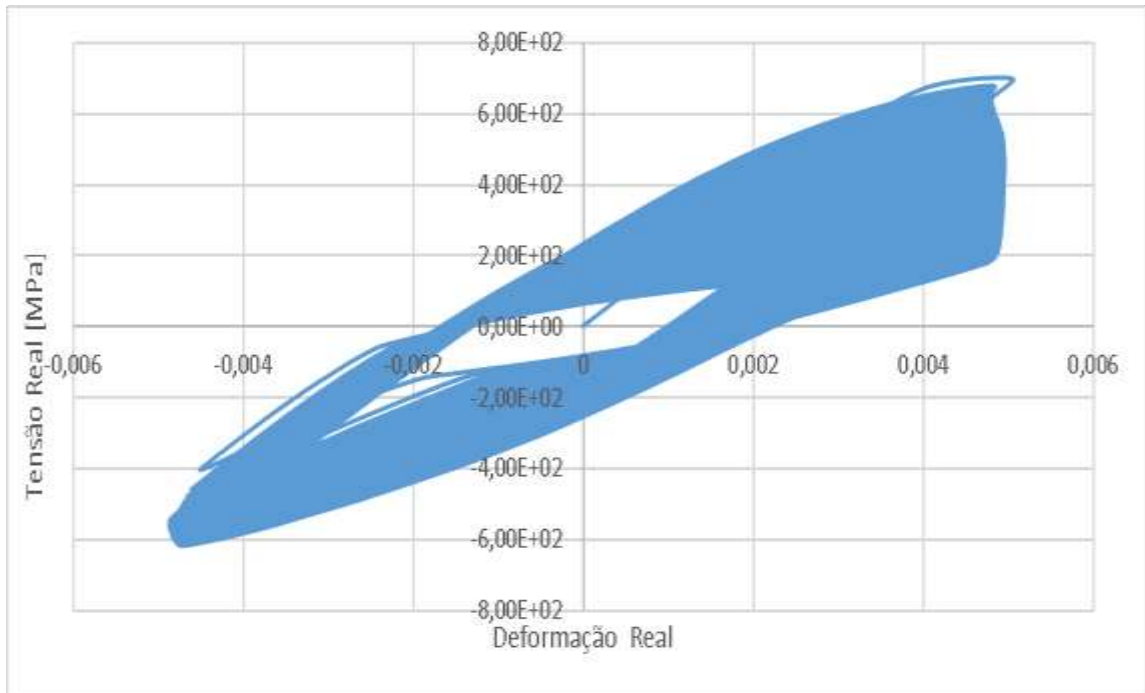


Figura 3.3: Laços de histerese sob controle de deformação do material 4140

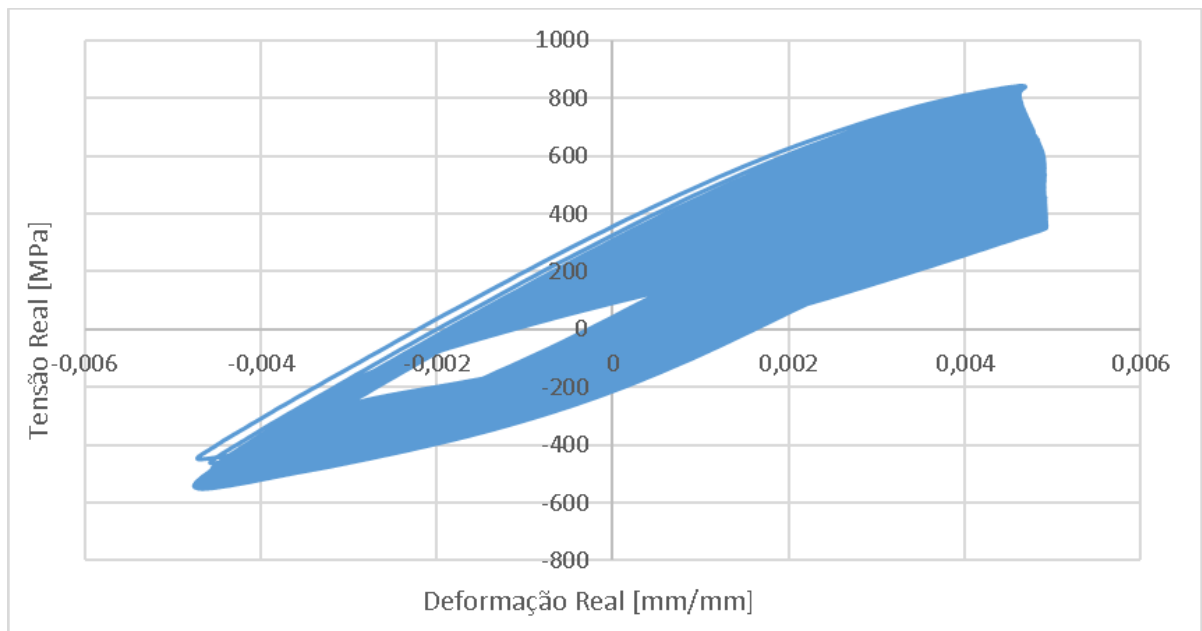


Figura 3.4: Laços de histerese sob controle de deformação do material 4340

O comportamento assimétrico dos laços desses materiais sugere que eles tenham sofrido algum tratamento mecânico anterior que introduziu encruamento cinemático. Além disso, mesmo nessa amplitude de apenas 0,5%, ambos os corpos romperam com apenas 2117 ciclos para o 4140 e 1600 ciclos para o 4340.

Através da Figura 3.5 e 3.6 observa-se o amolecimento por incrementos de ciclos. Assim consegue-se visualizar melhor o comportamento dos materiais durante o carregamento sob controle de deformação.

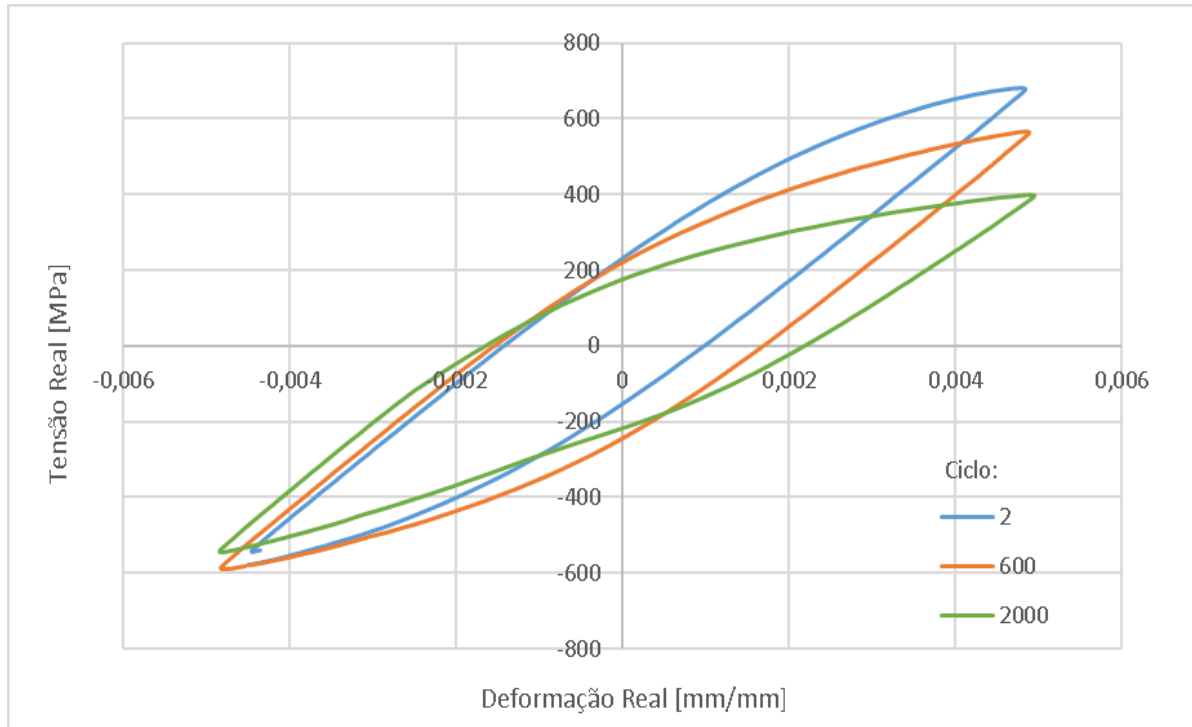


Figura 3.5: Laços de histerese incrementais para o material 4140

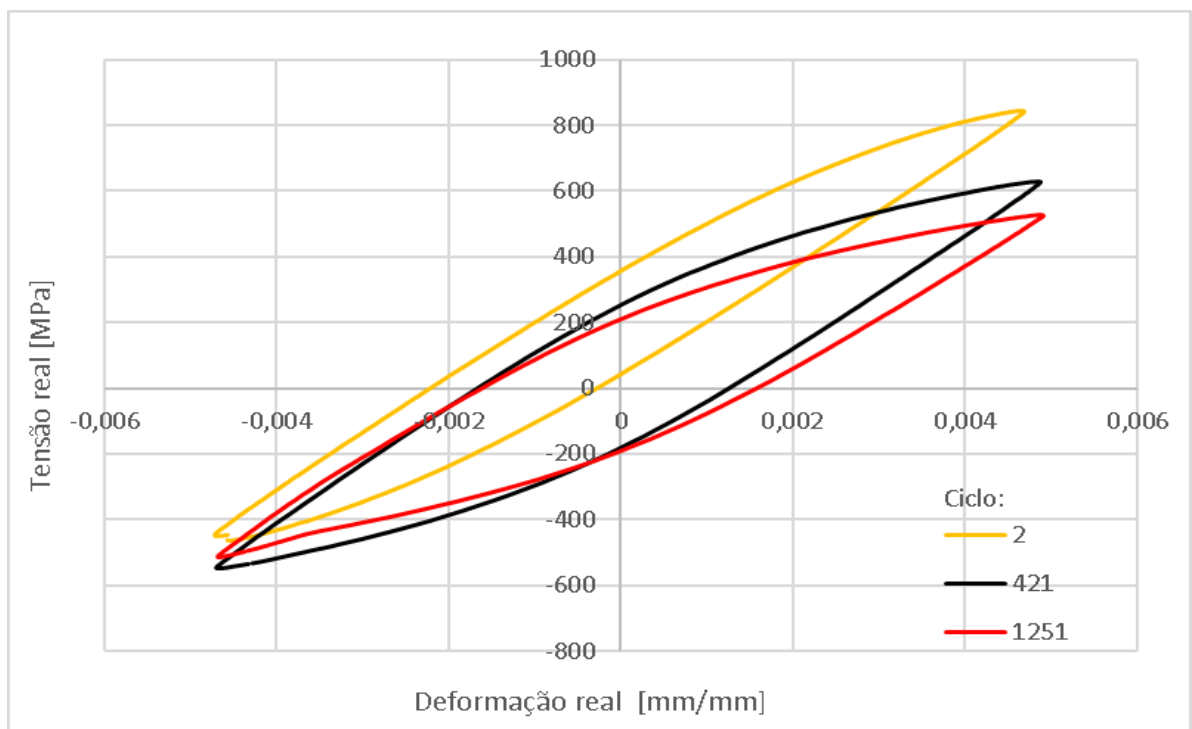


Figura 3.6: Laços de histerese incrementais para o material 4340

Até o surgimento da trinca nota-se que o amolecimento ocorre principalmente na tração e na compressão observa-se um comportamento constante. O amolecendo foi contínuo até a iniciação e propagação da trinca, causando rompimento dos corpos de prova.

O comportamento da tensão média por ciclos dos dois materiais está representado nas Figuras 3.7 e 3.8.

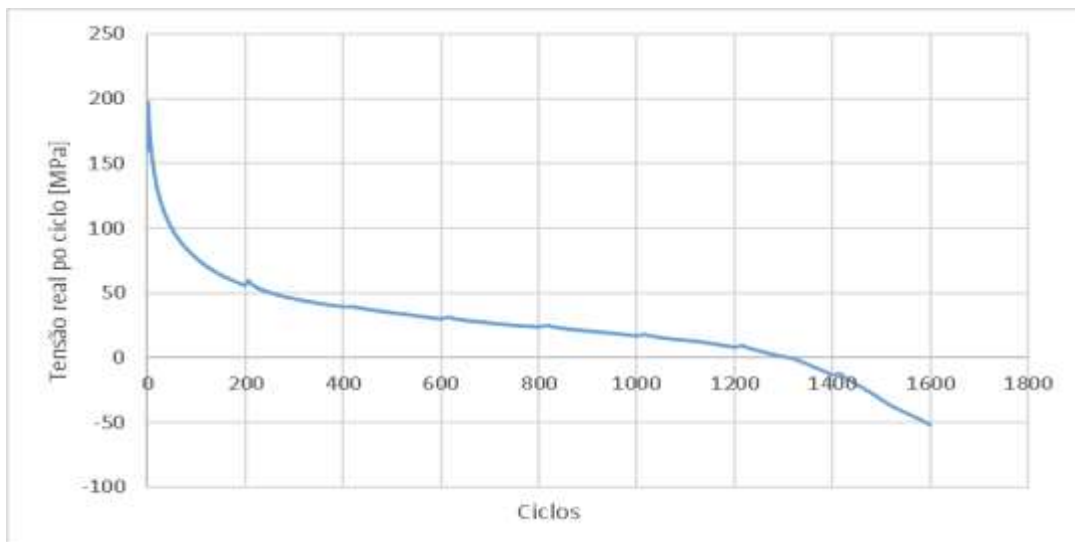


Figura 3.7: Tensão média por ciclo para o material 4340

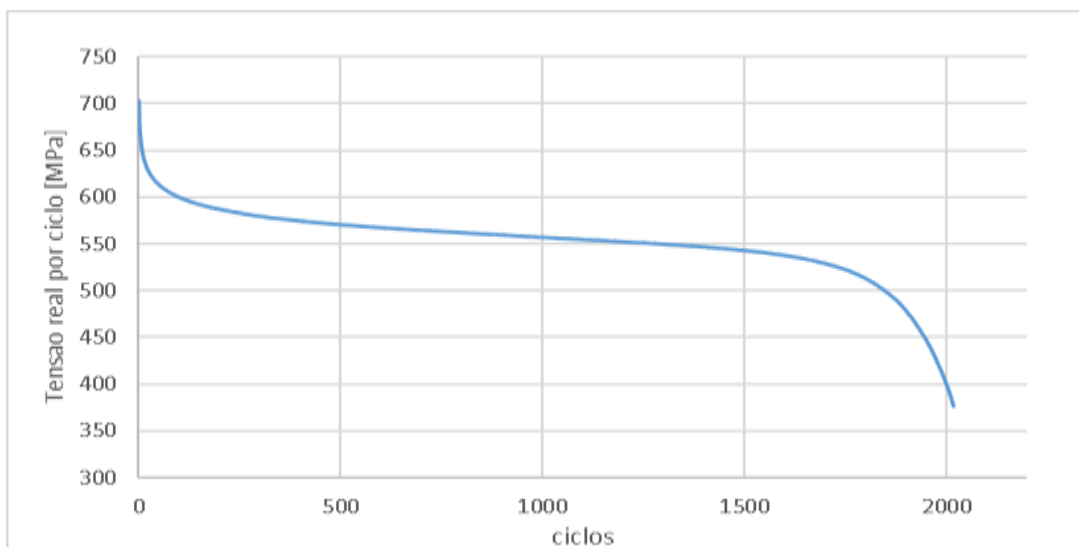


Figura 3.8: Tensão média por ciclo para o material 4340

Nota-se que a tensão média decai por todo carregamento, indicando que esses materiais não puderam ser estabilizados ciclicamente antes da iniciação de trinca, impossibilitando a aplicação e análise do fenômeno de “ratcheting”.

### 3.3 Escolha SAE 1020

Dados os resultados não satisfatórios apresentados na seção acima, foi escolhido aço 1020 para a sequência de ensaios. O motivo por optar pelo 1020 foi o fácil acesso ao material e porque sabe-se previamente que esse material apresenta grande ductilidade, importante para suportar os ciclos de ratcheting.

#### 3.3.1 Propriedades (SAE 1020)

Para determinar as propriedades mecânicas do material SAE 1020, foi realizado um ensaio de tração. Na Figura 3.8 apresenta-se a curva  $\sigma \times \varepsilon$  de engenharia obtida no ensaio de tração.

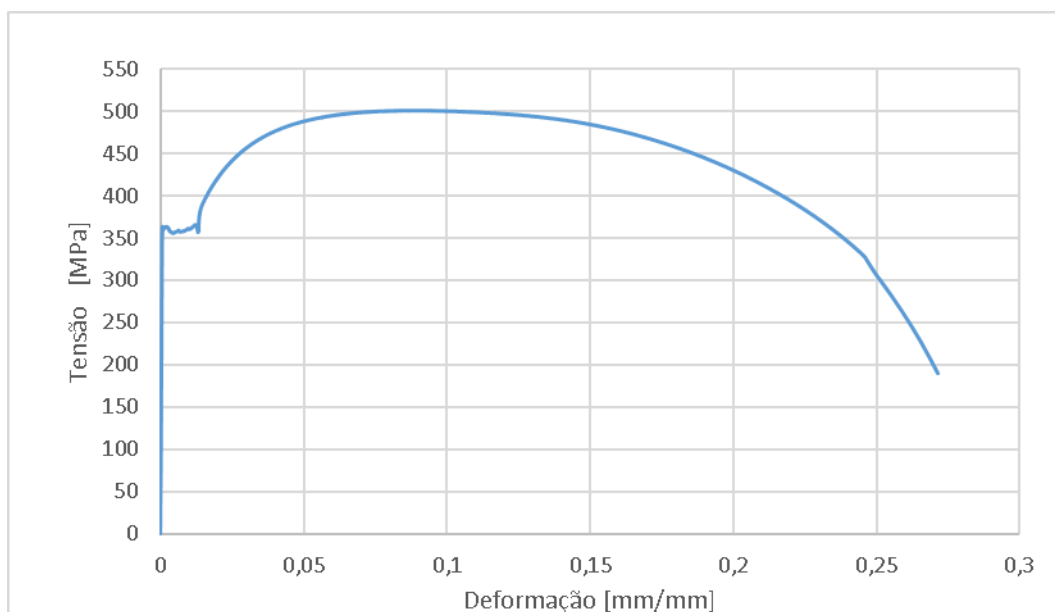


Figura 3.9: Curva Tensão x deformação, ensaio de tração

A tabela 1 apresenta as propriedades calculadas a partir do ensaio de tração do aço SAE 1020.

Tabela 1: Propriedade mecânicas de engenharia

Módulo de Elasticidade (E)	200,00	Gpa
Tensão Máxima ( $S_{R, eng}$ )	504,63	Mpa
Tensão de escoamento ( $S_{y, eng}$ )	369,56	Mpa

As propriedades do material calculadas em dados reais são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2: Propriedade mecânica real

Tensão Máxima ( $S_{R, real}$ )	550,10	Mpa
Tensão de escoamento ( $S_{y, real}$ )	369,86	Mpa

### 3.2.2 Geometria Corpo de prova para ensaio “ratcheting” uniaxial

O ensaio foi realizado em corpo de prova com diâmetro  $\phi = 10\text{mm}$ , comprimento inicial  $l_0 = 20\text{ mm}$  e comprimento total  $l = 148\text{ mm}$ , raio = 20 mm.



Figura 3.10: Corpo de prova utilizado no ensaio

### 3.4 “Ratcheting” uniaxial, material SAE 1020

Assim como para os materiais ensaiados anteriormente, o corpo de prova foi também submetido inicialmente a um ensaio sob controle de deformação, porém com deformação variando entre  $\epsilon_{\text{máx}} = +0,4\%$  e  $\epsilon_{\text{mín}} = -0,4\%$ , até se obter os laços de

histerese estabilizados. A fim de minimizar a influência do encruamento isotrópico no fenômeno de “ratcheting”, a frequência de 0,5Hz foi mantida para todas as etapas de ensaio.

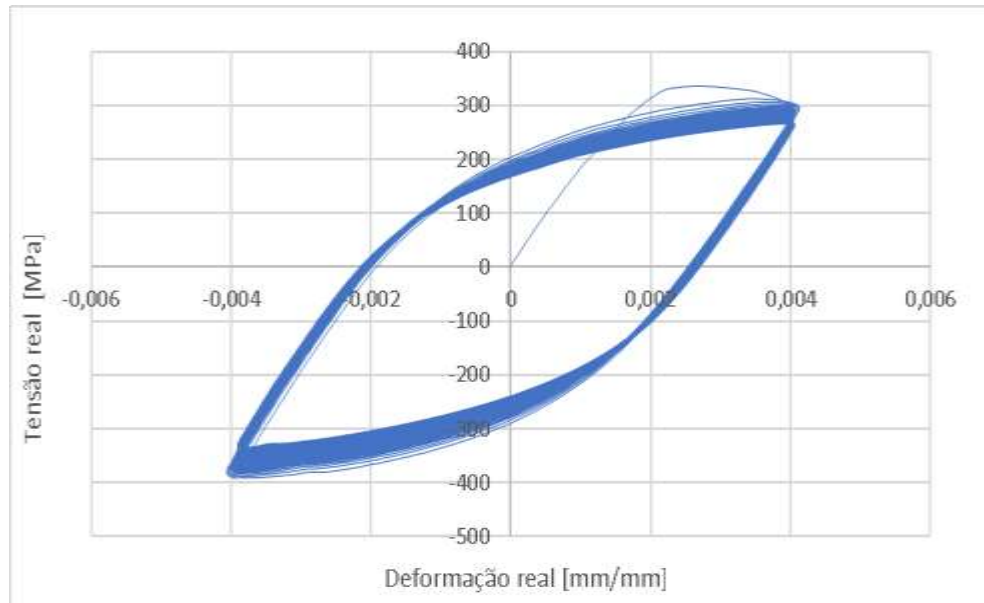


Figura 3.11: Laços de histerese sob controle de deformação completo

A estabilização dos laços ocorreu no intervalo entre 3400 a 3448 ciclos, como pode ser observado na Figura 3.12.

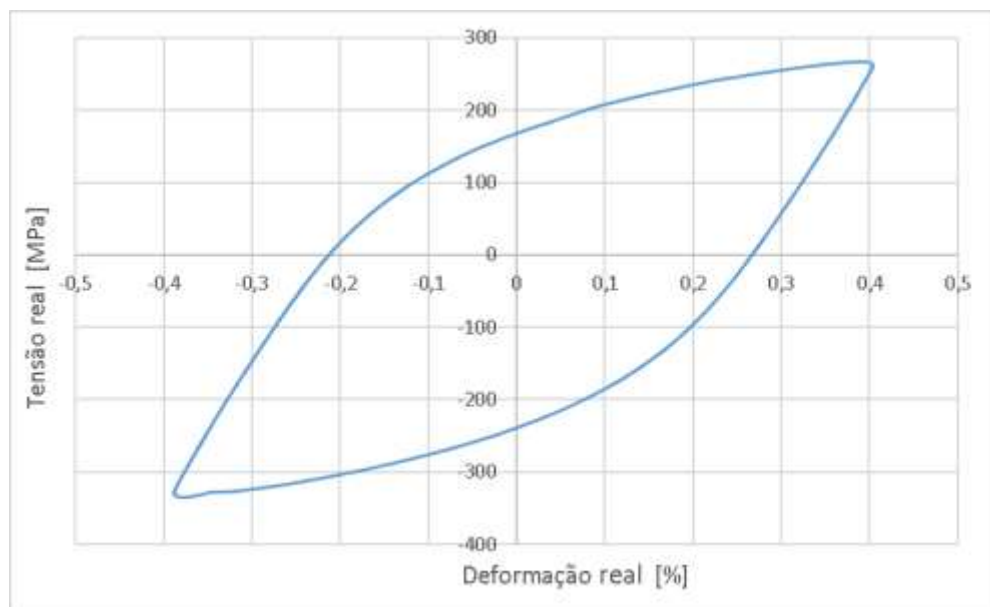


Figura 3.12: Laços de histerese estabilizados sob controle de deformação

Após a estabilização foi realizada a segunda etapa do ensaio, onde o corpo de prova foi submetido ao ensaio cíclico em controle de força. A partir da análise do último laço, identificou-se que os patamares de força seriam força máxima +20,93 kN e força mínima -26,46 kN. A troca do comando de ensaio para força, tem mesmo objetivo inicial, minimizar a influência do encruamento isotrópico nesse tipo de ensaio. Pois da mesma forma será conduzindo o ensaio para observação do fenômeno de “ratcheting”.

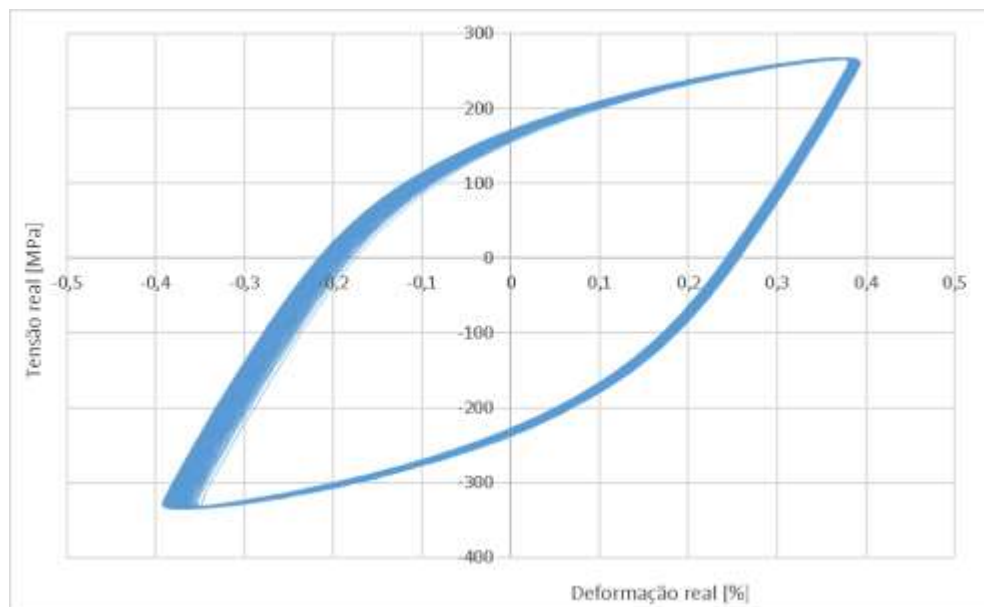


Figura 3.13: Laços de histerese sob controle de força

O material experimentou amolecimento, porém a estabilização ocorreu mais rápido, enquanto foram necessários 3400 ciclos até o material estabilizar em controle de deformação, para controle de força a estabilização ocorreu dentro de 700 ciclos.

A Figura 3.14 mostra os últimos laços de histerese estabilizados sob controle de carga.

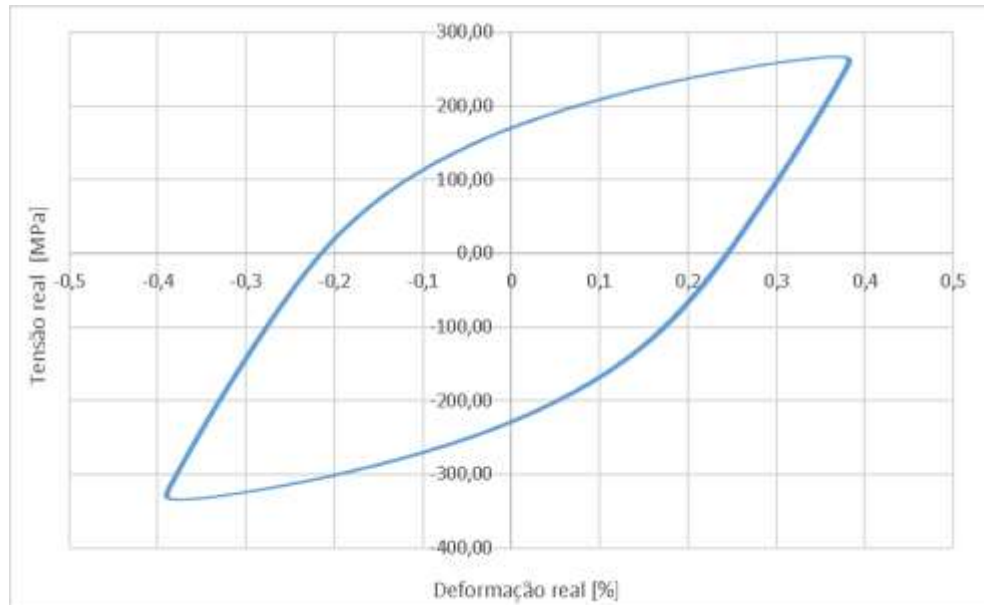


Figura 3.14: Laços de histerese estabilizados sob controle de carga

Após essa etapa a força máxima igual a 20,93 kN foi mantida e força mínima foi alterada para -25kN. Na figura 3.15 nota-se que os laços se deslocam para direita, comportamento típico observado no fenômeno “ratcheting”.

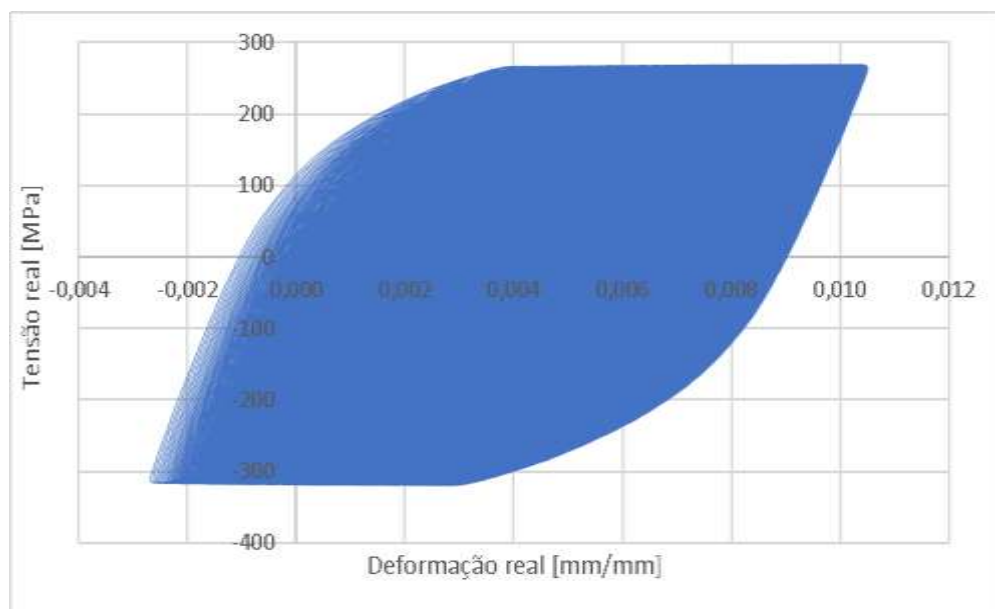


Figura 3.15: Laços de histerese para fenômeno de “ratcheting”

A Figura 3.16 representa os laços de histerese para o fenômeno de “ratcheting” com incremento de 100 ciclos, permitindo melhor visualização do aumento da deformação de “ratcheting” a cada ciclo.

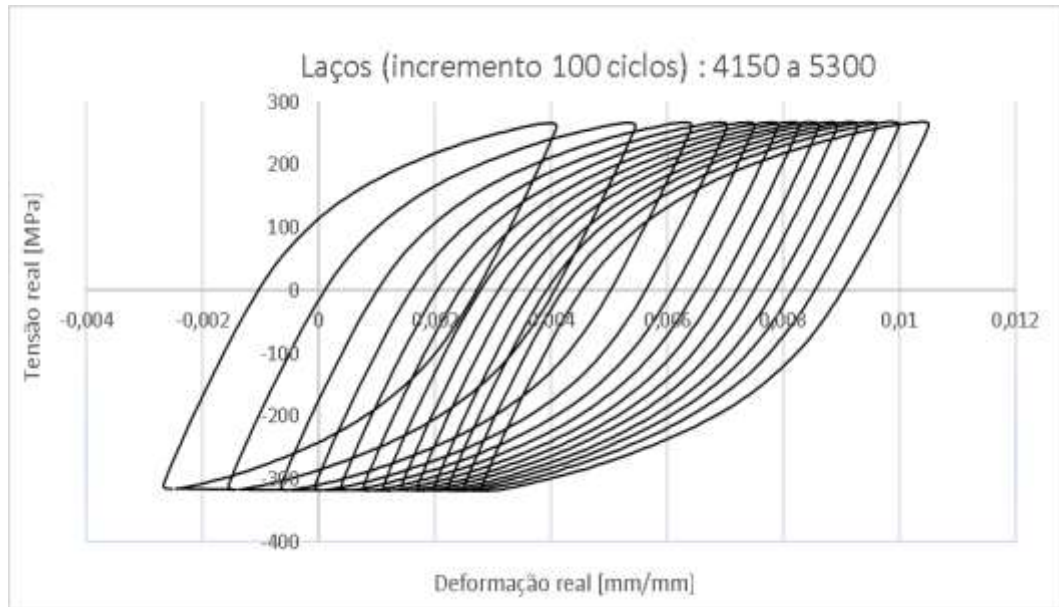


Figura 3.16: Laços de histerese com incremento de 100 ciclos, intervalo 4150 a 5300 ciclos.

Na Figura 3.17 apresenta-se a deformação de “ratcheting”  $\varepsilon_{ri}$  definida como média da soma da deformação máxima e mínima por ciclo, o índice  $i$  representa o ciclo ao qual é realizado o cálculo da deformação de “ratcheting”. O gráfico abaixo representa o histórico da deformação de “ratcheting” até o surgimento da trinca e rompimento do material no ciclo 5300.

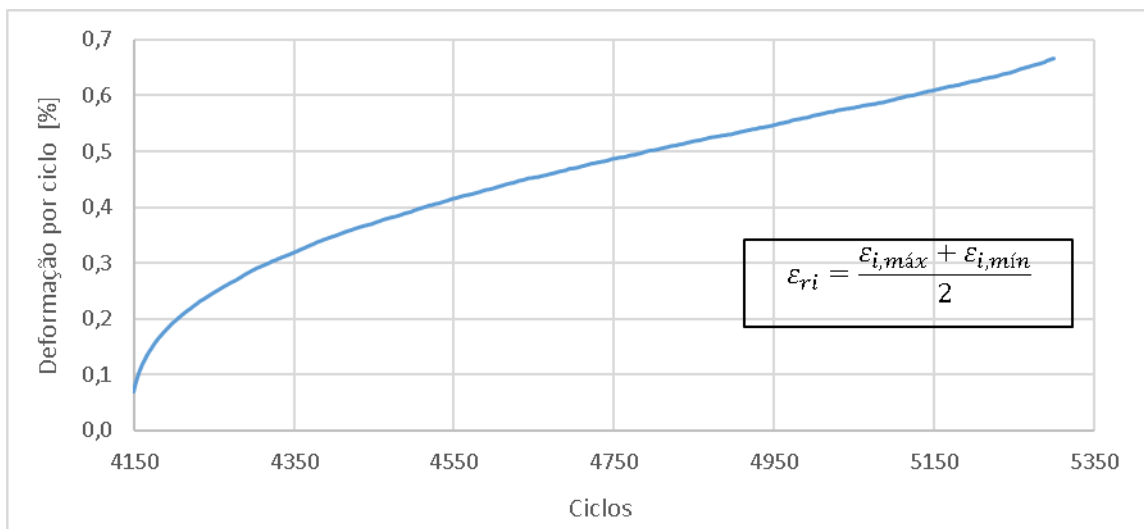


Figura 3.17: Curva da evolução da deformação de “ratcheting” por ciclo

A taxa de “ratcheting” é calculada como a diferença da deformação média entre os ciclos. A Figura 3.17 mostra o gráfico da taxa de “ratcheting” em função dos ciclos, para melhor visualização foi traçada a média móvel da taxa a cada 6 ciclos. Nota-se que uma taxa inicial alta que decai rapidamente, desacelerando próximo a 4300 ciclos e se mantém constante e mesmo quando há surgimento de uma trinca próximos de 5300 a taxa não apresenta crescimento significativo.

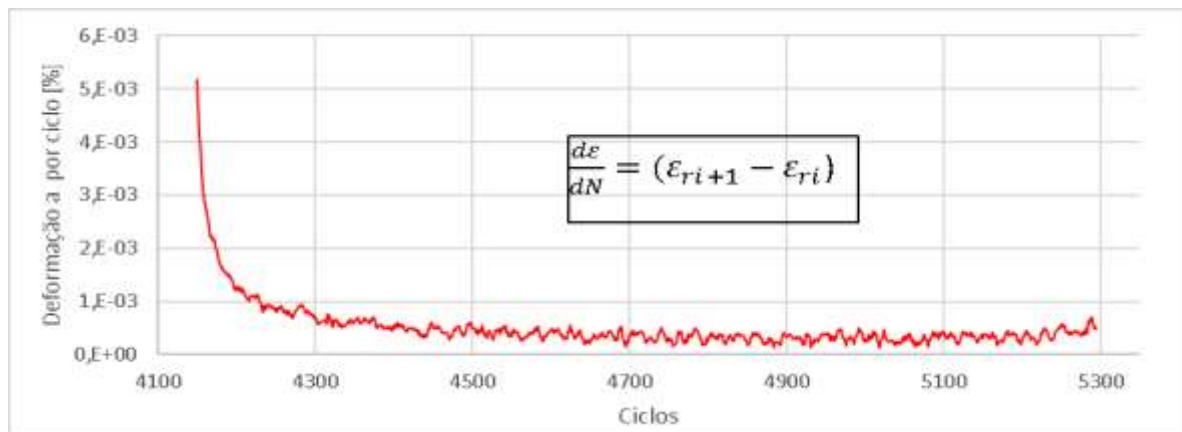


Figura 3.18: Taxa de “ratcheting” por ciclo (gráfico da média móvel a cada 6 ciclos)

A taxa de “ratcheting” convergiu para  $d\epsilon/dN=0,000378$ .

Observa-se no gráfico abaixo entre os trechos de 4300 e 4500 ciclos um decaimento suave da taxa indicando rearranjo microestrutural do material que acomoda nos demais ciclos até que entre os trechos de 5100 e 5300 há um acréscimo suave da curva indicando surgimento de trinca que se propaga rapidamente provocando rompimento do corpo de prova.

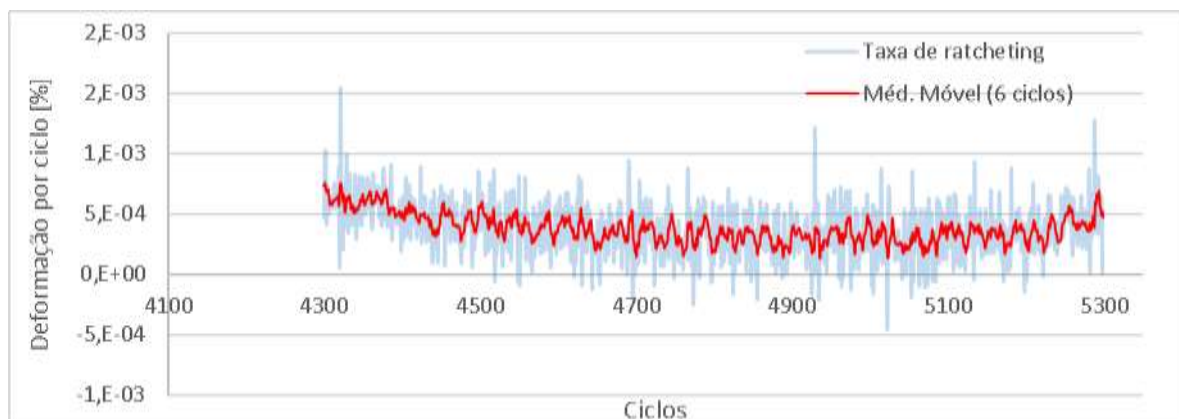


Figura 3.19 Taxa de “ratcheting” para intervalo de 4300 a 5300 ciclo

### 3.5 Relaxação da tensão média

Assim como para o ensaio de “ratcheting”, no ensaio de relaxação da tensão média também foi realizado a fase de estabilização dos laços com controle de deformação, na mesma amplitude de deformação 0,4% e frequência de ensaio igual a 0,5 Hz.

Após os laços estabilizarem o ensaio foi primeiramente conduzido para amplitude de deformação  $\epsilon_{\min}=0\%$  a  $\epsilon_{\max}=+0,4\%$ , introduzindo assim uma história pulsante em deformação. A Figura 3.20 apresenta todo histórico dos laços de histerese para essa amplitude. Observa-se que o material ainda apresentou relaxação da tensão média, e a estabilização ocorreu após 2000 ciclos nessa fase.

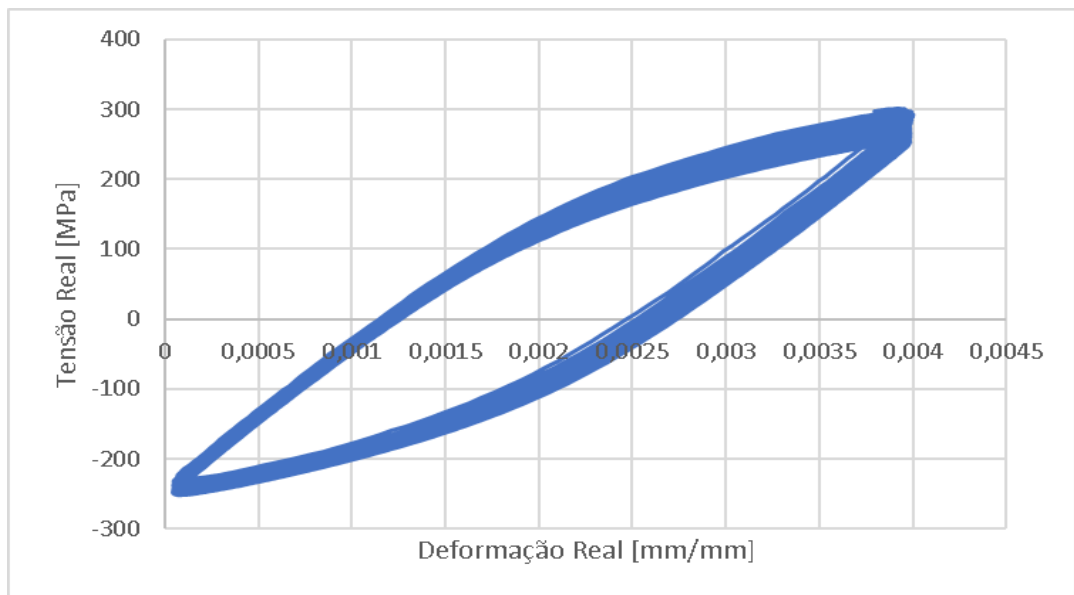


Figura 3.20: Laços de histerese sob amplitude de deformação de  $\epsilon_{\min}=0\%$  a  $\epsilon_{\max}=+0,4\%$ .

Observada a estabilização, a amplitude foi alterada para  $\epsilon_{\min}=-0,4\%$  a  $\epsilon_{\max}=0\%$ , introduzindo assim um carregamento com médias compressivas. Da mesma forma, o material apresentou relaxação da tensão média compressiva, porém aumentando seu valor, sempre tendendo ao valor nulo. Essa estabilização também ocorreu em aproximadamente 2000 ciclos, indicando uma simetria entre os processos trativos e compressivos.

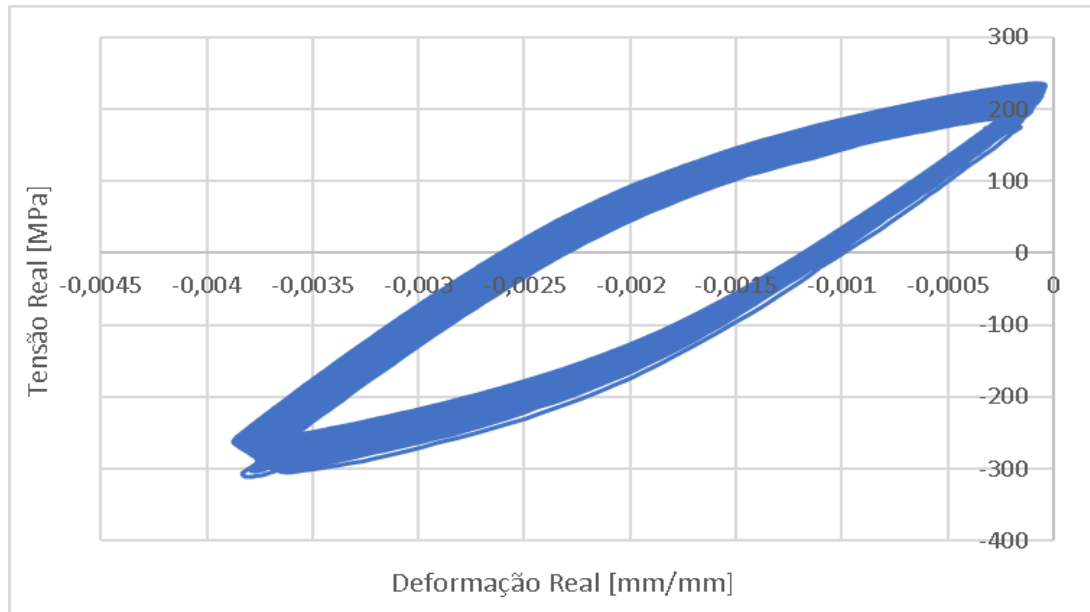


Figura 3.21: Laços de histerese sob amplitude de deformação de  $\epsilon_{\min} = -0,4\%$  a  $\epsilon_{\max} = 0\%$ .

As duas sequências de amplitudes foram repetidas para verificar se o comportamento do material seria igual. Observa-se pelas Figuras 3.22 e 3.23 que o material apresenta comportamento similar e repetitivo para as duas amplitudes de deformação.

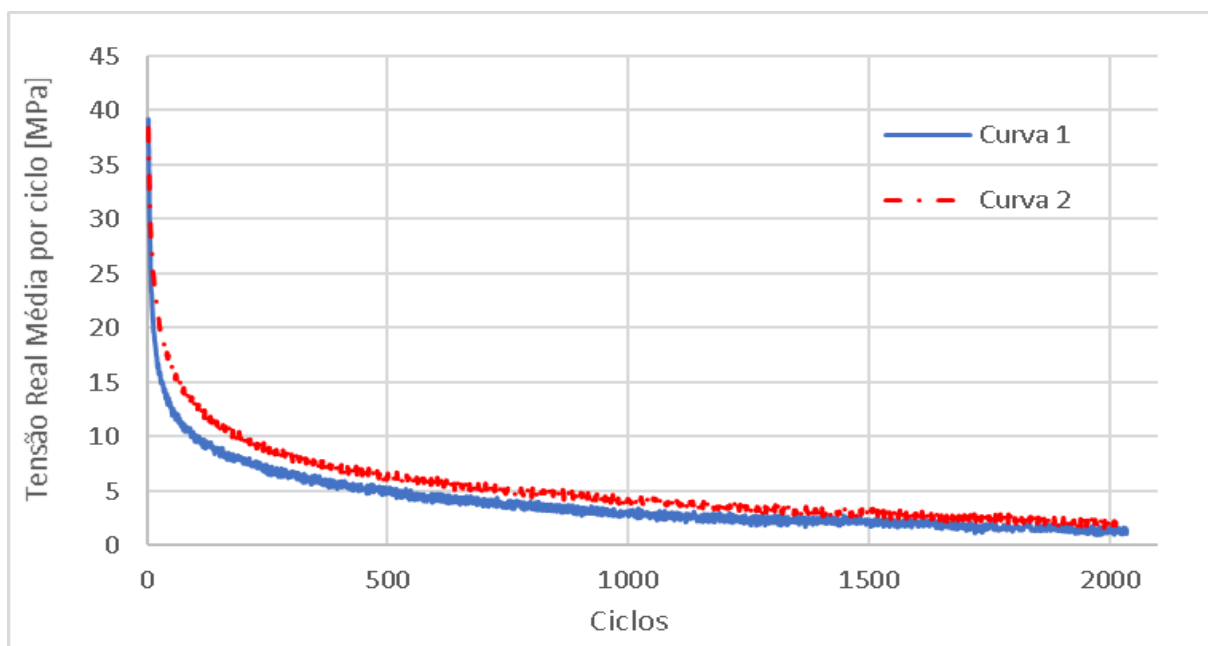


Figura 3.22: Gráfico tensão real média por ciclo para duas sequências de carregamento cíclico sob amplitude de deformação  $\epsilon_{\min} = 0\%$  a  $\epsilon_{\max} = +0,4\%$ .

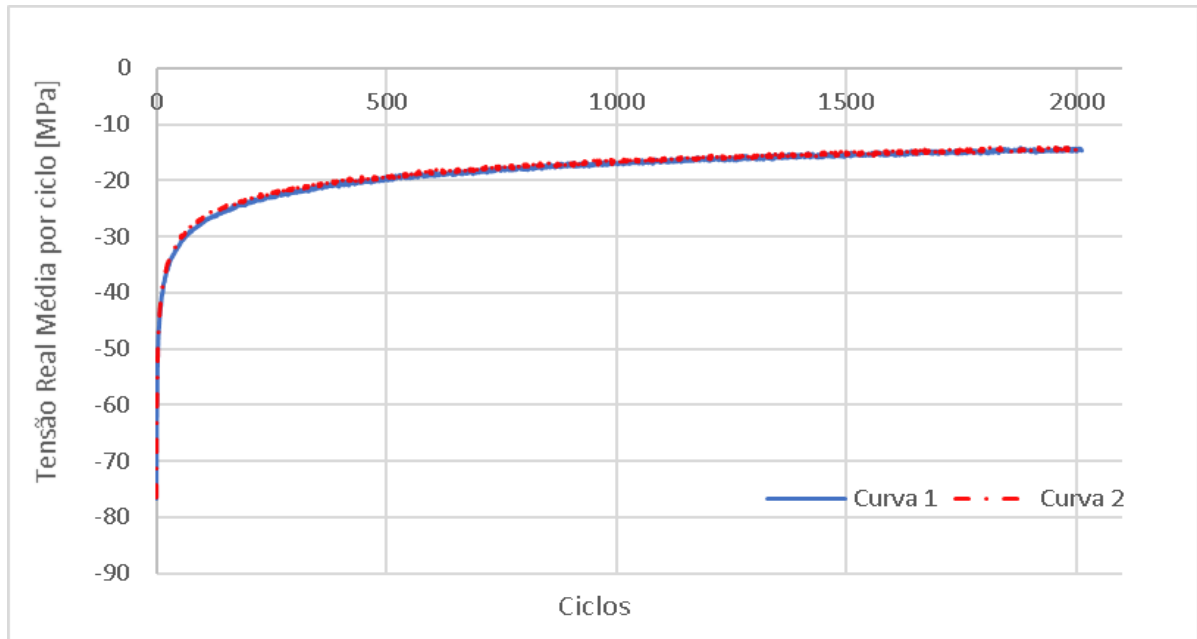


Figura 3.23: Gráfico tensão real média por ciclo para duas sequências de carregamento cíclico sob amplitude de deformação  $\varepsilon_{\min} = -0,4\%$  a  $\varepsilon_{\max} = 0\%$ .

O ensaio seguiu para uma maior amplitude trativa pulsante, de 0% a 0,5% de deformação. Nota-se que a estabilização nesse caso também ocorreu em torno de 2000 ciclos, conforme os estágios anteriores.

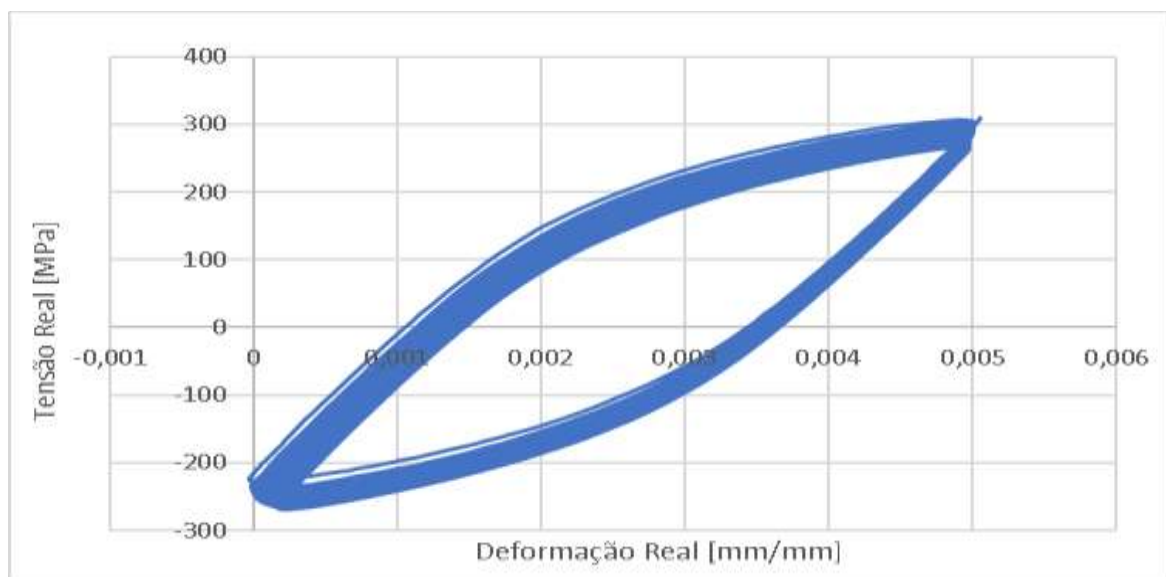


Figura 3.24: Laços de histerese sob amplitude de deformação de  $\varepsilon_{\min} = 0\%$  a  $\varepsilon_{\max} = 0,5\%$ .

A Figura 3.25 apresenta o comportamento da tensão real média em função no número de ciclos para essa amplitude de deformação.

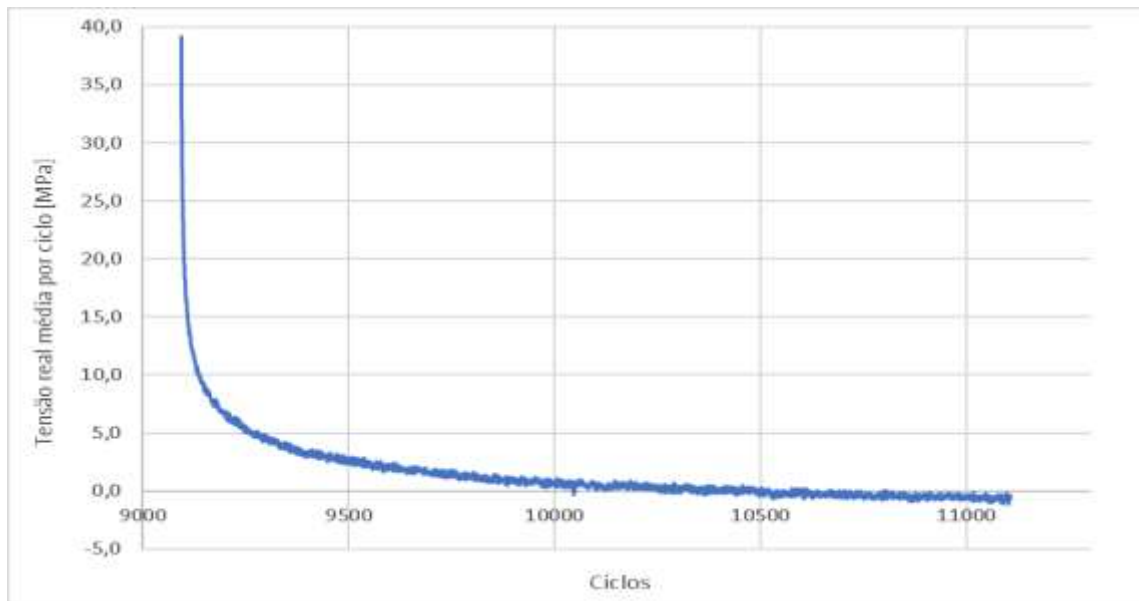


Figura 3.25: Gráfico tensão real média por ciclo sob amplitude de deformação  $\varepsilon_{\min} = 0\%$  a  $\varepsilon_{\max} = 0,5\%$ .

A Figura 3.26 compara a tensão real média por ciclo na tração duas amplitudes de deformação.

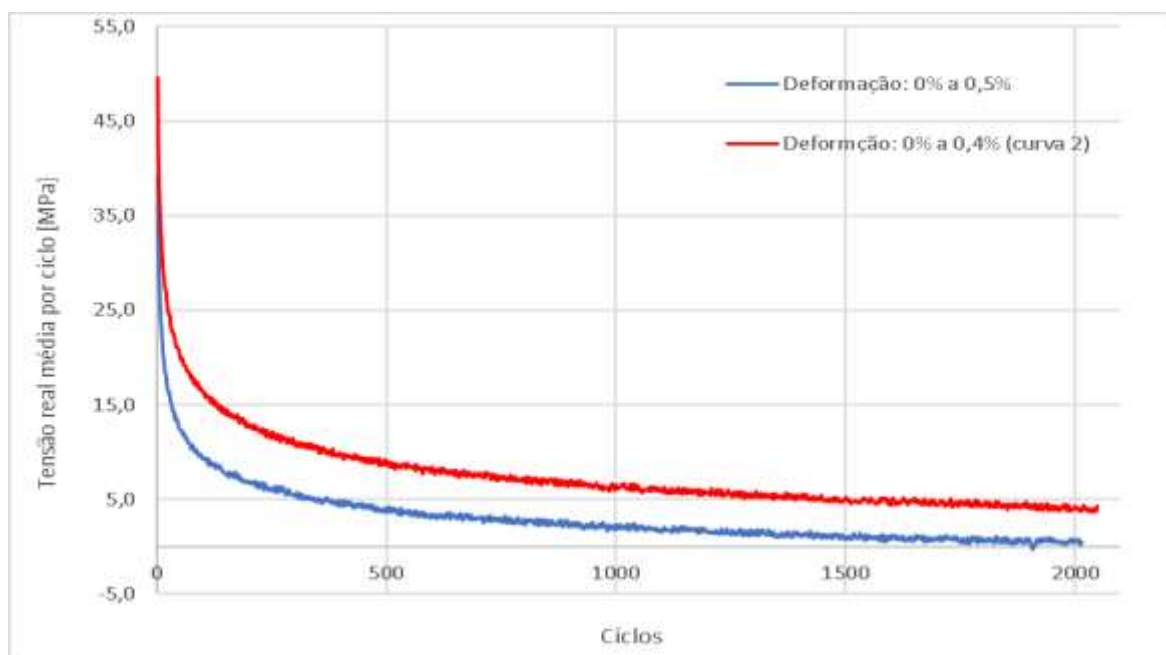


Figura 3.26: Gráfico tensão real média por ciclo para duas sequências de carregamento cíclico de deformação positiva.

Nota-se que o decréscimo da tensão média por ciclo para amplitude de 0,5 é mais acentuada. Isso é esperado, pois em amplitudes maiores há mais deformação plástica a cada ciclo, acelerando o processo de relaxação. Confirma-se assim que o processo de relaxação deve ser controlado pela deformação plástica acumulada ao longo dos ciclos, e não em relação ao número de ciclos.

No próximo capítulo, os dados experimentais serão analisados quantitativamente.

#### 4. Correlação entre os fenômenos “ratcheting” e relaxação da tensão média

Um parâmetro importante para correlacionar e modelar os dois fenômenos estudados é a deformação plástica acumulada. Por essa razão, os modelos que correlacionam “ratcheting” e relaxação da tensão média precisam ser descritos em função da deformação plástica acumulada, representada pela variável ‘p’, e não em função do número de ciclos. Afinal, em um carregamento puramente elástico (onde  $\Delta p = 0$ ) não ocorre ratcheting ou relaxamento da tensão média, mesmo após um grande número de ciclos é ‘p’ quem controla o processo.

Para o caso uniaxial, a definição matemática de ‘p’, demonstrado na equação (3), é a soma em valor absoluto das variações da deformação plástica em cada reversão do ciclo, isto é, a cada meio ciclo soma-se em valor absoluto as variações de deformação plástica subsequentes. Dessa forma, os valores de deformação vão se acumulando no parâmetro ‘p’ e quantificando o quanto de deformação plástica foi gerado no corpo de prova independentemente do número de ciclos ocorridos no ensaio.

$$p = \sum |\Delta \varepsilon_{pl}| = \left| \left( \varepsilon_{m\acute{a}x} - \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{E} \right) - \left( \varepsilon_{m\acute{i}n} - \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{E} \right) \right| \quad (3)$$

A Figura 4.1 representa a deformação por ciclo em função da deformação acumulada ‘p’.

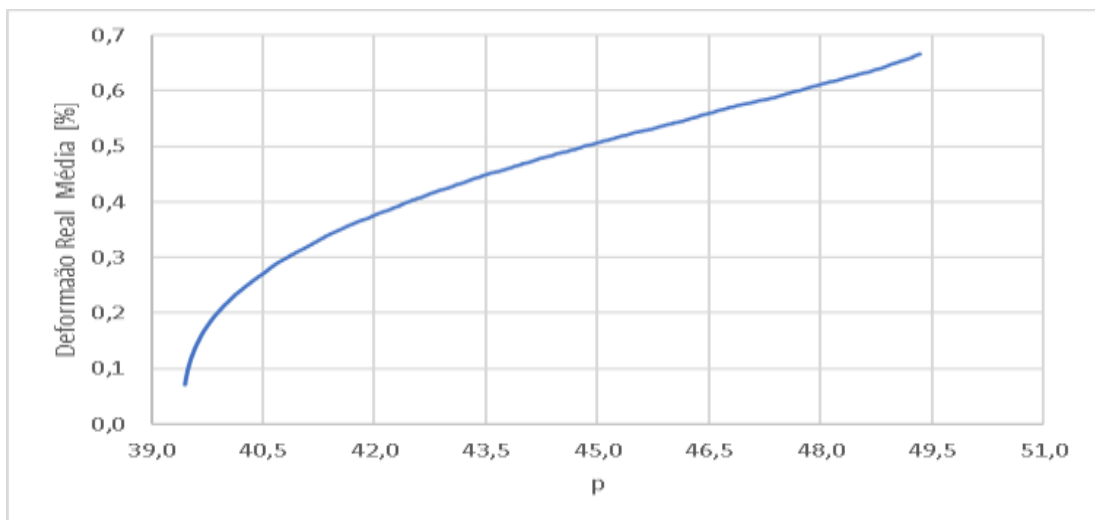


Figura 4.1: Curva da evolução da deformação de “ratcheting” por deformação plástica acumulada p

A Figura 4.2 representa a taxa de “ratcheting” em função da deformação plástica acumulada.

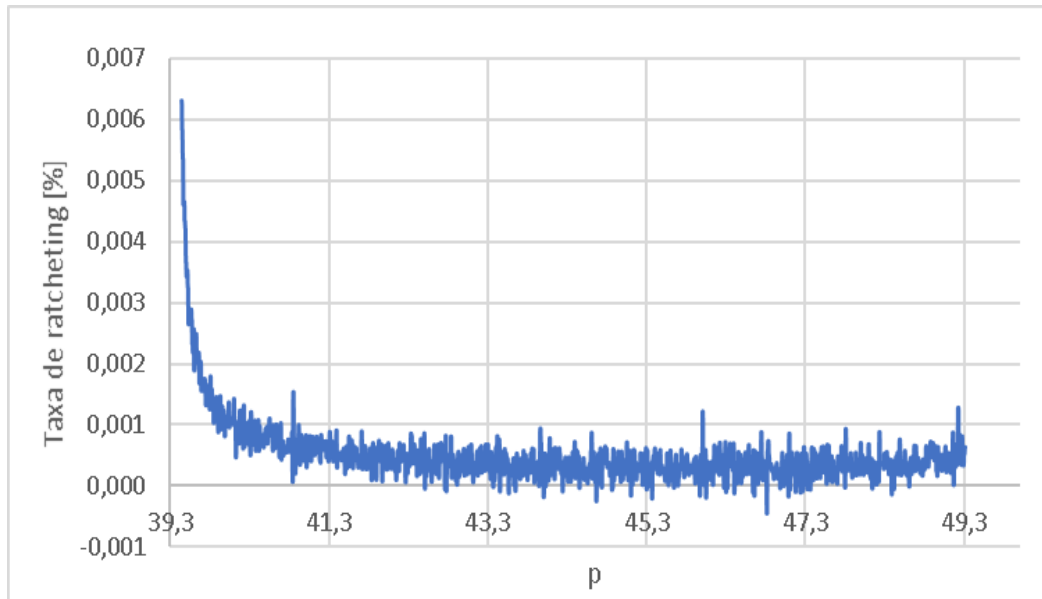


Figura 4.2: Taxa de “ratcheting” em função da deformação plástica acumulada

A Figura 4.3 reúne todos os gráficos obtidos experimentalmente no ensaio de relaxação da tensão média. Os gráficos para amplitudes compressivas foram plotados com os sinais invertidos.

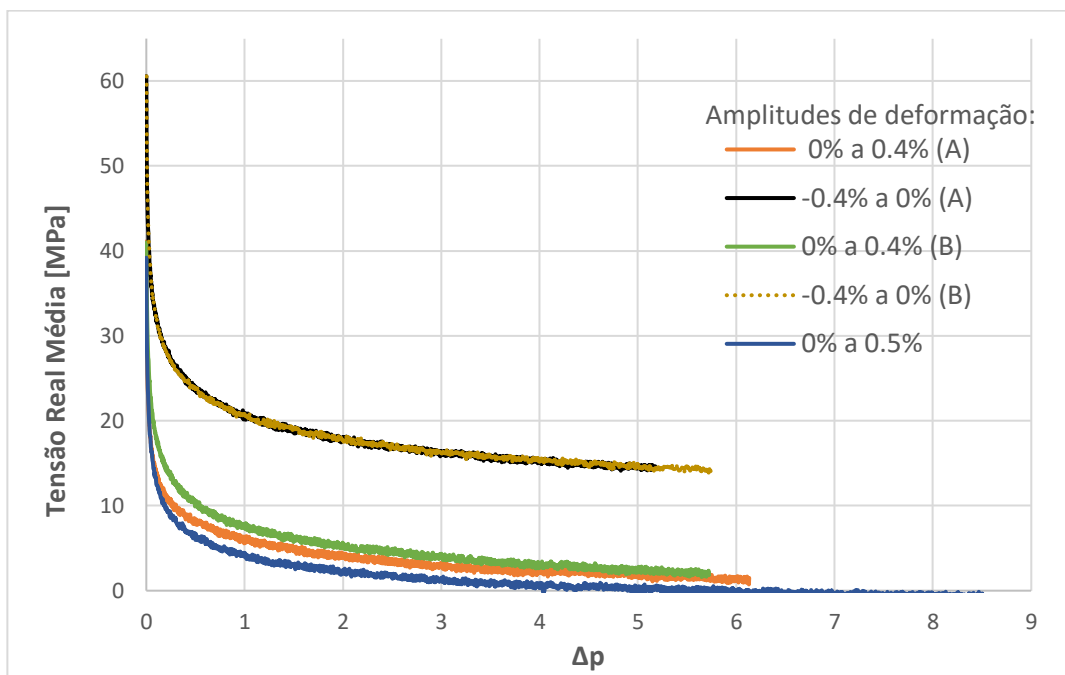


Figura 4.3: União dos gráficos das amplitudes de deformação

Nota-se que a tensão real média relaxa mais em amplitudes de deformação tratativas do que nas amplitudes de deformação compressivas. As curvas nas cores verde, laranja e azul são próximas, indicando que a deformação plástica acumulada  $p$  controla a relaxação mesmo para amplitude maior. A curva em azul (amplitude 0% a 0,5%) tende a um de zero mais próximo do que para as curvas em verde e laranja (amplitude 0% a 0,4%) demonstrando que para amplitudes maiores, mais relaxada fica a assíntota.

Foi utilizado o ambiente Matlab para ajustar uma curva exponencial para todas amplitudes de deformação. Para realizar os ajustes o valor medido da deformação plástica acumulada  $p$  é zerado pelo valor inicial de  $p_0$  medido. A função que rege os ajustes tem a seguinte expressão:

$$f(\Delta p) = A_1 * e^{-a_1 * \Delta p} + A_2 * e^{-a_2 * \Delta p} \quad (4)$$

Sendo:  $A_1 + A_2 = \text{valor inicial} = \sigma_{m_0}$ ;  $\Delta p = p_i - p_0$

O valor inicial é tensão real média inicial de cada amplitude. Realizando as substituições na função 3, temos:

$$f(\Delta p) = A_1 * e^{-a_1 * \Delta p} + (\sigma_{m_0} - A_1) * e^{-a_2 * \Delta p} \quad (5)$$

Onde:  $A_1$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  são os coeficientes a determinar;  $\Delta p$  é a diferença entre as deformações plásticas acumuladas medidas ( $p_i$ ) e a deformação plástica acumulada inicial ( $p_0$ );  $\sigma_{m_0}$  tensão real média inicial medida.

A curva para a amplitude de deformação de 0% a 0,4% para relaxação da tensão média, é expressa pela função 6:

$$f_1(\Delta p_1) = 10,137 * e^{-0,409 * \Delta p_1} + (41,126 - 10,137) * e^{-32,770 * \Delta p_1} \quad (6)$$

Reescrevendo:

$$f_1(\Delta p_1) = 10,137 * e^{-0,409 * \Delta p_1} + (30,989) * e^{-32,770 * \Delta p_1} \quad (7)$$

A deformação plástica acumulada total medida foi  $p_{1total} = 16,871$  e  $\Delta p_{1final} = 6,132$ , 41,126 MPa representa a tensão média inicial medida ( $\sigma_{m_0}$ ).

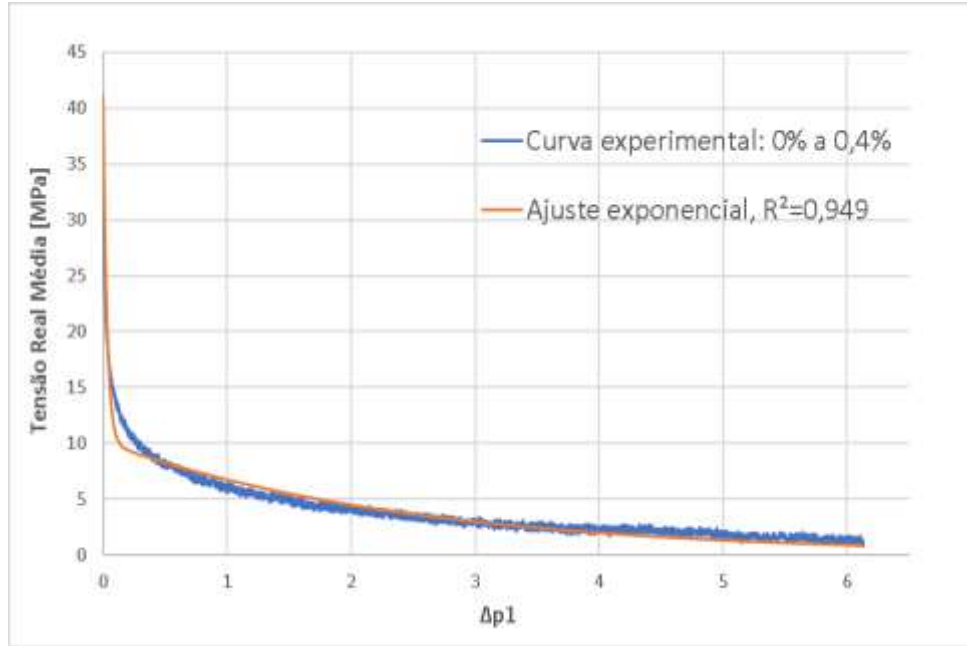


Figura 4.4: Ajuste para curva amplitude de deformação  $\epsilon_{min} = 0\%$  a  $\epsilon_{max} = 0,4\%$

O ajuste exponencial para a curva amplitude de deformação,  $-0,4\%$  a  $0\%$  é definido por

$$f_2(\Delta p_2) = -23,908 * e^{-0,118 * \Delta p_2} + (-60,573 - (-23,908)) * e^{-16,831 * \Delta p_2} \quad (8)$$

$$f_2(\Delta p_2) = -23,908 * e^{-0,118 * \Delta p_2} + (-36,665) * e^{-16,831 * \Delta p_2} \quad (9)$$

A deformação plástica acumulada total medida foi  $p_{2total} = 22,058$  e  $\Delta p_{2final} = 5,176$ , -60,573 MPa representa a tensão média inicial medida ( $\sigma_{m_0}$ ).

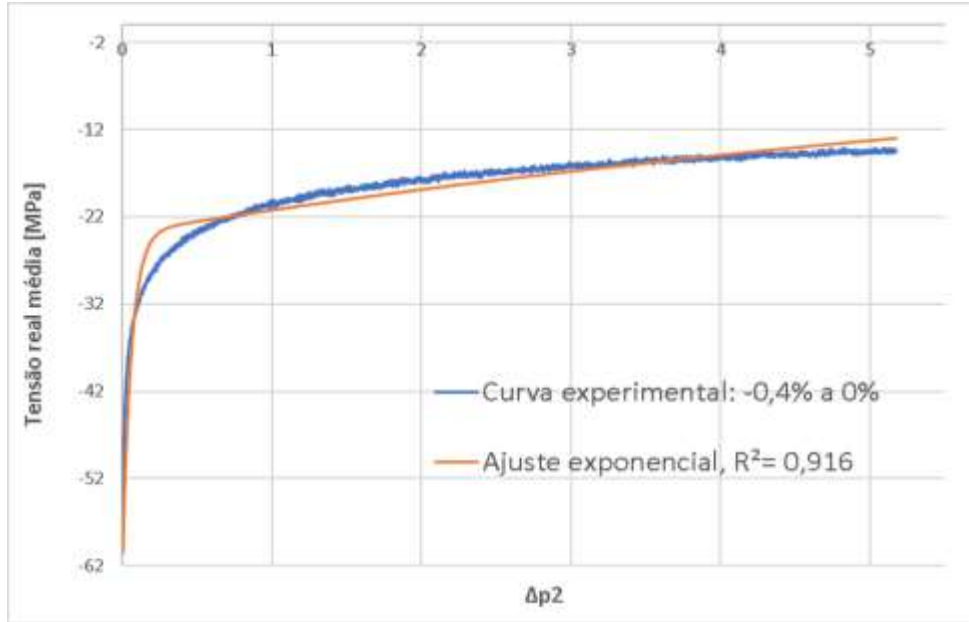


Figura 4.5: Ajusta para curva amplitude de deformação  $\varepsilon_{\min} = -0,4\%$  a  $\varepsilon_{\max} = 0\%$

O ajuste para amplitude de deformação de 0% a 0,5% é dado por,

$$f_3(\Delta p_3) = 28,804 * e^{-31,597 * \Delta p_3} + (39,194 - 28,804) * e^{-0,816 * \Delta p_3} \quad (10)$$

$$f_3(\Delta p_3) = 28,804 * e^{-31,597 * \Delta p_3} + (10,390) * e^{-0,816 * \Delta p_3} \quad (11)$$

A deformação plástica acumulada total medida foi  $p_{3\text{total}} = 30,586$  e  $\Delta p_{3\text{final}} = 8,511$ , 39,194 MPa representa a tensão média inicial medida ( $\sigma_{m_0}$ ).

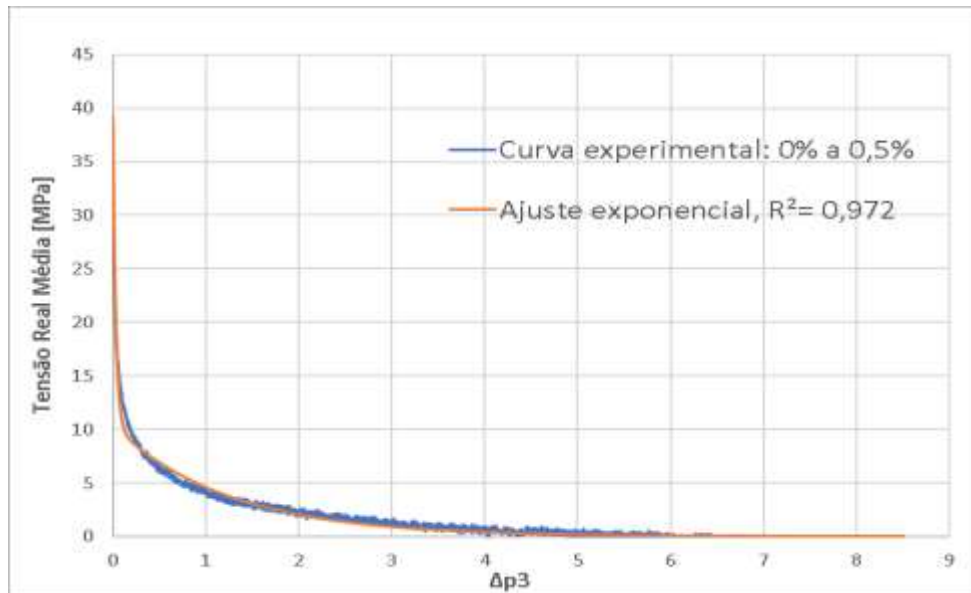


Figura 4.6: Ajusta para curva amplitude de deformação  $\varepsilon_{\min} = 0\%$  a  $\varepsilon_{\max} = 0,5\%$

O ajuste da curva para o gráfico da taxa de “ratcheting” em função da gama de deformação plástica acumulada foi realizado a partir da média móvel dos dados experimentais. Assim foi possível eliminar o ruído do ensaio e aproximar a curva de ajuste.

A função do ajuste é definida por,

$$f_4(\Delta p_4) = -4 * 10^{-6} * \ln (\Delta p_4) + 10^{-5} \quad (12)$$

Onde:  $\Delta p$  é a diferença entre as deformações plásticas acumuladas medidas ( $p_{4i}$ ) e a deformação plástica acumulada inicial medida  $p_{40}$ .

A deformação plástica acumulada total medida foi  $p_{4total} = 49,337$  e  $\Delta p_{4final} = 9,894$ .

A figura 4.7 representa média móvel da taxa de “ratcheting” calculada através dos valores medidos experimentalmente em função da média móvel das gamas de deformação plástica acumulada.

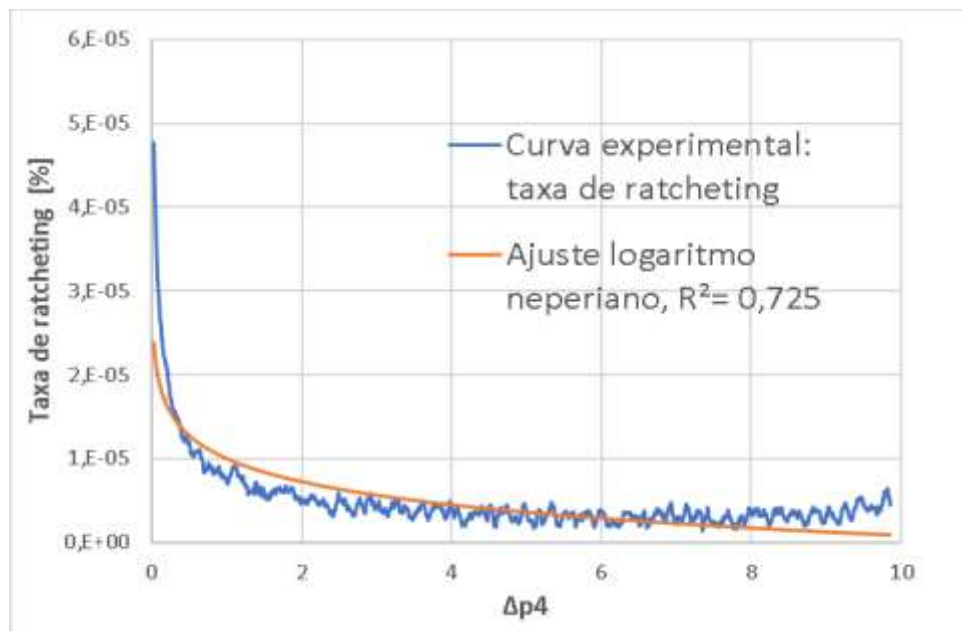


Figura 4.7: Ajuste para média móvel da taxa de “ratcheting”

As funções exponencial e logarítmica são inversas entre si, e como já mencionado anteriormente o fenômeno de relaxação da tensão é um problema inverso do fenômeno de “ratcheting”. Esse fato é demonstrado através das funções de ajuste que regem os dois fenômenos.

## 5. Conclusões

No presente trabalho estudou-se os fenômenos de relaxação da tensão média e de “ratcheting” em um aço 1020. Foram realizados estudos desses fenômenos também para os aços 4340 e 4140, porém não foi possível estabilizá-los ciclicamente antes da iniciação de uma trinca, causando a fratura prematura desses materiais inviabilizando a análise de seus dados.

Para análise dos dados para aço 1020, inicialmente foi realizado ensaio em controle de deformação com média zero para estabilizar o seu amolecimento cíclico inerente, para analisar os fenômenos sem a influência desse tipo de encruamento isotrópico. O ensaio de “ratcheting” foi realizado sob controle de carga, colocou-se uma componente não nula da carga provocando o fenômeno onde os laços de histerese são deslocados e uma deformação plástica se acumula a cada ciclo. A taxa de “ratcheting” medida a partir da deformação média a cada ciclo que se desloca positivamente no caso de “ratcheting” trativo ou negativamente no caso de “ratcheting” compressivo, está relacionada a deformação plástica acumulada que quantifica o quanto de deformação plástica ocorreu a cada excursão de pico-vale ou vale-pico desde o início do ensaio, e a cada excursão cada valor quantificado é somado em valor absoluto na variável  $p$ .

O processo de relaxação da tensão média foi realizado com controle de deformação também inicialmente com média zero, assim como para o estudo de “ratcheting”. Após observada a estabilização do material, colocou-se carga pulsantes em deformação, isto é, com deformação mínima nula e a deformação máxima foi estipulada em 0,4% e 0,5%, realizou-se o processo no sentido compressivo somente para a amplitude de deformação mínima em -0,4% e deformação máxima nula. Notou-se que a tensão média relaxava na direção do valor nulo em todos os casos, como esperado. Os valores da relaxação também foram correlacionados com deformação plástica acumulada, representada pela variável  $p$ .

Os fenômenos de relaxação da tensão média e “ratcheting” são correlacionados a partir da medida de  $\Delta p_{final}$  de cada processo. Os valores apresentados para  $\Delta p_{final}$  são:  $\Delta p_{1final} = 6,132$ ,  $\Delta p_{2final} = 5,176$ ,  $\Delta p_{3final} = 8,511$  e  $\Delta p_{4final} = 9,894$ . A estabilização dos processos de relaxação da tensão média ( $\Delta p_{1final}$ ,  $\Delta p_{2final}$ ,  $\Delta p_{3final}$ ) e “ratcheting” ( $\Delta p_{4final}$ ), ocorreram com uma variação de

$\Delta p_{final}$  característica de mesma ordem de grandeza, isso demonstra que há uma correlação entre esses dois fenômenos, pois ambos são caracterizados pela assimetria dos laços de histerese, isto é, apresentam um comportamento não-Masing e o fato dos dois fenômenos serem controlados pelo  $\Delta p$  com mesma ordem de grandeza e terem a mesma variação exponencial, sugerem que há uma correlação entre os dois fenômenos.

## Referências bibliográficas

- [1] Peres, J. M. A. **Análise da Deformação Cíclica Progressiva em Tubulações Elasto-Viscoplásticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ, 2015.
- [2] Hao, H., Ye, D., Chen, Y., Mi, F., Liu, J. **A Study on the Mean Stress Relaxation Behavior of 2124-T851 Aluminum Alloy During Low-Cycle Fatigue at Different Strain Ratios**. Mater. Des., 67 (2015), pp. 272-279
- [3] Lin, C.K., Chu, C.C. **Mean stress effects on low-cycle fatigue for a precipitation-hardening martensitic stainless steel in different tempers**. Fatigue Fract Eng Mater Struct, 23 (2000), pp. 545-553
- [4] Tao, G., Xia, Z. **Mean stress/strain effect on fatigue behavior of an epoxy resin**, Int J Fatigue, 29 (2007), pp. 2180-2190
- [5] Koh, S.K. **Low-cycle fatigue life of SiC-particulate-reinforced Al–Si cast alloy composites with tensile mean strain effects**. Int J Fatigue, 21 (1999), pp. 1019-1032
- [6] Huang, C.S. **Comparison of strain ratio effect on cyclic plastic deformation for special stainless steels**. Scr Mater, 54 (2006), pp. 1181-1186
- [7] Lim, C. B., Kim, K. S. and Seong, J. B. (2009), **Ratcheting and fatigue behavior of a copper alloy under uniaxial cyclic loading with mean stress**. Int. J. Fatigue, 31, 501–507.
- [8] Castro, J.T.P.; Meggiolaro, M.A., **Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço, vol.I – Iniciação de Trincas**, CreatSpace, 2009.
- [9] Castro, J.T.P; Meggiolaro, M.A., **Fatigue Design Techniques :Vol.II- Low – Cycle and Multiaxial Fatigue**. Createspace, 2016.

- [10] Neves, R. S. **Implementação e validação de modelos constitutivos para plasticidade cíclica**. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, Publicação Nº. 027<sup>a</sup>/2015, Faculdade UnB Gama/FT/, Universidade de Brasília, DF, 2015, 110 p.
- [11] Sanchez, E. C. M. **Desenvolvimento de uma Máquina Tração-Torção de Ensaio de Fadiga para Avaliação de Modelos de Plasticidade Incremental**. 2014. 190p. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica - Rio de Janeiro, RJ.
- [12] Masing, G. **Eigenspannungen and Verfestigung Beim Messing**. Proc 2nd Int Cong App Mech, Zurich, Switzerland, 1926. (in German)
- [13] Junior, L.A., **Estudo experimental da plasticidade cíclica e fadiga do aço inoxidável 304L**. Tese (Mestrado em Ciências Mecânicas) –Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, p.71. 2017
- [14] S.K. Paul, N. Stanford, A. Taylor, T. Hilditch, **The effect of low cycle fatigue, ratcheting and mean stress relaxation on stress-strain response and microstructural development in a dual phase steel**, Int J Fatigue, 80 (2015), pp. 341-348
- [15] K. Dutta, S. Sivaprasad, S. Tarafder, K.K. Ray, **Influence of asymmetric cyclic loading on substructure formation and ratcheting fatigue behaviour of aisi 304LN**, stainless steel Mater Sci Eng A, 527 (2010), pp. 7571-7579
- [16] Paul, S. K., Sivaprasad, S., Dhar, S. and Tarafder, S. (2010), **Ratcheting and low cycle fatigue behavior of SA333 steel and their life prediction**. J. Nucl. Mater., 401, 17–24.
- [17] Date, S., Ishikawa, H., Otani, T. and Takahashi, Y. (2008) **Effect of ratcheting deformation on fatigue and creep-fatigue life of 316FR stainless steel**. Nucl. Eng. Des., 238, 336–346.