

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JOSÉ DANIEL RODRIGUES LUZ

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM AÇO INOXIDÁVEL
FERRÍTICO SOB MUDANÇA DE TRAJETÓRIA DE DEFORMAÇÃO

BELO HORIZONTE

2025

JOSÉ DANIEL RODRIGUES LUZ

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA AÇO INOXIDÁVEL
FERRÍTICO SOB MUDANÇA DE TRAJETÓRIA DE DEFORMAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Orientador: Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2025

JOSÉ DANIEL RODRIGUES LUZ

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA AÇO INOXIDÁVEL
FERRÍTICO SOB MUDANÇA DE TRAJETÓRIA DE DEFORMAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wellington Lopes – Orientador

Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Dra. Aline Silva Magalhães

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Dinah Rosa, e ao meu pai, José Roberto. Não existem palavras suficientes para descrever a gratidão que carrego em meu coração por tudo o que já fizeram e fazem por mim todos os dias.

A todos os meus familiares, sem os quais eu não teria conseguido, pelo apoio e pela compreensão diante das minhas ausências. Em especial, agradeço às minhas tias Lea Cláudia e Dilma Rosa por todo o carinho, cuidado e boa vontade, e ao meu primo Marcos Paulo pelo companheirismo e amizade ao longo de todos esses anos.

Ao Igor Braga, pela amizade durante essa jornada e por sempre me desafiar e me incentivar. E à Ana Clara, por toda a cumplicidade, paciência e apoio nas horas de dificuldade.

Ao meu coordenador, Wellington Lopes, primeiramente por ter aceitado me orientar, por toda a ajuda prestada, pela paciência, dedicação e por todo o conhecimento compartilhado.

Às professoras Aline Silva e Elaine Carballo, por toda a dedicação ao ensino e, principalmente, por toda a gentileza e cuidado com que recebem seus alunos.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, pelo suporte técnico, operacional e de infraestrutura oferecido, sem o qual este trabalho não seria possível.

Ao CEFET-MG, serei eternamente grato pelas portas abertas, pelas oportunidades oferecidas e pelo acolhimento recebido.

RESUMO

Os aços inoxidáveis ferríticos têm se tornado cada vez mais populares na indústria moderna, apresentando-se como uma opção viável em diversos setores de fabricação, que vão desde o automobilismo até aplicações na construção civil. Assim, considerando sua vasta gama de aplicações e as diferentes formas e configurações incorporadas pelo metal, vislumbra-se a importância de compreender as vias pelas quais as deformações vigentes afetam o desempenho desse material. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento mecânico do aço inoxidável ferrítico AISI 430 tipo H sob carregamento cíclico, considerando diferentes amplitudes de deformação e variações na taxa de deformação. Para atestar a ocorrência do efeito Bauschinger, foram utilizados os parâmetros de tensão (BSP) e energia (BEP) de Bauschinger para amplitudes de deformação de 0,63 e 0,98, a uma taxa de 0,001/s, por meio do ensaio de cisalhamento cíclico planar. Além disso, o aço foi submetido a carregamento monotônico via ensaio de cisalhamento para taxas de deformação de 0,001/s e 0,003/s. A partir dos experimentos realizados, com base nos parâmetros BSP e Delta, a amplitude de deformação de 0,98 obteve os maiores valores de referência do efeito Bauschinger; entretanto a análise do resultado obtido pelo parâmetro BEF não apresentou a mesma correspondência. Com base no gráfico tensão-deformação obtido, foi possível identificar a ocorrência do pico de tensão promovido pelo aumento da taxa de deformação durante o carregamento cíclico do aço. Além disso, verificou-se que o acréscimo na taxa de deformação foi responsável pela elevação do fluxo de tensão após o ponto de inflexão.

Palavras chaves: Aço AISI 430 tipo H, aço inoxidável ferrítico, cisalhamento cíclico, efeito Bauschinger, taxa de deformação.

ABSTRACT

Ferritic stainless steels have become increasingly popular in modern industry, presenting themselves as a viable option in various manufacturing sectors, ranging from the automotive industry to applications in civil construction. Thus, considering their wide range of applications and the different forms and configurations incorporated by the metal, it is essential to understand the ways in which the prevailing deformations affect the performance of this material. In this context, the present study aims to investigate the mechanical behavior of ferritic stainless steel AISI 430 type H under cyclic loading, considering different strain amplitudes and variations in the strain rate. To verify the occurrence of the Bauschinger effect, the Bauschinger stress parameter (BSP) and Bauschinger energy parameter (BEP) were used for strain amplitudes of 0.63 and 0.98 at a rate of 0.001/s through planar cyclic shear testing. Additionally, the steel was subjected to monotonic loading via shear testing at strain rates of 0.001/s and 0.003/s. Based on the experiments conducted, it was not possible to confirm the occurrence of the Bauschinger effect using the BSP and BEP parameters. One of the probable causes of this result was the small amplitude variation caused by load fluctuations in the testing equipment. The obtained results showed that reducing the applied strain amplitude favored an increase in the mechanical strength of the steel. Finally, it was graphically observed that an increase in the strain rate was responsible for the elevation of the material's mechanical strength.

Keywords: AISI 430 type H steel, ferritic stainless steel, cyclic shear, Bauschinger effect, strain rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1– Diagrama de equilíbrio de fases Fe-Cr.....	13
Figura 3.2 – Componentes de aço inoxidável ferrítico em sistema de exaustão automotivo...	14
Figura 3.3 – Helicoide de aço inoxidável ferrítico AISI 410.....	14
Figura 3.4 – Representação de diferentes rotas de deformação para processo incremental de conformação de chapas.....	16
Figura 3.5 – Deformação plástica efetiva na borda da chapa sob diferentes trajetórias de deformação.....	17
Figura 3.6 – Curva limite de conformação para amostras soldadas.....	18
Figura 3.7 – Representação esquemática do efeito Bauschinger.....	19
Figura 3.8 – Dependência da taxa de deformação dos aços inoxidáveis 439HP e 409HP.....	22
Figura 3.9 – Comportamento típico do fluxo de tensão para o aço 318LN sob diferentes taxas de deformação a temperatura ambiente.....	23
Figura 4.1 – Fluxograma do experimento.....	25
Figura 4.2 – Lixadeira Arotec.....	26
Figura 4.3 – Microscópio óptico Fortel.....	26
Figura 4.4 – Microdurômetro Shimadzu.....	27
Figura 4.5 – Máquina universal de ensaios Instron 5982 com garra de cisalhamento adaptada.....	28
Figura 4.6 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento planar.....	28
Figura 4.7 – Comparativo entre curvas de tração e dados de cisalhamento de um aço baixo teor de carbono.....	30
Figura 4.8 – Esquema de curva tensão-deformação efetiva para ensaio de cisalhamento cíclico.....	30
Figura 5.1 – Micrografia do aço AISI 430 tipo H.....	32
Figura 5.2 – Gráfico tensão-deformação efetiva do aço 430 tipo H.....	33
Figura 5.3 – Curvas carga-deformação efetiva para ensaio de cisalhamento cíclico em amplitudes de deformação de 0,98 e 0,63.....	34
Figura 5.4 – Curva tensão-deformação efetiva para ensaio de cisalhamento a amplitude de deformação de 0,98.....	34
Figura 5.5 – Curva tensão-deformação efetiva para ensaio de cisalhamento a amplitude de deformação de 0,63.....	35

Figura 5.6 – Curva tensão-deformação efetiva para mudança na taxa de deformação de 0,001/s para 0,003/s em aço AISI 430 tipo H.....	37
Figura 5.7 – Curvas de carregamento cíclico do aço A-36 sob diferentes taxas de deformação	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química aço AISI 430.....	24
Tabela 2 – Dureza Vickers do aço AISI 430 tipo H.....	32
Tabela 3 – Resultado do ensaio de cisalhamento para amplitude de deformação de 0,98 e 0,63	35
Tabela 4 – Valor médio de acréscimo de tensão para mudança da taxa de deformação de 0,001/s para 0,003/s.....	37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo Geral.....	11
2.2 Objetivos Específicos.....	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 Aços inoxidáveis.....	12
3.2 Trajetória de deformação.....	15
3.3 Efeito Bauschinger.....	18
3.4 Taxa de Deformação.....	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1 Materiais.....	24
4.2 Procedimento Experimental.....	24
4.2.1 Microscopia óptica.....	25
4.2.2 Microdureza Vickers.....	26
4.2.3 Ensaio de cisalhamento.....	27
4.2.3.1 Cisalhamento monotônico.....	29
4.2.3.2 Cisalhamento Cíclico.....	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
5.1 Caracterização Microestrutural.....	32
5.2 Caracterização Mecânica.....	32
5.3 Rotas de Carregamento.....	33
5.3.1 Cisalhamento reverso.....	33
5.3.2 Cisalhamento com mudança na taxa de deformação.....	36
6 CONCLUSÕES.....	39
REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são ligas ferro-carbono que apresentam teores de cromo superiores a 10,5% (em peso), sendo que a presença característica desse elemento confere a esses materiais elevada resistência a processos corrosivos. Além desse, os aços inoxidáveis podem conter traços marcantes de diversos outros elementos como níquel, silício, molibdênio, manganês, cobre, vanádio, titânio, enxofre, selênio, nióbio e nitrogênio, que são adicionados às ligas conforme as necessidades atribuídas ao produto desejado. Assim, a seleção de um aço inoxidável para uma aplicação pode ser influenciada por diversos fatores, podendo considerar o perfil de comportamento mecânico da liga em faixas específicas de temperatura, sua conformabilidade, os diferentes níveis de resistência à corrosão, a disponibilidade de mercado e os custos finais de produção (ASM INTERNATIONAL, 1990; APERAM, 2020b).

Visto isso, os aços inoxidáveis ferríticos despontam como uma opção economicamente interessante na indústria moderna, tornando-os uma escolha popular em diferentes setores de fabricação, que vão desde segmentos como o automobilístico e de construção civil, até constituintes da chamada linha branca e utensílios domésticos (APERAM, 2020c).

Considerando esta vasta gama de aplicações e a diversidade de formas e configurações incorporadas pelo aço, têm-se a importância da compreensão das vias a partir das quais as deformações vigentes afetam o desempenho deste material. Em função disso, diferentes testes podem ser aplicados como ferramentas de análise do impacto das etapas de processamento mecânico nas características de um material. Dessa forma ensaios como os de cisalhamento planar simples são capazes de fornecer sequências de carregamento eficazes para a avaliação da influência da trajetória de deformação no comportamento de um metal submetido a deformações diversas (DIETER, 1981; LOPES, 2006).

Assim, a pretensão do trabalho a seguir é a investigação do comportamento mecânico de um aço AISI 430 por meio da imposição de carregamento cíclico e deformação plástica sob mudança na taxa de deformação, de modo a simular as condições experimentadas pelo material durante as operações de conformação mecânica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento mecânico do aço AISI 430 tipo H, sob carregamento cíclico e após mudança na taxa de deformação.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Investigar a ocorrência do efeito Bauschinger sob carregamento cíclico;
- b) Analisar os impactos da variação da taxa de deformação na resistência mecânica do aço AISI 430;
- c) Avaliar o comportamento mecânico do aço submetido a cisalhamento cíclico com variação da amplitude de deformação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

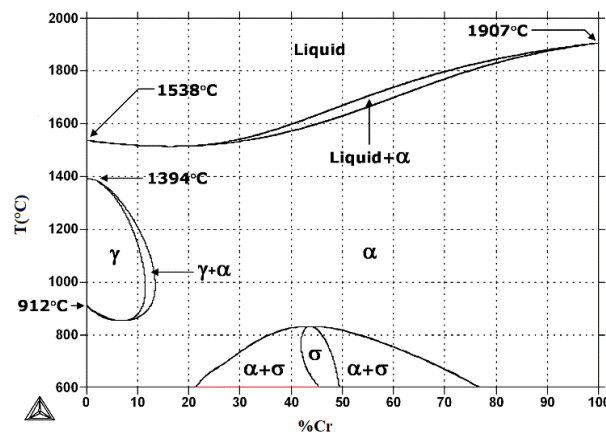
3.1 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas à base de ferro e carbono caracterizadas pela presença do elemento cromo em teores superiores a 10,5% (em peso), sendo esse o principal responsável pela elevada resistência desses metais contra corrosão. Este comportamento, encontrado também nos metais nobres que apresentam baixa reatividade com o meio, é verificado nestes aços em função da ocorrência do fenômeno de passivação, onde há a formação de uma película composta por óxidos provenientes da interação do cromo presente no aço com o oxigênio disperso no meio (ASM INTERNATIONAL, 1990).

Além do cromo, os aços inoxidáveis podem conter diversos elementos, como níquel, silício, molibdênio, manganês, cobre, vanádio, titânio, enxofre, selênio, nióbio e nitrogênio, a depender das características desejadas para o metal. Dessa forma, a escolha de um aço inoxidável dentro de um segmento pode basear-se em múltiplos fatores além de sua resistência a corrosão, como por exemplo, sua conformabilidade, o perfil de comportamento mecânico da liga em diferentes faixas de temperatura, sua disponibilidade de mercado e seus custos finais de produção (APERAM, 2020b; CHIAVERINI, 2015).

Em geral, essas ligas são classificadas sumariamente em três categorias principais segundo sua microestrutura individual à temperatura ambiente. Assim, os aços inoxidáveis podem ser ferríticos, austeníticos ou martensíticos. Além dessas, existem duas outras categorias bastante difundidas dentro dos aços inoxidáveis, as ligas duplex, compostas por porções mistas de ferrita e de austenita, e os aços endurecidos por precipitação, que possuem alta resistência mecânica devido à presença de elementos incorporados por precipitação (CHIAVERINI, 2015).

Os aços inoxidáveis ferríticos têm o cromo como elemento de liga predominante, além de teores de carbono inferiores a 0,20%, o que dificulta a austenitização do aço, comprometendo o endurecimento desse material por têmpera, conforme observado na Figura 3.1. As porcentagens de cromo desses aços variam entre 10,5% a 30% (em peso), podendo possuir ainda outros elementos, como titânio e nióbio (CHIAVERINI, 2015).

Figura 3.1– Diagrama de equilíbrio de fases Fe-Cr

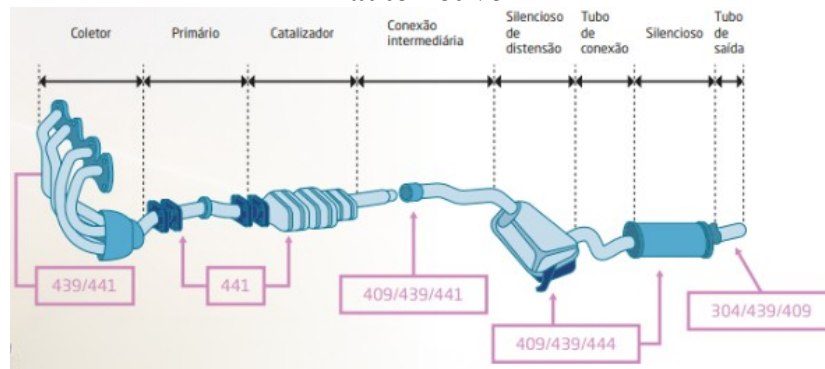
Fonte: Adaptado de COLPAERT, 2008.

Essas ligas metálicas apresentam estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), sendo ferromagnéticas, possuem baixa tenacidade para trabalho a frio se comparadas aos aços austeníticos, assim como resistência mecânica relativamente baixa em aplicações sob temperaturas elevadas. Além disso, os processos de conformação a temperatura ambiente não promovem alterações na estrutura cristalina dos aços inoxidáveis ferríticos, de maneira que parte de sua conformabilidade fica dependente da dinâmica de deformação de sua textura cristalográfica quando submetida a esforços mecânicos (LOPES, 2009).

Em geral, o aço inoxidável ferrítico é uma escolha popular dentro de diversos setores industriais, sendo amplamente difundido em segmentos como o automobilístico, de construção civil e dentro da chamada linha branca, que comporta componentes, equipamentos e utensílios domésticos (APERAM, 2020c). Alguns exemplos de aplicações são:

1. **Componentes para sistemas de exaustão de motores:** o aço inoxidável ferrítico é amplamente utilizado em componentes para sistemas de exaustão de motores, como tubos e coletores de escape, conforme apresentado na Figura 3.2, devido à sua alta resistência à corrosão em ambientes quentes e úmidos (ASM INTERNATIONAL, 1990).

Figura 3.2 – Componentes de aço inoxidável ferrítico em sistema de exaustão automotivo



Fonte: Adaptado de APERAM, 2018.

2. Aplicações arquitetônicas: é utilizado em aplicações arquitetônicas, como fachadas de edifícios e elementos de decoração, devido à sua alta resistência à corrosão e apelo estético (ASM INTERNATIONAL, 1990).

3. Equipamentos para processamento de alimentos: o aço inoxidável ferrítico é frequentemente utilizado em equipamentos para processamento de alimentos, como tanques de armazenamento, tubulações e peças para máquinas de processamento, devido à sua performance anticorrosiva em ambientes ácidos e alcalinos. Na Figura 3.3 é apresentado um helicóide, elemento de máquina amplamente aplicado na indústria alimentícia para a movimentação de grânéis, em aço inoxidável ferrítico AISI 410 (ASM INTERNATIONAL, 1990).

Figura 3.3 – Helicóide de aço inoxidável ferrítico AISI 410



Fonte: Adaptado de APERAM, 2020a.

4. Peças para equipamentos de produção de energia: o aço inoxidável ferrítico é usado na fabricação de equipamentos constituintes de sistemas de produção de

energia, tais como trocadores de calor, tubulações e componentes para turbinas a vapor, em função da sua alta resistência à corrosão e oxidação em altas temperaturas (ASM INTERNATIONAL, 1990).

3.2 Trajetória de deformação

De forma geral, operações de conformação mecânica podem ser descritas como a alteração da forma de uma peça por meio da deformação plástica de sua estrutura. Essa deformação pode ser compreendida como o movimento de discordâncias no interior do material em resposta à aplicação de um esforço mecânico externo. A relação entre essa movimentação e o comportamento mecânico dos metais é fundamental para a compreensão dos mecanismos que regem o desenvolvimento das propriedades de um metal (DIETER, 1981).

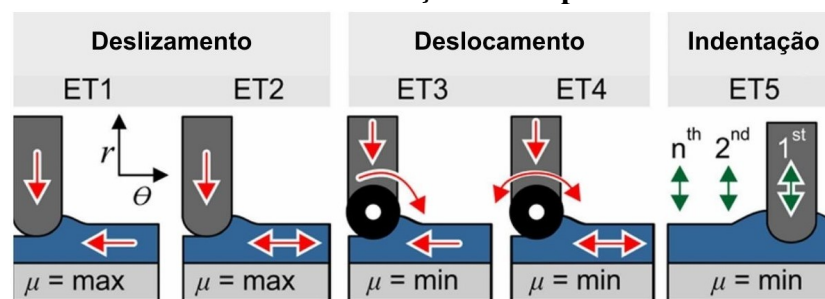
Dado que a deformação plástica macroscópica representa a movimentação generalizada de um grande número de discordâncias, tem-se que seu desenvolvimento depende da liberdade com que esse sistema se desloca, visto que cada grão tende a locomover-se por uma orientação preferencial. Sendo assim, a conformação de um metal é amplamente influenciada pelos graus de mobilidade de suas discordâncias, afetando propriedades como dureza e resistência mecânica do material, por exemplo (BRESCIANI FILHO, 2011).

O fenômeno de encruamento ocorre devido às interações entre as discordâncias e seus respectivos campos de deformação. Com a deformação plástica, a densidade de discordâncias no metal tende a aumentar, reduzindo a distância entre elas, o que intensifica suas interações repulsivas e dificulta seu movimento. Consequentemente, à medida que a densidade de discordâncias cresce, a resistência ao seu deslocamento também aumenta, exigindo uma tensão maior para continuar a deformação do material (CALLISTER, 2016).

Dessa forma, considerando que a conformação de um material envolve uma série de carregamentos distintos, têm-se o conceito de trajetória de deformação, como o conjunto das diferentes vias a partir das quais um material pode ser deformado plasticamente, envolvendo a combinação de tensões e deformações experimentadas durante a aplicação de uma carga (LOPES, 2009).

Muitas pesquisas se dispõem a investigar as implicações da alteração de trajetória de deformação no comportamento mecânico de um material. Wernicke et al. (2020) avaliaram os impactos de diferentes caminhos de deformação na capacidade de suportar carregamento resultante de engrenagens fabricadas por meio do processo incremental de conformação de chapas e metais maciços (ISBMF). Para isso cinco trajetórias de deformação distintas foram consideradas, conforme representado na Figura 3.4. Inicialmente uma ferramenta circular não rotativa realizou movimentos contínuos penetrando radialmente na peça de trabalho, que poderia deslocar-se unidirecionalmente (ET1) ou sofrer mudanças na sua direção após cada giro (ET2). No segundo conjunto de ensaios as mesmas diretrizes de operação foram aplicadas, contudo a ferramenta de conformação utilizada possuía a extremidade com rotação livre, podendo deslocar-se tanto unidirecionalmente (ET3), quanto alternadamente (ET4). Por fim, no quinto teste foi aplicada uma ferramenta de conformação que penetrava a chapa promovendo fluxo de material no entorno do dispositivo de indentação imediatamente após cada revolução da amostra.

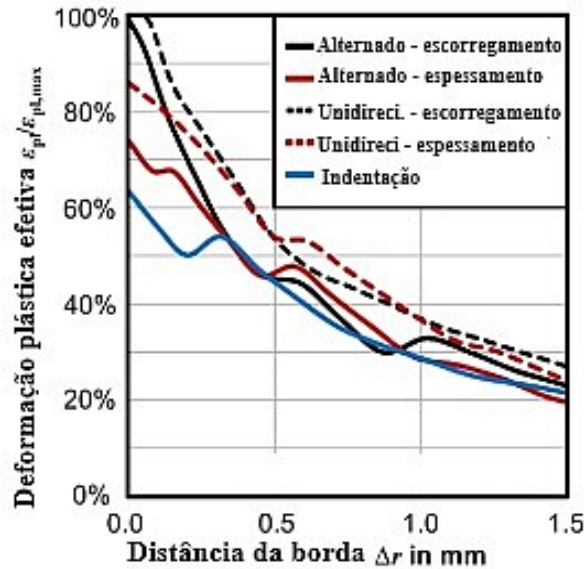
Figura 3.4 – Representação de diferentes rotas de deformação para processo incremental de conformação de chapas



Fonte: Adaptado de WERNICKE et al., 2020.

Os resultados dos ensaios de capacidade de carga apontaram uma redução da capacidade de carga de 8-20% entre as técnicas de deslizamento alternado e deslocamento alternado. Na Figura 3.5, pode-se observar o impacto das diferentes estratégias de processo sobre a relação entre a deformação plástica efetiva $\epsilon_{\text{efetiva}}$ e a máxima deformação plástica efetiva $\epsilon_{\text{efetiva,max}}$ observada.

Figura 3.5 – Deformação plástica efetiva na borda da chapa sob diferentes trajetórias de deformação



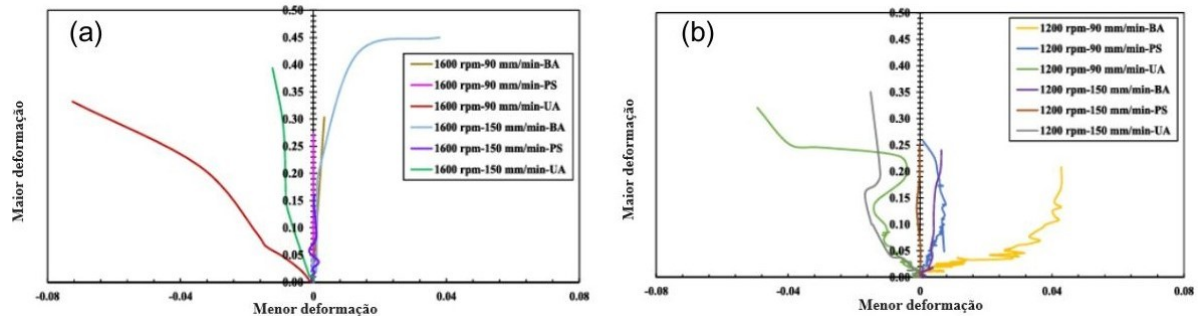
Fonte: Adaptado de WERNICKE et al., 2020.

Com isso, torna-se viável a seleção de um procedimento de espessamento de borda com até 38% de redução de deformação plástica efetiva. Para o aço DC04, utilizado no estudo, essa redução resultou em uma diminuição de cerca de $\Delta\sigma_f=6\%$ no encruamento do material. Assim, considerando os processos subsequentes de conformação de engrenagens, têm-se que a indentação de uma chapa com menores níveis de encruamento promove um alívio de carga na ferramenta, o que por consequência prolonga sua vida útil. Por outro lado, a opção por rotas de espessamento de borda que gerem maior deformação plástica efetiva permite a fabricação de engrenagens com maiores resistências ao desgaste, visto o acréscimo na dureza superficial (WERNICKE et al., 2020).

Datta e Bhargava (2024) examinaram o desenvolvimento da textura devido ao cisalhamento e a análise microestrutural de chapas AA5754 soldadas por fricção durante a conformação em diferentes caminhos de deformação, utilizando quatro combinações de velocidades de rotação e de avanço. Foram testados três diferentes caminhos de deformação: uniaxial, plano e biaxial.

Os experimentos de conformação por estiramento do material base nos caminhos de deformação uniaxial, plana e biaxial resultaram em limites de deformação de 40%, 35% e 40%, respectivamente. A Figura 3.6 apresenta as curvas de deformação obtidas para amostras soldadas a 1200 rpm (à esquerda) e 1600 rpm (à direita) para as velocidades de avanço de 90 mm/min e 150 mm/min (DATTA; BHARGAVA, 2024).

Figura 3.6 – Curva limite de conformação para amostras soldadas



(a) Curva limite de conformação para amostras testadas a 1600 rpm e (b) Curva limite de conformação para amostras testadas a 1200 rpm

Fonte: Adaptado de DATTA; BHARGAVA, 2024.

Para as amostras testadas a 1200 rpm observou-se uma redução nas maiores deformações registradas do caminho uniaxial para o plano e, em seguida, para o biaxial em ambas as combinações de avanço, ressaltando também que para esse último caminho de deformação, os espécimes soldados apresentaram valores de deformação significativamente menores (4%) em comparação ao obtido para o material base (28%). Já para as peças soldadas a 1600 rpm, verificou-se a baixa taxa de avanço o caminho uniaxial apresentou melhor conformabilidade, já a alta taxa as menores deformações máximas foram alcançadas no caminho plano (DATTA; BHARGAVA, 2024).

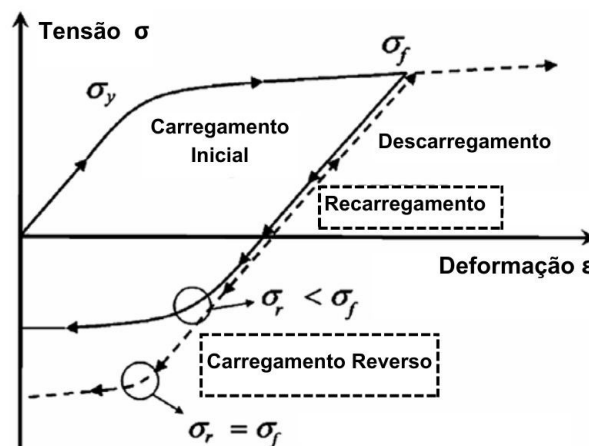
Verificou-se ainda que as deformações efetivas foram menores para o espécime soldado deformado com a combinação de 1200 rpm e 150 mm/min, enquanto a deformação efetiva máxima foi obtida no material base deformado, ambos nas trajetórias de deformação biaxial.

3.3 Efeito Bauschinger

A abordagem mais direta para a alteração da trajetória de deformação de um material é o chamado teste de Bauschinger, o qual baseia-se na simples inversão do sentido de deformação aplicado em um carregamento. Conforme apresentado na Figura 3.7, dada a aplicação de uma carga trativa seguida por uma força compressiva de mesmo módulo, nota-se a redução do limite de escoamento do material em relação ao comportamento esperado, onde σ_f indica a tensão de carga máxima no sentido direto, σ_y a tensão de escoamento no mesmo

sentido e σ_r a tensão de escoamento no início do fluxo plástico reverso. A essa redução na tensão de escoamento durante a inversão do sentido de deformação dá-se o nome de efeito Bauschinger (MAMUN et al., 2017; XIANG; VLASSAK, 2005).

Figura 3.7 – Representação esquemática do efeito Bauschinger



Fonte: Adaptado de XIANG; VLASSAK, 2005.

O efeito Bauschinger possui importância prática no que diz respeito a compreensão do desempenho de uma peça metálica fabricada, já que promove variações no limite elástico do material em ciclo reverso. Assim, a estrutura pode sofrer com perdas de resistência significativas caso suas tensões de trabalho aplicadas possuam direção inversa a sua tensão de fabricação, por exemplo. Por outra perspectiva, um bom entendimento das origens físicas do efeito Bauschinger também pode contribuir para melhoras no desenvolvimento de teorias de plasticidades mais refinadas, de forma a possibilitar a obtenção de materiais com comportamento mecânico superior (HAN et al., 2005).

Considerando a teoria mecânica dos meios contínuos, o efeito Bauschinger pode ser descrito em termos das tensões reversas, geradas pela deformação heterogênea no material, enquanto a análise estrutural é baseada nas estruturas e interações das discordâncias umas com as outras e com precipitados durante os carregamentos direto e reverso (MAMUN et al., 2017).

Partindo de uma estrutura de trabalho a frio, existem dois tipos de mecanismos que geralmente são utilizados para explicar o efeito Bauschinger. O primeiro, apresenta a origem física do fenômeno em termos de efeitos de longo alcance como as tensões internas devido às interações das discordâncias, o acúmulo das discordâncias nos contornos de grão ou com a

teoria do contorno das discordâncias (*loop*) de Orowan ao redor de precipitados. Essas tensões de retorno presentes no material contribuem para a movimentação das discordâncias na direção inversa reduzindo assim sua resistência ao escoamento. O segundo mecanismo por sua vez foca em efeitos de curto alcance como a direcionalidade das discordâncias móveis e à sua resistência ao movimento ou aniquilação de outras discordâncias durante a deformação reversa, já que discordâncias de sinal oposto podem ser produzidas, atrair-se e se anularem. Dado que o encruamento se relaciona diretamente com o aumento da densidade de discordâncias, o resultado da diminuição do número de discordâncias é a redução da resistência ao escoamento quando a direção de deformação é invertida (HAN et al., 2005).

Existem formas distintas de quantificação da magnitude do efeito Bauschinger, uma delas é através do chamado valor de deformação de Bauschinger (β), que representa a diferença registrada entre duas curvas consecutivas de tensão-deformação efetiva para um determinado valor de tensão representativo. Visto isso, esse parâmetro pode ser obtido em etapas consecutivas a partir da subtração dos valores de deformação efetiva considerando um mesmo valor de tensão, como demonstrado na Equação 1.

$$\beta = \varepsilon_{Direto} - \varepsilon_{Reverso} \quad (1)$$

Onde:

β = deformação de Bauschinger;

ε_{Direto} = deformação efetiva de cisalhamento durante a etapa de carregamento direto;

$\varepsilon_{Reverso}$ = deformação efetiva de cisalhamento durante a etapa no carregamento inverso

Outros meios amplamente utilizados são o parâmetro de tensão de Bauschinger (BSP), o parâmetro de energia de Bauschinger (BEP) e o cálculo de $\Delta\sigma$. O BSP trata-se de uma medida que compreende a quantidade de tensão de retorno exercida nas discordâncias pelas partículas na matriz, sendo descrita conforme a Equação 2, onde σ_f é a tensão de pré-deformação direta, e σ_r representa a tensão de reversão (JORDON, 2007).

$$BSP = \frac{|\sigma_f| - |\sigma_r|}{|\sigma_r|} \quad (2)$$

O BEP, por sua vez, é usado como medida dos níveis de anisotropia do material no decorrer do ciclo de escoamento reverso, sendo uma ferramenta eficaz para a representação da relação entre o encruamento cinemático e isotrópico durante a deformação do material. Já o valor de $\Delta\sigma$ representa a diferença entre a tensão máxima de cisalhamento e o limite de escoamento registrado durante o cisalhamento reverso. O BEP e $\Delta\sigma$, são expressos pelas Equações 3 e 4 respectivamente, onde σ_y é a tensão de escoamento futura (JORDON, 2007).

$$BEP = \frac{1}{2} \frac{|\sigma_f| - |\sigma_r|}{|\sigma_f| - |\sigma_y|} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_f - \sigma_y \quad (4)$$

3.4 Taxa de Deformação

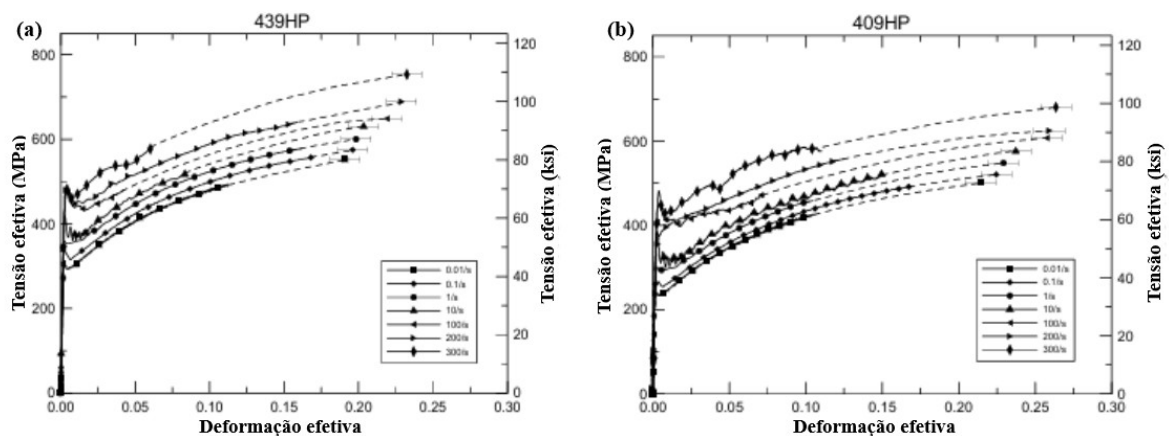
De modo geral, as propriedades de escoamento e falha de grande parte dos metais é influenciada diretamente pela taxa de deformação aplicada durante seu processamento. Em especial para processos de conformação de alta velocidade, tanto as tensões de fluxo plástico quanto a ductilidade apresentada pelo material são afetadas pela variação da taxa com a qual o metal é deformado. Dessa forma, o estudo do comportamento do material sob taxas de deformação dinâmicas é imprescindível, principalmente para peças suscetíveis a impactos mecânicos (VERLEYSSEN, 2011; KRÜGER et al., 2014).

Visto isso, estruturas cristalinas puras de face centrada (CFC) e estruturas cristalinas de corpo centrado (CCC) tendem a reagir de forma diferente à variação da taxa de deformação e à temperatura. Materiais com estruturas CFC mostram apenas uma ligeira influência da taxa de deformação e da temperatura na tensão de escoamento, mas o comportamento de encruamento sofre alteração. Já a tensão de escoamento das estruturas do tipo CCC se mostra mais sensível à taxa de deformação e à temperatura, com praticamente o mesmo comportamento de encruamento (KRÜGER et al., 2014).

Clarke et al. (2003) conduziu experimentos a fim de examinar os efeitos da taxa de deformação nas propriedades mecânicas e de conformação de cinco aços inoxidáveis ferríticos diferentes. Para isso, realizou ensaios de tração com amostras padrão em diferentes taxas de deformação que variaram de 100/s a 300/s. A Figura 3.8 (a) e (b) apresenta as curvas

tensão-deformação obtidas para os aços 409HP e 439HP, onde é possível notar que o aumento da taxa de deformação promoveu elevação do limite de escoamento, da tensão de fluxo e da instabilidade de tensão da liga. Além disso, foram registradas reduções nos valores de alongamento uniforme, pós-uniforme e total, sendo sua variação um produto dos efeitos concorrentes de sensibilidade à taxa de deformação das alterações de temperatura da amostra durante o ensaio.

Figura 3.8 – Dependência da taxa de deformação dos aços inoxidáveis 439HP e 409HP

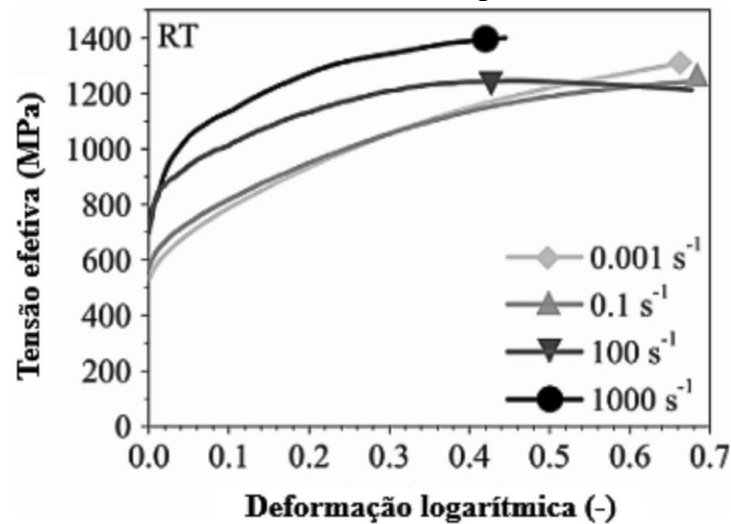


(a) Curva tensão-deformação efetiva do aço AISI 439H e (b) Curva tensão-deformação efetiva do aço AISI 409H

Fonte: Adaptado de CLARKE et al, 2003

Em seu estudo sobre o comportamento de um aço inoxidável duplex AISI 318LN sob diferentes taxas de deformação e temperaturas de ensaio, Krüger et al. (2014) encontrou resultados semelhantes. Em seu experimento, as amostras foram submetidas a um carregamento compressivo para taxas de deformação que variaram entre 0,001/s a 1000/s. As tensões de fluxo apresentados na Figura 3.9 apontam para uma significativa dependência do material a taxa de deformação imposta, de modo que a tensão de escoamento e de fluxo crescem a medida que a taxa de deformação aumenta.

Figura 3.9 – Comportamento típico do fluxo de tensão para o aço 318LN sob diferentes taxas de deformação a temperatura ambiente



Fonte: Adaptado de KRÜGER et al., 2014

Além disso, outra característica a se observar é a mudança na configuração da curva para as diferentes condições de teste. Todas as curvas são marcadas por um endurecimento significativo, contudo a taxa de encruamento mais elevada foi observada para o carregamento sob a taxa de 0,001/s. Observou-se que para baixas deformações, o encruamento cresce em maiores proporções e tende a diminuir com o aumento da deformação. Para deformações mais altas, onde os efeitos de amolecimento são maiores, a elevada taxa de deformação é acompanhada por uma conversão de energia em calor, se mostrando já significativa a partir de taxas superiores a 0,1/s.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Este trabalho fez uso de chapas de aço inoxidável AISI 430 tipo H com espessura de 0,6 mm. Na Tabela 1 é apresentada a indicação dos principais elementos químicos presentes na composição das chapas obtidas por meio de espectroscopia de emissão óptica.

Tabela 1 – Composição química aço AISI 430

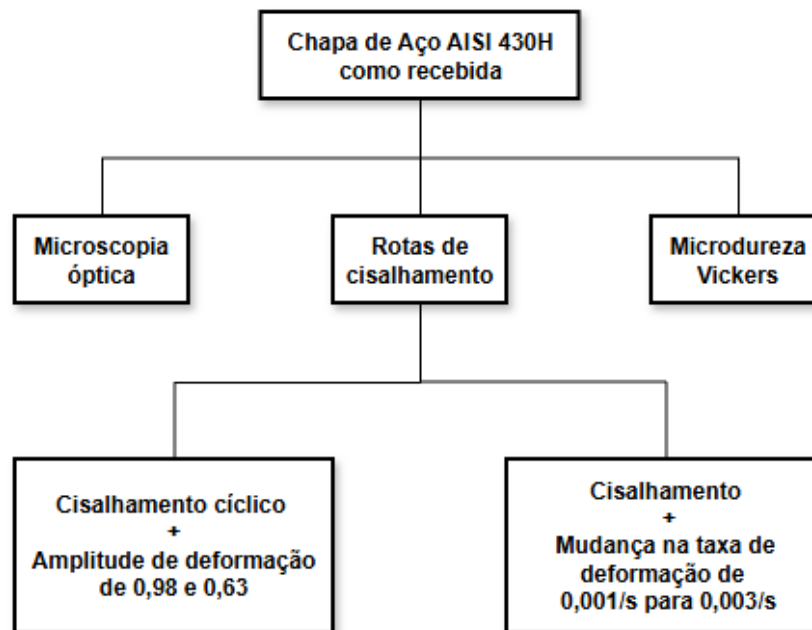
Elemento	Teores (%)
C	0,02
Mn	0,26
Si	0,50
P	0,03
S	0,00
Cr	16,26
Ni	0,18
Mo	0,02
Al	0,00
Cu	0,06
Co	0,02
V	0,02
Nb	0,08
Ti	0,11

Fonte: Próprio autor

4.2 Procedimento Experimental

A parte procedimental aplicada durante o estudo encontra-se esquematizada por meio de fluxograma apresentado na Figura 4.1, sendo composta por uma investigação do comportamento mecânico do aço AISI 430 tipo H a partir de ensaios de tração, microdureza Vickers e de cisalhamento planar a partir de diferentes rotas de carregamento.

Figura 4.1 – Fluxograma do experimento



Fonte: Próprio autor

4.2.1 Microscopia óptica

A realização da análise microscópica requereu a preparação prévia da amostra de aço, com o auxílio de uma cortadora metalográfica Arotec do modelo Arocor 80, foi seccionada em formas regulares quadradas com 10 mm de lado. Em seguida, as peças foram submetidas ao processo de embutimento a frio a partir deacrílico autopolimerizável. Posteriormente, a preparação metalográfica seguiu-se com as etapas de lixamento e polimento mecânicos. No primeiro caso, foram utilizadas lixadeiras Arotec modelo Aropol-2V, indicada na Figura 4.2, com lixas de granulometrias variáveis na seguinte ordem: #240, #320, #400 e #600. Já o polimento se fez em politrizes da mesma marca utilizando pasta de diamante com particulado de 9 e 3µm.

Figura 4.2 – Lixadeira Arotec



Fonte: Próprio autor

As imagens do aço inoxidável AISI 430 tipo H foram obtidas após o ataque com reativo químico Vilella em um microscópio óptico da marca Fortel, modelo 1M713, apresentado na Figura 4.3. A análise foi realizada pelo método do intercepto médio, conforme a norma ASTM E112-24.

Figura 4.3 – Microscópio óptico Fortel

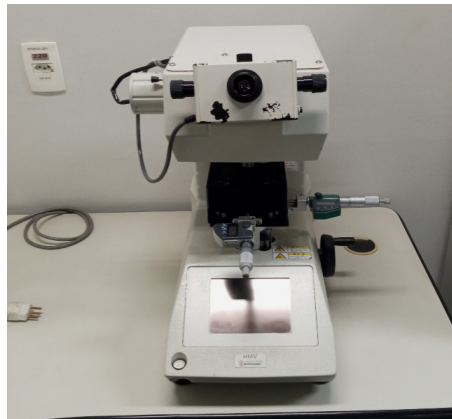


Fonte: Próprio autor

4.2.2 Microdureza Vickers

A caracterização mecânica do aço AISI 430 tipo H ocorreu por meio da realização de ensaios de microdureza Vickers conduzidos em amostras em estado como recebido. Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados utilizando um microdurômetro digital da marca Shimadzu, modelo HMV2T, representado na Figura 4.4. A carga aplicada durante os testes foi de 200 gf, com um tempo de aplicação de 15 segundos e um total de doze (12) indentações na amostra, realizadas ao longo do eixo longitudinal da chapa, sendo todas elas com espaçamento de 0,2 mm entre si.

Figura 4.4 – Microdurômetro Shimadzu

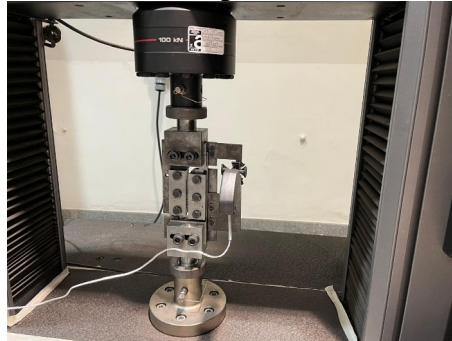


Fonte: Próprio autor

4.2.3 Ensaio de cisalhamento

O desenvolvimento dos testes de cisalhamento da chapa de aço AISI 4030 tipo H foram possíveis por meio da adaptação de garra de cisalhamento a uma máquina universal de ensaios Instron 5982, conforme apresentada na Figura 4.5. Para o experimento foi utilizado um sistema de captação de dados Bluehill 3 juntamente a um extensômetro mecânico, com abertura máxima de 25 mm, também da marca Instron.

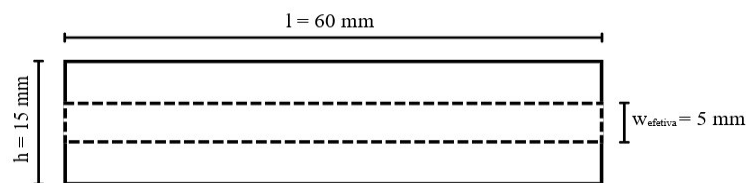
Figura 4.5 – Máquina universal de ensaios Instron 5982 com garra de cisalhamento adaptada



Fonte: Próprio autor

Os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento foram produzidos via corte por guilhotina, sendo o equipamento utilizado da marca Newton e modelo TM 10e. As dimensões dos CP's aplicados no ensaio foram de 60 mm de comprimento (l), 15 mm de largura (h), 1 mm (t) de espessura e 5 mm de largura efetiva cisalhada (W_{efetiva}), conforme esquematizado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento planar



Fonte: Próprio autor

A relação entre as medidas foi estabelecida com o intuito de garantir a homogeneidade na distribuição de deformação plástica ao longo das amostras testadas. Para isso, segundo Rauch (1992), Rauch (2002) e Barlat et al. (2003), algumas restrições geométricas deveriam ser incorporadas as dimensões dos CP's, dentre as quais a de que a razão entre o comprimento e a largura efetiva submetida ao cisalhamento da peça deve exceder dez ($l / W_{\text{efetiva}} > 10$). Além dessa, outra restrição propõe que a proporção entre a largura efetiva e a espessura da chapa seja inferior a dez vezes ($W_{\text{efetiva}} / t < 10$). Assim, uma vez que $l = 60$ mm, $W_{\text{efetiva}} = 5$ e $t = 1$, tem-se que as dimensões adotadas para os CP's atenderam aos pré-requisitos impostos pelos autores.

4.2.3.1 Cisalhamento monotônico

A aplicação do ensaio de cisalhamento monotônico foi acompanhada da variação da velocidade de deslocamento do travessão da máquina de 3,6 mm/min para 7,2 mm/min, ao mudar a taxa de deformação de 0,001/s para 0,003/s, respectivamente.

Com o auxílio do software Image ProPlus 6.0 foi feita a medição da deformação cisalhante real (γ) sofrida pelos corpos de prova, a partir da razão entre o deslocamento da garra de cisalhamento (ΔL) e a largura efetiva cisalhada do corpo de prova ($W_{efetiva}$), como mostrado na Equação 5.

$$\gamma = \frac{\Delta L}{W_{efetiva}} \quad (5)$$

A tensão cisalhante (τ) foi obtida a partir da divisão da carga (P) aplicada e a área cisalhada, ou seja, a multiplicação entre a espessura (t) do corpo de prova e seu comprimento (l), conforme demonstrado pela Equação 6.

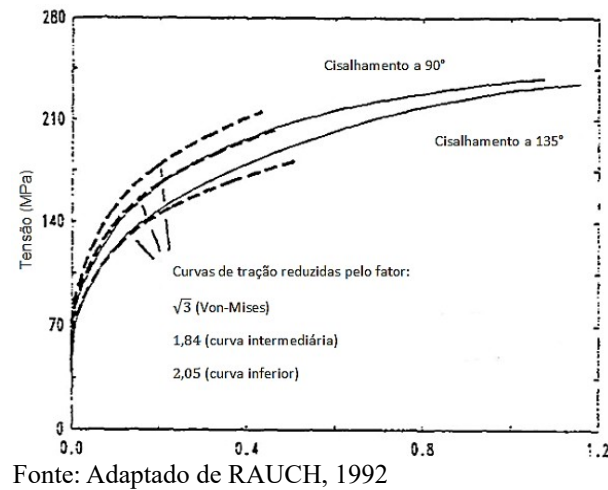
$$\tau = \frac{P}{l * t} \quad (6)$$

O cálculo da tensão efetiva ($\sigma_{efetiva}$) e deformação efetiva ($\epsilon_{efetiva}$), expresso nas Equações 7 e 8, levou em consideração o coeficiente de Taylor, que conforme apresentado por Rauch (1992) foi o critério de escoamento que promoveu a melhor correção da curva de tensão deformação verdadeira para o cisalhamento a 90°, como verificado na Figura 4.7.

$$\sigma_{efetiva} = \tau * 1,84 \quad (7)$$

$$\epsilon_{efetiva} = \frac{\gamma}{1,84} \quad (8)$$

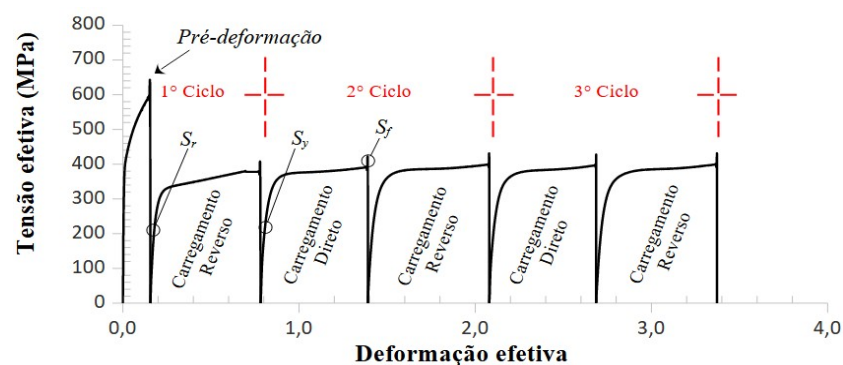
Figura 4.7 – Comparativo entre curvas de tração e dados de cisalhamento de um aço baixo teor de carbono



4.2.3.2 Cisalhamento Cíclico

Os carregamentos cíclicos realizados durante os testes foram compostos por uma pré deformação efetiva de 0,15 (15%) seguido por uma inversão da direção de carga e por dois ciclos de cisalhamento direto/reverso. Na Figura 4.8 é apresentado um gráfico de tensão-deformação efetiva que simula essa aplicação de cisalhamentos alternados, com destaque para a região de pré-deformação do aço dentro do primeiro ciclo e para os pontos de tensão máxima, S_f , e de escoamento, S_y , de um carregamento direto. Além desses, o ponto S_r caracteriza o valor de tensão de escoamento registrado durante o ciclo de carregamento reverso.

Figura 4.8 – Esquema de curva tensão-deformação efetiva para ensaio de cisalhamento cíclico



Dessa forma, com o objetivo de propor diferentes abordagens na avaliação e verificação da ocorrência do efeito Bauschinger durante o experimento, foram utilizados os parâmetros de tensão (BSP) e de energia (BEP) de Bauschinger. O BSP está correlacionado à diminuição relativa na tensão de escoamento ao passar do carregamento direto para o reverso, enquanto o BEP refere-se à energia necessária durante a deformação reversa para atingir o nível de tensão do carregamento direto.

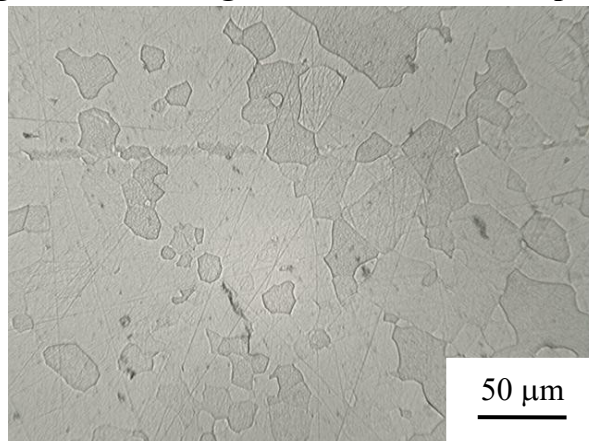
Além disso, o valor de $\Delta\sigma$ também foi considerado para fins de comparação e análise complementar. Para isso, a amplitude de deformação aplicada nos três ciclos foi de 0,98 na primeira bateria de ensaios e de 0,63 na segunda, ambas sob uma taxa de deformação de 0,001/s. Os valores de tensão de pré-deformação direta (σ_f), tensão de reversão (σ_r) e tensão de escoamento direta (σ_y) foram utilizados no cálculo dos parâmetros BSP, BEP e $\Delta\sigma$, realizados por meio das Equações 2, 3 e 4, respectivamente, conforme descrito no item 3.3.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Microestrutural

O valor do diâmetro de grão do aço, calculado pelo método do intercepto médio, conforme a norma ASTM E112-24, foi de 57,96 μm . A Figura 5.1 apresenta uma imagem obtida a partir do ensaio, na qual é possível observar a presença da fase ferrítica no aço inoxidável.

Figura 5.1 – Micrografia do aço AISI 430 tipo H



Fonte: Próprio autor

5.2 Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica do aço inoxidável ferrítico AISI 430 tipo H foi realizada por meio do ensaio de microdureza Vickers e de cisalhamento. O resultado de dureza Vickers do aço como recebido é apresentado na Tabela 2.

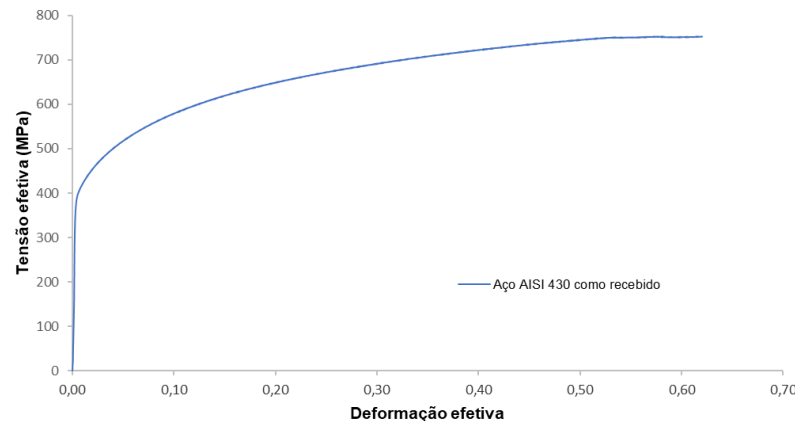
Tabela 2 – Dureza Vickers do aço AISI 430 tipo H

Condição do material	Dureza média (HV)
Como recebido	$173 \pm 5 \text{ HV}$

Fonte: Próprio autor

O gráfico de tensão-deformação efetiva do aço AISI 430 tipo H em cisalhamento monotônico, no estado como recebido, é representado pela Figura 5.2, sendo o ensaio de cisalhamento interrompido antes do ponto de corte da chapa. A tensão máxima encontrada no ensaio foi de 736 MPa e o valor do limite de escoamento do aço foi igual a 396 MPa.

Figura 5.2 – Gráfico tensão-deformação efetiva do aço 430 tipo H



Fonte: Própria autor

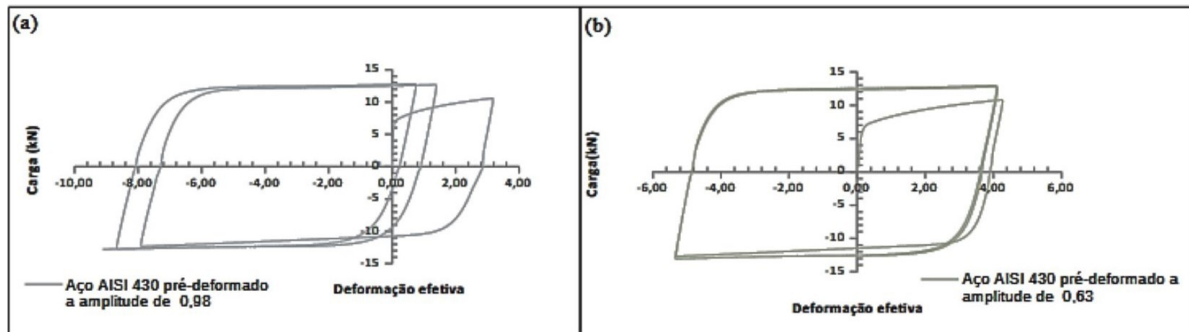
A caracterização mecânica em cisalhamento, ou seja, a obtenção da curva tensão-deformação cisalhante, seguida da conversão para tensão-deformação efetiva, foi realizada com o objetivo de servir como referência para identificar o efeito da mudança na taxa de deformação e no modo de deformação, considerando a aplicação do carregamento cíclico na resistência mecânica do aço.

5.3 Rotas de Carregamento

5.3.1 Cisalhamento reverso

Os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento são apresentados na Figura 5.3, sendo (a) o gráfico de carga-deformação efetiva para amplitude de 0,98 e (b) o gráfico obtido para a amplitude de 0,63. Dada essas representações é possível notar a tendência do material em endurecer conforme o aumento da deformação efetiva, uma vez que, após a aplicação do primeiro ciclo de deformações os ciclos de carregamento subsequentes tendem a se aproximar das curvas do primeiro ciclo visto o crescimento da deformação efetiva. Esse endurecimento gradativo ocorre devido ao encruamento cíclico sofrido pelo metal (SENRA et al., 2014).

Figura 5.3 – Curvas carga-deformação efetiva para ensaio de cisalhamento cíclico em amplitudes de deformação de 0,98 e 0,63

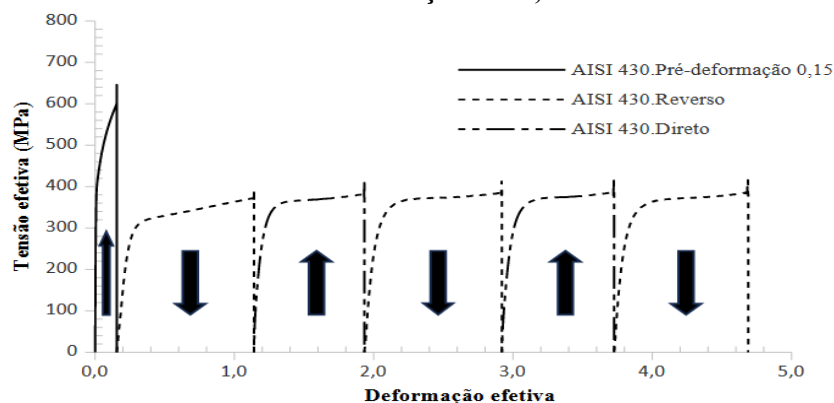


(a) Curva carga-deformação para amplitude de deformação de 0,98 e (b) Curva carga-deformação para amplitude de deformação de 0,63.

Fonte: Próprio autor.

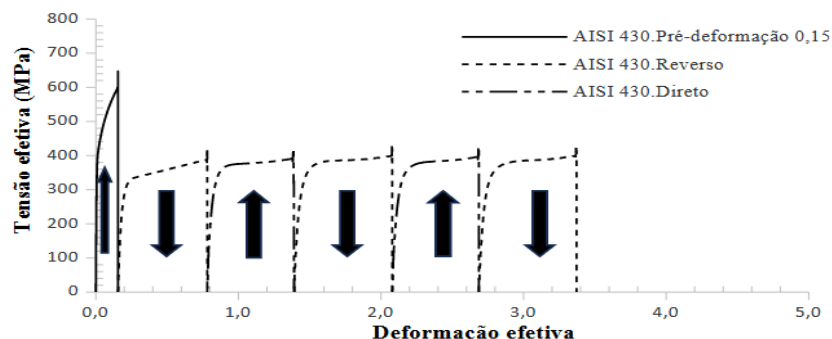
As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam os gráficos tensão-deformação efetiva obtidos a partir dos dados coletados durante o ensaio, sinalizando a ocorrência dos três ciclos de pares alternados de carga com o uso de setas representativas que indicam a mudança de direção de carregamento da amostra. Conforme observado por Han et al. (2005), durante a aplicação da deformação reversa, a resistência ao escoamento do material se mostrou inferior ao que se esperaria caso o material tivesse sido encruado de forma monotônica

Figura 5.4 – Curva tensão-deformação efetiva para ensaio de cisalhamento a amplitude de deformação de 0,98



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.5 – Curva tensão-deformação efetiva para ensaio de cisalhamento a amplitude de deformação de 0,63



Na Tabela 3 são apresentados os valores de tensão máxima obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento, considerando as amplitudes de 0,98 e 0,63. Tendo em vista esses resultados, foram considerados os parâmetros BSP e BEP a fim de atestar a ocorrência do efeito Bauschinger, e como complemento à análise, também foi calculado o valor de $\Delta\sigma$.

Tabela 3 – Resultado do ensaio de cisalhamento para amplitude de deformação de 0,98 e 0,63

Amplitude de deformação	Parâmetro	1º Ciclo	2º Ciclo	3º Ciclo
0,98	Tensão máxima carregamento direto	599,755	378,664	383,306
	Tensão de escoamento reverso	220,000	240,000	240,000
	Tensão de escoamento direto	420,000	260,000	280,000
	$\Delta\sigma$	379,755	138,664	143,306
	BSP	0,633	0,366	0,374
	BEP	1,056	0,584	0,694
0,63	Tensão máxima carregamento direto	599,755	391,457	396,707
	Tensão de escoamento reverso	280,000	280,000	260,000
	Tensão de escoamento direto	420,000	310,000	310,000
	$\Delta\sigma$	319,755	111,457	136,707
	BSP	0,533	0,285	0,345
	BEP	0,889	0,684	0,788

Fonte: Próprio Autor

Com base no parâmetro BSP, observou-se, durante os três ciclos analisados, que o efeito Bauschinger se mostrou mais proeminente para a amplitude de deformação de 0,98. Em contrapartida, considerando o parâmetro BEP, o efeito Bauschinger foi mais representativo

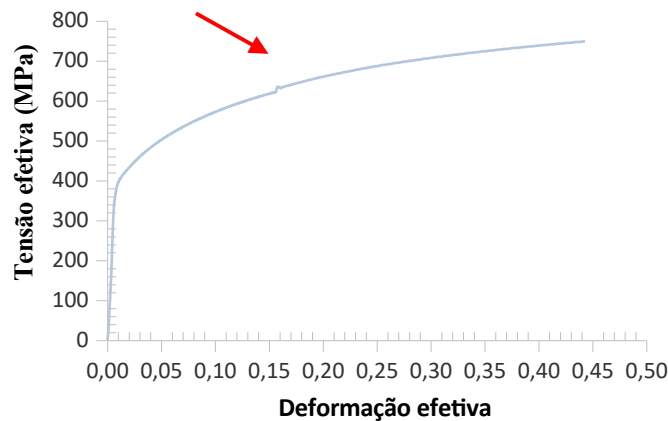
para a amplitude de deformação de 0,63. Segundo Abel e Muir (1972), dada a restrição do efeito Bauschinger à simples redução do escoamento, tanto os parâmetros de tensão quanto os de energia de Bauschinger crescem com o aumento da pré-deformação. Contudo, considerando a análise do efeito em sua totalidade, o parâmetro de energia tende a diminuir com o crescimento da pré-deformação, o que implica diretamente em uma redução do efeito Bauschinger. A partir disso, com base na interpretação dos autores, o comportamento expresso pelo parâmetro de energia foi o que melhor descreveu o efeito Bauschinger.

Considerando esse comportamento em estruturas CFC, Horstemeyer (1998), em seu estudo sobre a influência do efeito Bauschinger em uma liga de alumínio fundido A356, correlacionou a redução do valor de BEP ao aumento da pré-deformação e à diminuição da anisotropia plástica induzida pela deformação do metal. Assim, tendo em vista sua alta energia de falha de empilhamento, a matriz de alumínio permite um aumento do deslizamento cruzado, o que acomoda discordâncias que induzem tensões internas locais e interferem na interface das ligações alumínio-silício. Quando isso acontece, as tensões internas são relaxadas, e a tensão de retorno é reduzida. À medida que a pré-deformação aplicada aumentou, o acúmulo de danos também cresceu, aliviando a tensão interna de retorno nessa liga de alumínio fundido A356.

5.3.2 Cisalhamento com mudança na taxa de deformação

A partir da variação da taxa de deformação do metal durante o ensaio de 0,001/s para 0,003/s foi possível observar a alteração da sensibilidade da tensão à mudança da velocidade de deformação da amostra. A Figura 5.6 apresenta o gráfico tensão-deformação efetiva obtido pelo experimento, onde a região de inflexão é indicada, caracterizando a ocorrência do pico de tensão que representa o endurecimento enfrentado pelo material. A Tabela 4 apresenta o valor médio de acréscimo de tensão registrado durante o ensaio.

Figura 5.6 – Curva tensão-deformação efetiva para mudança na taxa de deformação de 0,001/s para 0,003/s em aço AISI 430 tipo H



Fonte: Próprio autor

Tabela 4 – Valor médio de acréscimo de tensão para mudança da taxa de deformação de 0,001/s para 0,003/s

Material	Tensão Efetiva
Aço 430 H como recebido	12 ± 2 MPa

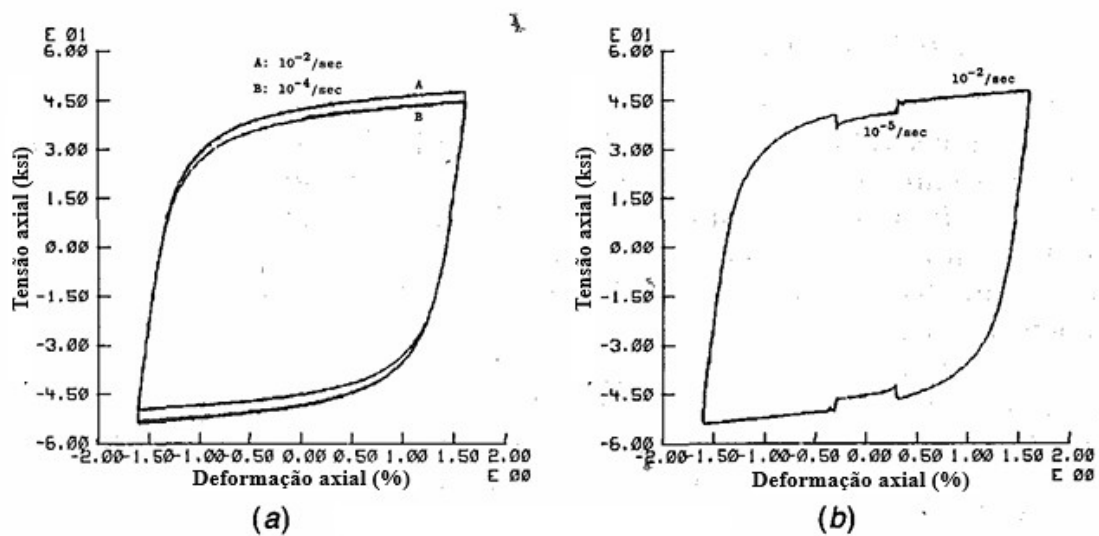
Fonte: Próprio autor

Uma possibilidade é a de que o aumento de resistência mecânica observado tenha ocorrido em função do crescimento do número de discordâncias durante essa passagem e também a diminuição da recuperação dinâmica dessa fase. Como verificado por Alencar (2016), a ductilidade dos aços de base ferrítica encontra-se intimamente ligada a elevadas taxas de recuperação dinâmica, que possibilitam que a deformação intergranular acomode deslizamentos diferenciais nos contornos de grão em regiões de junções triplas, o que reduz as concentrações de tensões e a possibilidade de nucleação de trincas nessas áreas. Em consequência disso, a redução da recuperação dinâmica promoveu o aumento da dureza do material.

As mesmas inflexões foram observadas por Chang e Lee (1987) em seu estudo sobre os efeitos da taxa de deformação no comportamento de um aço A-36 recozido. Sob condições de carregamento cíclicas e a temperatura ambiente, a Figura 5.7 (a) apresenta as curvas obtidas por meio da aplicação de carga em direção axial a taxas de deformação constantes de $10^{-2}/s$ e $10^{-4}/s$. A Figura 5.7 (b) mostra o perfil da curva de carregamento cíclico sujeita a

variação da taxa de deformação entre $10^{-2}/s$ e $10^{-5}/s$, onde é possível verificar a sensibilidade da tensão à mudança na taxa de deformação gerada conforme a tensão cai abruptamente durante o ciclo de carga. Em ambos os casos, os autores observaram que as sensibilidades exibidas mostraram-se inferiores aos experimentos análogos realizados com carregamento monotônico.

Figura 5.7 – Curvas de carregamento cíclico do aço A-36 sob diferentes taxas de deformação



(a) Curva tensão-deformação axial para taxas de deformação constantes de 10^{-2} e 10^{-4} e (b) Curva tensão-deformação axial para variação da taxa de deformação de 10^{-2} e 10^{-5}

Fonte: Adaptado de CHANG; LEE, 2013

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível confirmar a ocorrência do efeito Bauschinger durante o carregamento cíclico do aço inoxidável AISI 430 tipo H. Com base nos parâmetros BSP e $\Delta\sigma$, o aumento da amplitude de deformação foi responsável por intensificar o efeito Bauschinger; contudo, a análise do resultado obtido pelo parâmetro BEF não apresentou a mesma correspondência. Considerando o gráfico tensão-deformação obtido, foi possível identificar a ocorrência do pico de tensão promovido pelo aumento da taxa de deformação durante o carregamento cíclico. Além disso, verificou-se que o aumento na taxa de deformação de $0,001 \text{ s}^{-1}$ para $0,003 \text{ s}^{-1}$ foi responsável por uma elevação média do fluxo de tensão de aproximadamente 12 MPa após o ponto de inflexão.

REFERÊNCIAS

ABEL, A.; MUIR, H. The Bauschinger effect and discontinuous yielding. **Philosophical Magazine**, v. 26, n. 2, p. 489-504, 1972.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892-1 Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2018. 80p.

ALENCAR, R. A. F. **Estudo do efeito de mudanças sucessivas na trajetória de deformação no comportamento mecânico dos aços inoxidáveis AISI 430 e AISI 441**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica, Belo Horizonte, 2016.

APERAM. Inox é a solução para a Indústria Automotiva. **Brochures - Leaflets**, p. 6, 2018. Disponível em: <https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/Aperam%20-%20Inox%20no%20setor%20Automotivo.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2024.

APERAM. Aços Inoxidáveis - Aplicações e especificações. **Handbooks**, v. 1, p. 32, 2020a. Disponível em: <https://online.fliphtml5.com/ezoyh/heqt/#p=1>. Acesso em: 10 nov. 2024.

APERAM. Processos: Estampagem por Embutimento e Estiramento. **Handbooks**, p. 20, 2020b.

Disponível em: https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/Handbook_Forming_PT.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024

APERAM. Especificação de Materiais - Arte ou Ciência? **Handbooks**, v. 4, p. 24, 2020c. Disponível em: <https://online.fliphtml5.com/ezoyh/nyxn/#p=1> Acesso em: 10 nov. 2024

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook, Volume 01 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. 10. ed. [s.l.] Asm International, 1990.

BANABIC, D. **Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation**. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2010.

BARLAT, F.; DUARTE, J. M. F; GRACIO, J. J; LOPES, A. B; RAUCH E. F. Plastic flow for non-monotonic loading conditions of an aluminium alloy sheet sample. **International Journal of Plasticity**, França, n. 19, p. 1215-1244, 2003.

BILLUR, E. Hot Stamping of Ultra High-Strength Steels. 1. ed. [s.l.] **Springer**, 2018. p. 245

BOLJANOVIC, V. **Sheet Metal Forming Processes and Die Design**. 2. ed. [s.l.] Industrial Press Inc., 2014. v. 1.

BRESCIANI FILHO, E. *et al.* **Conformação plástica dos metais**. 6. ed. São Paulo: EPUSP, 2011. p. 258.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. p. 198-230

CHANG, Kuo-Chun; LEE, George C. Strain rate effect on structural steel under cyclic loading. **Journal of engineering mechanics**, v. 113, n. 9, p. 1292-1301, 1987.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2015. p. 599.

CLARKE, K. D. *et al.* The effect of strain rate on the sheet tensile properties and formability of ferritic stainless steels. **SAE Technical Paper**, 2003.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: E. Blücher, 2008. p. 652.

COSTA E SILVA, A. L. V.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. p. 664.

DATTA, R; BHARGAVA, M. Shear texture development and microstructural analysis of friction stir welded AA5754 sheets during forming at different strain paths. **Materials Today Communications**, v. 38, p. 107850, 2024.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S. A., 1981. p. 653.

GARCIA, A. **Ensaio dos Materiais**. 2 ed. [s.l.] LTC, 2012. p. 384.

HAN, K; VAN TYNE, C. J.; LEVY, B. S. Effect of strain and strain rate on the Bauschinger effect response of three different steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 36, p. 2379-2384, 2005.

HIBBELER, R. C. **Mechanics of materials**. 5. ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Education, 2004. p. 666.

HORSTEMEYER, Mark F. Damage influence on Bauschinger effect of a cast A356 aluminum alloy. **Scripta materialia**, v. 39, n. 11, p. 1491-1495, 1998.

HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. **Metal Forming: mechanics and metallurgy**. 4. ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2011. p. 344

JORDON, James Brian *et al.* Damage and stress state influence on the Bauschinger effect in aluminum alloys. **Mechanics of Materials**, v. 39, n. 10, p. 920-931, 2007.

KRÜGER, L. *et al.* Strain rate and temperature effects on the flow behavior and microstructure of X2CrNiMoN22-5-3 duplex stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 592, p. 6-11, 2014.

LIU, Xiaolong et al. Extraordinary Bauschinger effect in gradient structured copper. In *Heterostructured Materials*. **Jenny Stanford Publishing**, 2021. p. 361-370.

LOPES, W. **Efeito da pré-deformação e direção de solicação no comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 430E com o uso do ensaio de cisalhamento para alterar a trajetória de deformação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

LOPES, W. **Estudo do Encruamento dos Aços AISI 304 e AISI 309 com Uso da Técnica de Cisalhamento Planar Simples**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MAMUN, A. A. et al. Origin of the Bauschinger effect in a polycrystalline material. **Materials Science and Engineering: A**, 2017, v. 707, p. 576-584

RAUCH, E. F. The Flow Law of Mild Steel Under Monotonic or Complex Strain Path. **Solid State Phenomena**, França, v. 23 & 24, p. 317-334, 1992.

RAUCH, E. F. et al. Hardening behavior and structural evolution upon strain reversal of aluminum alloys. **Scripta Materialia**, v. 46, n. 12, p. 881-886, 2002.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. 3. ed. Porto Alegre: Livres Editora, 2009. p. 167

SENRA, Douglas Ferreira et al. Estudo do retorno elástico para o aço dual phase com uso da técnica de cisalhamento planar. In: Congresso Anual Da Abm – Internacional; Enemet - Encontro Nacional De Estudantes De Engenharia Metalúrgica, De Materiais E De Minas, 69., 14., 2014, São Paulo, SP. **Anais**. São Paulo: ABM, 2014.

VERLEYSEN, Patricia et al. Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 8, p. 1457-1464, 2011.

WEISS, M; KUPKE, A; MANACH, P. Y; GALDOS, L; HODGSON, P. D. On the Bauschinger effect in dual phase steel at high levels of strain. **Materials Science and Engineering**, v. A 643, p. 127-136, 2015.

WERNICKE, S. et al. Strain path dependency in incremental sheet-bulk metal forming. **International Journal of Material Forming**, v. 14, p. 547-561, 2020.

XIANG, Y; VLASSAK, J. Bauschinger effect in thin metal films. **Scripta Materialia**, v. 53, n. 2, p. 177-182, 2005.