

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

WELLINGTON RAFAEL KONOPKA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO RETORNO ELÁSTICO ENTRE OS AÇOS DE
ALTA RESISTÊNCIA USI CP 900 E DOCOL DP 1000**

CAXIAS DO SUL

2019

WELLINGTON RAFAEL KONOPKA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO RETORNO ELÁSTICO ENTRE OS AÇOS DE
ALTA RESISTÊNCIA USI CP 900 E DOCOL DP 1000**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico. Área de concentração: Processos de
Fabricação.

Orientador Prof. Me. Victor Hugo Velazquez
Acosta

CAXIAS DO SUL

2019

WELLINGTON RAFAEL KONOPKA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO RETORNO ELÁSTICO ENTRE OS AÇOS DE
ALTA RESISTÊNCIA USI CP 900 E DOCOL DP 1000**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de Fabricação.

Aprovado em 04/07/2019

Banca Examinadora

Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Na indústria automotiva, a necessidade cada vez maior de redução de peso e melhor desempenho de colisão requer o uso de aços de maior resistência em operações de conformação. Como consequência, novos modelos de materiais acabam sendo introduzidos nas linhas de manufatura. O aumento da tensão de escoamento está relacionado com o aumento do retorno elástico para aços de alta resistência. O retorno elástico é apontado como um problema que afeta a produção em larga escala de componentes e são poucas as alternativas para solucionar o mesmo. Este projeto de conclusão de curso de engenharia mecânica tem como objetivo realizar a análise comparativa do retorno elástico entre dois materiais de alta resistência USI CP 900 e DOCOL DP 1000. A aplicação do método teve como base a aplicação das fases: planejar, coletar e analisar dados experimentais e avaliar os resultados. O procedimento experimental foi dividido em partes. Na primeira, foi feita a caracterização dos materiais com relação as propriedades mecânicas. Na segunda, foram analisados os parâmetros do raio de dobramento que tenham influência no retorno elástico. Na terceira, foi analisado o deslocamento percentual da linha neutra após o processo de dobramento. Nos processos práticos, foi observada a influência de alguns parâmetros de processo e de ferramenta no retorno elástico.

Palavras-Chave: Aços de alta resistência. Conformabilidade mecânica. Retorno elástico. Viabilidade técnica.

ABSTRACT

In the automotive industry, the increasing need for weight reduction and improved collision performance requires the use of higher strength steels in forming operations. As a consequence, new material models are introduced into manufacturing lines. The increase in the yield stress is related to the increase of the springback for high strength steels. The springback is pointed out as a problem that effects the large-scale production of components and there are few alternatives to solve. This project of completion of mechanical engineering course aims to perform the comparative analysis of the springback between two materials of high advanced strength steel, USI CP 900 and DOCOL DP 1000. The application of the method will be based on the application of the phases: plan, collect and analyze experimental data and evaluate the results. The experimental procedure is divided into parts. In the first one, the characterization of the materials with respect to the mechanical properties is made. In the second, radius parameters of forming are analyzed that have influence in the springback. In the third, the percentage displacement of the neutral line after the forming process analyzed. In the practical processes, the influence of some process and tool parameters on the elastic return was observed.

Keywords: High strength steels. Mechanical conformability. Springback. Technical viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre alongamento tensão de alongamento para os aços.....	16
Figura 2 - Linha neutra no processo de dobra	21
Figura 3 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração	30
Figura 4 - Ensaio de tração com extensômetro.....	31
Figura 5 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de dobramento em V.....	32
Figura 6 - Ferramenta de dobramento	33
Figura 7 - Ensaio de dobramento utilizando punção com raio de 8mm	33
Figura 8 - Comportamento do retorno elástico para amostras de materiais de alta resistência após ensaio de dobramento a 90° - Sentido de laminação – 0°	34
Figura 9 - Contorno de superfície para a medição do retorno elástico.....	34
Figura 10 - Processo de embutimento das amostras de materiais de alta resistência para ensaios metalográficos.....	36
Figura 11 - Processo de lixamento das amostras de aços de alta resistência para ensaios metalográficos.....	36
Figura 12 - Análise metalográfica das amostras de aços de alta resistência Usi CP 900 e Docol DP 1000	37
Figura 13 - Análise do deslocamento da linha neutra após ataque superficial.....	37
Figura 14 - Limite de escoamento do material USI CP 900.....	38
Figura 15 - Limite de escoamento do material DOCOL DP 1000	38
Figura 16 - Resistência máxima do material USI CP 900.....	39
Figura 17 - Resistência máxima do material DOCOL DP 1000	39
Figura 18 - Curva comparativa da Tensão x Escoamento para os aços de alta resistência Usi CP 900 e Docol DP 1000.....	41
Figura 19 - Resultados do retorno elástico das amostras após processo de dobramento a 90° do material USI CP 900 – Sentido de laminação – 0°	42
Figura 20 - Resultados do retorno elástico das amostras após processo de dobramento a 90° do material USI CP 900 – Sentido de laminação – 90°	42
Figura 21 - Resultados do retorno elástico das amostras após processo de dobramento a 90° do material DOCOL DP 1000 – Sentido de laminação – 0°	43
Figura 22 - Resultados do retorno elástico das amostras após processo de dobramento a 90° do material DOCOL DP 1000 – Sentido de laminação –90°	43

Figura 23 - Análise comparativa das médias do fator de retorno elástico para os materiais de alta resistência USI CP 900 e DOCOL DP 1000. Sentido de laminação – 0°	44
Figura 24 - Análise comparativa das médias do fator de retorno elástico para os materiais de alta resistência USI CP 900 e DOCOL DP 1000. Sentido de laminação – 90°	44
Figura 25 - Análise comparativa do fator de retorno elástico do material USI CP 900 - Sentido de laminação - 0°	46
Figura 26 - Análise comparativa do fator de retorno elástico do material DOCOL DP 1000 - Sentido de laminação - 0°.....	46
Figura 27 - Análise metalográfica do material de alta resistência USI CP 900	47
Figura 28 - Análise metalográfica do material de alta resistência DOCOL DP 1000.....	48
Figura 29 - Linha neutra de materiais de alta resistência	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química dos materiais a serem analisados	29
Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais a serem analisados	29
Tabela 5 - Determinação de corpo de prova para ensaio de tração	30
Tabela 6 - Determinação de corpo de prova para ensaio de tração	31
Tabela 7 - Determinação de corpo de prova para ensaio de dobramento	32
Tabela 3 - Determinação de corpo de prova para análise metalográfica.....	35
Tabela 4 - Determinação de corpo de prova para análise metalográfica.....	35
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de tração para o limite de escoamento do material USI CP 900.....	54
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de tração para a resistência máxima do material USI CP 900	54
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de tração para o limite de escoamento do material USI CP 900	54
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de tração para o limite de escoamento do material DOCOL DP 1000	55
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de tração para a resistência máxima do material DOCOL DP 1000	55
Tabela 13 - Resultados dos ensaios de tração para o alongamento total do material DOCOL DP 1000	55
Tabela 14 - Médias dos índices de encruamento (n) e das constantes (C) obtidas nas curvas de escoamento para o material USI CP 900	57
Tabela 15 - Médias dos índices de encruamento (n) e das constantes (C) obtidas nas curvas de escoamento para o material DOCOL DP 1000.....	57
Tabela 16 - Angulo de retorno elástico após ensaio de dobramento a 90° para o material USI CP 900 - Direção de laminação - 0°	61
Tabela 17 - Angulo de retorno elástico após ensaio de dobramento em V para o material USI CP 900 - Direção de laminação - 90°	61
Tabela 18 - Angulo de retorno elástico após ensaio de dobramento em V para o material DOCOL DP 1000 - Direção de laminação - 0°	61
Tabela 19 - Angulo de retorno elástico após ensaio de dobramento em V para o material DOCOL DP 1000 - Direção de laminação - 90°	62

Tabela 20 - Fator de retorno elástico (Ks) para o material USI CP 900 - Direção de laminação - 0°	62
Tabela 21 - Fator de retorno elástico (Ks) para o material USI CP 900 - Direção de laminação - 90°	62
Tabela 22 - Fator de retorno elástico (Ks) para o material DOCOL DP 1000 - Direção de laminação - 0°	63
Tabela 23 - Fator de retorno elástico (Ks) para o material DOCOL DP 1000 - Direção de laminação - 90°	63
Tabela 24 - Força máxima para o dobramento em V para o material USI CP 900 – Direção de laminação – 0°	63
Tabela 25 - Força máxima para o dobramento em V para o material USI CP 900 – Direção de laminação – 90°	63
Tabela 26 - Força máxima para o dobramento em V para o material DOCOL DP 1000 – Direção de laminação – 0°	64
Tabela 27 - Força máxima para o dobramento em V para o material DOCOL DP 1000 – Direção de laminação – 90°	64
Tabela 28 - Fator de retorno elástico e ângulo teórico para o material USI CP 900 - Sentido de laminação - 0.....	65
Tabela 29 - Fator de retorno elástico e ângulo teórico para o material USI CP 900 - Sentido de laminação - 90°	65
Tabela 30 - Fator de retorno elástico e ângulo teórico para o material DOCOL DP 1000 - Sentido de laminação - 0°	65
Tabela 31 - Fator de retorno elástico e ângulo teórico para o material DOCOL DP 1000 - Sentido de laminação - 90°	66
Tabela 32 - Análise comparativa entre o fator de retorno teórico e experimental do material USI CP 900 – Sentido de laminação – 0°	66
Tabela 33 - Análise comparativa entre o fator de retorno teórico e experimental do material USI CP 900 – Sentido de laminação – 90°	66
Tabela 34 - Análise comparativa entre o fator de retorno teórico e experimental do material DOCOL DP 1000 – Sentido de laminação – 0°	66
Tabela 35 - Análise comparativa entre o fator de retorno teórico e experimental do material DOCOL DP 1000 – Sentido de laminação – 90°	67
Tabela 36 - Análise estatística do angulo de retorno elástico utilizando método Teste t de Student para os materiais USI CP 900 e DOCOL DP 1000	68

Tabela 37 - Análise estatística do ângulo de retorno elástico utilizando método Teste t de Student para os materiais USI CP 900 e DOCOL DP 1000.....	68
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão [N/mm ²]
E	Módulo de Elasticidade [GPa]
Σ_e	Limite de escoamento [N/mm ²]
R _m	Limite de resistência ou Tensão máxima [N/mm ²]
$\Delta\ell$	Alongamento [mm] F Força [N]
ℓ_1	Comprimento instantâneo [mm]
ℓ_0	Comprimento inicial [mm]
A ₀	Área inicial [mm ²]
ε	Deformação relativa [%]
k _f	Tensão de escoamento (tensão x deformação verdadeira) [N/mm ²]
A	Área instantânea [mm ²]
φ	Deformação verdadeira
C	Constante do material n Índice de encruamento
r	Índice de anisotropia
φ_b	Deformação verdadeira na largura
φ_s	Deformação verdadeira na espessura
b ₀	Largura inicial [mm] s ₀ Espessura inicial [mm]
b ₁	Largura no instante considerado [mm]
s ₁	Espessura no instante considerado [mm]
l ₁	Comprimento inicial [mm]
Δr	Coefficiente de anisotropia planar
r _m	Coefficiente de anisotropia normal médio
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Deformações verdadeiras nas direções 1, 2 e 3
s	Espessura da chapa [mm] d ₁ Diâmetro maior do copo estampado [mm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	AÇOS.....	15
2.2	AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA	16
2.2.1	Aços bifásicos	17
2.2.2	Aços complexos	18
2.3	CONFORMAÇÃO MECÂNICA	19
2.3.1	Dobramento	20
2.4	RETORNO ELÁSTICO	22
2.4.1	Retorno elástico para aços de alta resistência	24
2.5	ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DAS CHAPAS	26
2.5.1	Ensaio de tração	26
2.5.2	Curva de escoamento.....	27
2.5.3	Índice de anisotropia	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	METODOLOGIA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	29
3.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	30
3.3	ENSAIO DE DOBRAMENTO	31
3.4	ANÁLISE METALOGRÁFICA	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	38
4.2	ENSAIO DE DOBRAMENTO	41
4.3	ENSAIO METALOGRAFICO	47
5	CONCLUSÃO	50
	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	52
APÊNDICE A - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO PARA OS MATERIAIS USI CP 900 E DOCOL DP 1000.....	54
APÊNDICE B - CURVAS DE ESCOAMENTO OBTIDAS NOS GRÁFICOS PARA OS SEIS CORPOS DE PROVA	56
APÊNDICE C - CÁLCULOS PARA A DEFINIÇÃO DO ÍNDICE DE ENCRUAMENTO DOS MATERIAIS CP 900 E DP 1000	57
APÊNDICE D - RESULTADOS DOS ENSAIO DE DOBRAMENTO EM V PARA OS MATERIAIS CP 900 E DP 1000.....	59
APÊNDICE E - BASE DE CÁLCULO PARA DEFINIÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO PARA OS MATERIAIS CP 900 E DP 1000.....	61
APÊNDICE F - ANÁLISE TEÓRICA DO FATOR DE RETORNO ELÁSTICO PARA OS MATERIAIS DE ALTA RESISTÊNCIA USI CP 900 E DOCOL DP 1000	65
APÊNDICE G - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO ÂNGULO DE RETORNO ELÁSTICO PARA OS MATERIAIS DE ALTA RESISTÊNCIA USI CP 900 E DOCOL DP 1000.....	68
APÊNDICE H - ANÁLISE DA LINHA NEUTRA PARA OS MATERIAIS DE ALTA RESISTÊNCIA USI CP 900 E DOCOL DP 1000	69

1 INTRODUÇÃO

A evolução da manufatura e dos bens de consumo impôs o desenvolvimento de materiais de baixo custo e elevado desempenho em requisitos mecânicos. Dessa forma, materiais com maior resistência mecânica, dúcteis e com baixas espessuras estão cada vez mais presentes nas linhas de manufatura.

O aço avançado possui classes conforme o método de fabricação. Cada siderúrgica possui uma composição específica de carbono e elementos de liga, o que diferencia o aço de alta resistência multifásico está no processo térmico ao qual o material é submetido. Os aços de alta resistência são formados predominantemente por ilhas de martensita, podendo conter bainita e perlita, dispersas em uma matriz ferrítica. Esta microestrutura martensítica-ferrítica garante boa capacidade de encruamento e boa conformabilidade (DEMERI, 2013).

O processo de dobramento é definido como a transição de uma dada forma de um semi acabado plano em uma outra forma, ocasionando assim uma geometria diferente da inicial. Os processos de conformação de chapas têm importância especial na fabricação de carrocerias automotivas. Conforme a teoria elementar do dobramento, origina-se uma chapa dobrada a partir da linha de simetria. O nível de tensão plástica e a distribuição dessas tensões controlará a tendência do retorno elástico. É muito difícil prever com precisão o retorno elástico, já que isso é dependente da configuração da ferramenta (SSAB; MARTINS; SCHAEFFER, 2014).

Para que haja exatidão dimensional da peça desejada, o retorno elástico deverá ser analisado. Em ensaios de dobramento efetuados, foi possível identificar uma diferença entre o real x planejado de até 15%. A complexibilidade do material e método matemático inadequado para aços de alta resistência justificaria este percentual de diferença (MARTINS; SCHAEFFER, 2014).

1.1 JUSTIFICATIVA

Grande parte das empresas automotivas está buscando o aperfeiçoamento no processo de manufatura e de meios sustentáveis de produção. Como consequência, novos modelos de materiais acabam sendo introduzidos nas linhas de manufatura. Conforme Martins e Schaeffer (2014) o aumento da tensão de escoamento e resistência máxima está relacionada com o aumento do retorno elástico para aços de alta resistência. De acordo com o processo de produção, os aços apresentam tensões residuais geradas durante o processo de produção. As Em virtude dessas tensões residuais, os aços podem apresentar variações de comportamento

mecânico com relação ao sentido de laminação. É comum a otimização de blanks no corte a laser. As peças programadas podem ser produzidas a partir de diferentes posições com relação ao sentido de laminação do blank. Utilizando como exemplo a produção de uma caixa de carga de um implemento rodoviário basculante, os revestimentos laterais e traseiros apresentam dobramento com sentido de laminação diferente. A intenção desse trabalho é analisar, de forma comparativa, os materiais USI CP 900 e o DOCOL DP 1000 no que se refere ao comportamento do retorno elástico durante o processo de dobramento considerando a variação de raio de dobramento e sentido de laminação. Sabe-se que os materiais possuem características semelhantes com relação propriedade mecânica, processo de fabricação e microestrutura. Por este motivo, torna-se necessário avaliar as vantagens e desvantagens e dessa forma avaliação a possibilidade de viabilizar de produção de determinado materiais com as respectivas espessuras

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral é analisar o processo de dobramento, na conformação mecânica de aços de alta resistência USI CP 900 e DOCOL DP 1000 e com base nos resultados, identificar o comportamento dos referidos materiais no processo de dobramento.

1.2.1 Objetivos específicos

Do objetivo geral derivam-se os específicos como sendo:

- a) Realizar a revisão bibliográfica referente às propriedades do aço e as suas características no processo de dobramento;
- b) Estabelecer uma metodologia de teste para estudo do retorno elástico no processo de dobramento;
- c) Obter através dos ensaios mecânico as propriedades e a suas características no processo de dobramento;
- d) avaliar os ensaios realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS

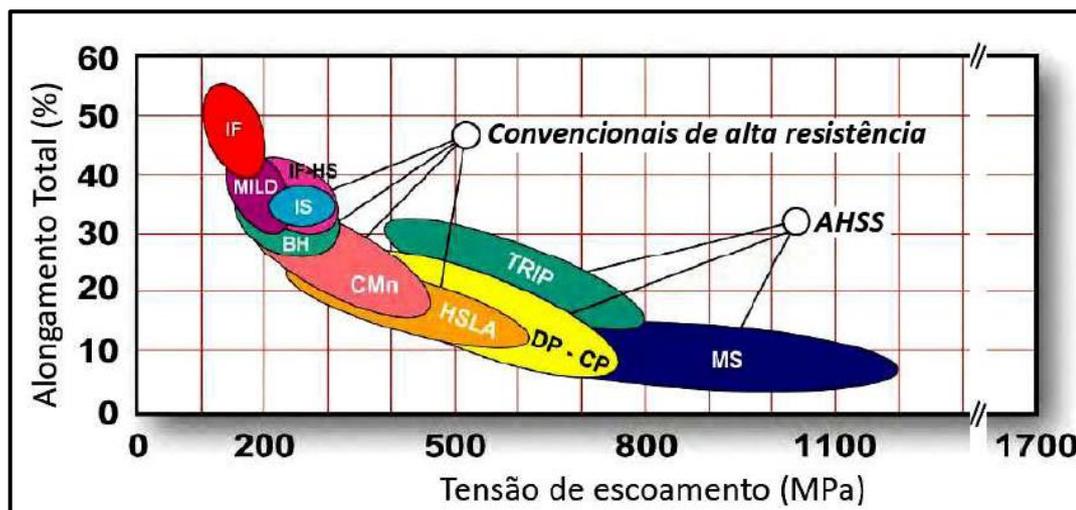
O aço é uma combinação binária constituída de ferro contendo geralmente de 0,008% a 2,11% de carbono. Na sua microestrutura encontra-se outros elementos como o cromo, manganês, níquel. Estes elementos estão presentes em quantidades residuais, mas quando adicionados intencionalmente, chamamos o produto de aços liga. As ligas com teores superiores a 2,11% de carbono são chamadas de ferros fundidos. Os aços carbono, ligas de ferro e carbono, podem ser subdivididos em baixo teor de carbono com teores de carbono inferiores a 0,2%, médio teor de carbono com teores que variam entre 0,2 a 0,5% de carbono e alto teor de carbono com teores acima de 0,5%. Já os aços liga podem ser divididos em aços com alto teor de liga, quando o teor dos elementos de liga adicionados intencionalmente é superior a 8% da composição do material e aços com baixo teor de liga, quando o teor dos elementos fica abaixo dos 8% (CHIAVERINI, 1996).

Os aços e ligas especiais têm sido classificados de diferentes maneiras. São métodos usuais de classificação, baseados em características do aço ou liga e em seu emprego. Em geral, especificações de materiais são derivadas do conhecimento acumulado sobre determinado material e sobre o seu comportamento. Após determinar uma combinação química e estrutura para o material, determina-se o seu comportamento e desempenho. O aço pode ser classificado conforme (CHIAVERINI; SILVA, 2005):

- a) composição química;
- b) propriedades mecânicas;
- c) tamanho de grão;
- d) temperabilidade;
- e) nível de inclusão não metálica;
- f) resistência ao impacto;
- g) propriedades físicas.

De acordo com a figura 1, os aços apresentam diferentes comportamentos com relação ao seu limite de escoamento. Os aços advanced high strength steel (AHSS) apresentam uma ampla faixa de tensão de escoamento comparado com os demais aços.

Figura 1 - Relação entre alongamento tensão de alongamento para os aços



Fonte: Adaptado por Lajarian (2012)

2.2 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

Para estruturas e aplicações de maior responsabilidade, aços de alta resistência e baixa liga vem sendo extensivamente desenvolvidos nas últimas décadas. Existem aplicações especiais que requerem aços de baixa liga ou média liga, como aços para reatores nucleares, vasos de pressão, mísseis e submarinos. As principais diferenças entre o aço convencional de alta resistência high strength steel (HSS) e o AHSS são às suas microestruturas. O AHSS adquiriu suas propriedades de alto desempenho em resistência e conformabilidade incorporando microestruturas multifásicas. A microestrutura pode apresentar ferrita, martensita e bainita, produzindo assim propriedades mecânicas particulares a estes aços.

O tratamento termomecânico envolve a aplicação simultânea de aquecimento e arrefecimento em ciclos combinados com algum tipo de deformação do aço, este processo apresenta como finalidade alterar sua forma e refinar sua microestrutura para se alcançar melhores propriedades mecânicas. A deformação leva a uma quebra da microestrutura original grossa que existe no estado de fundição. Quaisquer inclusões de óxidos, sulfetos e silicatos, são quebrados, deformados e distribuídos por todo o aço de forma refinada e uniforme. A indústria automotiva foi uma das principais provedoras da evolução metalúrgica do aço, pois sempre forçou o desenvolvimento tecnológico da siderurgia mundial para produzir aços cada vez mais baratos e com maior estampabilidade (BHADESHIA; GORNI, 2017).

Os aços de alta resistência apresentam comportamentos complexos. São materiais sofisticados com uma combinação cuidadosamente selecionada de elementos de liga. Dessa

forma, é possível o surgimento de uma microestrutura característica. A escolha adequada dos elementos e mecanismos de concepção resultam no elevado aumento na resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e fadiga. A falta de conhecimento das propriedades dos materiais e os limites de processos são os motivos pelos quais os primeiros automóveis possuíam geometrias simples, eram basicamente quadrados e com espessuras de chapas elevadas comparados com os atuais.

A pressão da indústria automobilística pela competitividade e lucratividade forçou as usinas a evoluírem para materiais mais baratos e com alta conformabilidade. Na década de 50, surgiram carros com geometrias diferentes, do habitual. Foram introduzidos modelos curvilíneos. O modelo foi inviabilizado diante a primeira crise do petróleo, na década de 70. O aumento astronômico do preço do combustível impôs a redução do consumo. Dessa forma, iniciou-se a corrida de redução de peso e tamanho dos veículos. Neste mesmo período, houve uma crescente por maior conforto nos veículos e questões ambientais com relação a emissão de poluentes.

No início da década de 90, de acordo com Andrade et al (2002), estudos realizados pela International Iron Steel Institute, previam que na briga com o alumínio e polímeros, o aço poderia perder 10% de participação no competitivo mercado automobilístico até 2005. Quando avaliado do ponto de vista da matéria prima, os automóveis são compostos em média, por 70% de aço. Dessa forma, 35 siderúrgicas de 18 nacionalidades diferentes, incluindo a Usiminas e CSN, uniram-se para formar um consórcio. A partir desse grupo, surgiu o projeto Ultra Light Steel Auto Body. Como resultados, chegou-se a uma redução de peso de 25%. Somou-se a esse resultado um elevado aumento da segurança dadas pelos coeficientes de rigidez em torção, dobramento e conforto, com relação a vibrações mecânicas.

2.2.1 Aços bifásicos

Na década de 70 surgiram os aços bifásicos, resultado da manipulação de elementos de liga a fim de gerar microestruturas mais complexas do que ferríticas ou ferrítica-perlítica, obtendo-se assim a maximização entre a conformabilidade e a resistência mecânica. Os aços bifásicos, também chamados de Dual-Phase, apresentam numerosas ilhas de martensita em uma matriz ferrítica. Esta combinação caracteriza a elevada resistência mecânica e ductilidade, respectivamente.

De acordo com Gorni (1995) da microestrutura em dispersão, na fase binária de segunda fase dura deve ser totalmente isolada pela matriz macia. Dessa forma, é possível

garantir a ductilidade e conformabilidade do material. A microestrutura bifásica, apresenta boas características mecânicas o que possibilita boa conformabilidade. Apresenta escoamento contínuo, limite de escoamento entre 300MPa e 380MPa, alto coeficiente de encruamento, entre 0,2 a 0,3 e alongamento de 22%. A alta taxa de encruamento possibilita a esses materiais, excelente capacidade de absorção de impacto e resistência a fadiga. Todas essas características fazem dos aços bifásicos uma opção interessante para componentes estruturais e de segurança.

A produção dos aços é através de laminação de chapas a quente e recozimento contínuo. A alta temperatura de recozimento intercrítico resulta em alta fração de austenita de menor teor de carbono, enquanto baixa temperatura de recozimento resulta em baixa fração de austenita com alto teor de carbono. Isso significa que a temperatura de recozimento intercrítico determina a quantidade máxima de austenita que pode estar disponível para transformação martensítica (DEMETRI, 2009).

2.2.2 Aços complexos

O aço de fase complexa consiste de microestruturas muito finas de matriz de ferrita-bainita com pequenas frações volumétricas de fases duras de martensita, austenita retida e perlita. Os aços complexos contêm 0,15% a menos em relação a peso dos elementos de liga encontrados na fase dos aços bifásicos e plasticamente induzida pela transformação TRIP, mas também têm pequenas quantidades de nióbio, titânio e vanádio (BHADESHIA, 2017)

Em sua microestrutura, o material apresenta em média 42% de ferrita, 40% de bainita, 13% de martensita e 5% de retenção austenita. Os percentuais de fase variam com a taxa de resfriamento da austenita. Altas taxas de resfriamento suprimem a formação de ferrita e favorecem a transformação em martensita. Aços de fase complexa são reforçados por solução sólida, precipitação, refino de grãos e mecanismo de transformação de fase. Eles são caracterizados por alta conformação e alta absorção de energia, o que os torna opções ideais para aplicações automotivas (BHADESHIA, 2017).

Segundo Gorni (2008), essas fases apresentam quantidades suficientes para produzir um material de alta resistência a tração, com limites de escoamento superiores a 500MPa e um elevado alongamento. Essas propriedades são importantes para projetar um automóvel que busca uma maior segurança aos passageiros, além de apresentarem uma redução de peso em relação aos aços convencionais.

De acordo com Schaeffler (2005), os aços complexos são produzidos por meio de tratamentos isotérmicos em temperaturas intermediárias, formando estruturas muito finas de

ferrita e outros constituintes, reforçados por finas precipitações, vistos a adição de pequenas quantidades de nióbio, titânio e vanádio.

Os aços complexos são empregados na indústria automotiva para a fabricação de vigas, colunas laterais e para-choques. Por este motivo, apresentam elevada capacidade de absorção de impacto e resistência a fadiga.

2.3 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Processos de conformação são processos de fabricação que por meio da deformação plástica da matéria prima obtêm o produto acabado, conservando-se o volume e a massa do material em todas as fases do processo. As discordâncias são as arestas de superfície onde existe um deslocamento relativo dos planos cristalinos do metal. Cada movimentação da discordância, produz uma pequena deformação no metal. Com a intensa movimentação de discordâncias, maior a deformação plástica no material. Dessa forma, a capacidade de um metal se deformar plasticamente depende diretamente da mobilidade das suas discordâncias (CALLISTER, 2009).

A medida que a deformação plástica progride, as discordâncias em movimento encontram obstáculos a sua movimentação, que será dificultada, tornando o metal mais endurecido. O fenômeno do aumento do limite de escoamento ou o endurecimento do metal é chamado de encruamento. Em termos práticos, o encruamento se dá por meio de uma severa deformação plástica do metal a frio. Este fenômeno aumenta a densidade de discordâncias, aumenta resistência e diminui a ductilidade do metal. O encruamento pode ser revertido pelo aquecimento do material a uma temperatura suficientemente alta (CALLISTER, 2009).

Os processos de conformação podem ser divididos em dois grupos: processos mecânicos, no qual a modificação ocorre pela aplicação de tensão externa e processos metalúrgicos, no qual a forma está relacionada a microestrutura do material. Nos processos de conformação plástica, as tensões aplicadas são superiores ao limite de escoamento do material. Este processo permite a obtenção de peças sólidas, com características controladas e volume constante (BOLSANELLO, 2014).

De forma resumida, os objetivos desses processos são a obtenção de produtos finais com:

- a) dimensão e forma;
- b) propriedades mecânicas;
- c) condições superficiais.

2.3.1 Dobramento

O dobramento é o processo de conformação mais flexível com relação a processos industriais. Este processo é versátil e econômico, graças a possibilidade de executar qualquer ângulo dentre 180° até a medida da matriz com a mesma ferramenta. A chapa é deformada por flexão e as tensões geradas pela ferramenta de dobramento são responsáveis por fornecer a energia e os movimentos necessários para realizar a operação de dobra.

A forma é obtida mediante o emprego de um punção e matriz que atuam até que a chapa atinja o formato desejado. Para Palmeira (2005), deve-se levar em conta quatro fatores importantes na operação da dobra:

- a) a capacidade elástica do material;
- b) o raio interno mínimo da peça a ser dobrada;
- c) o comprimento desenvolvido da peça;
- d) as forças que atuam na operação de dobramento.

O raio mínimo de dobramento é o limite de conformação do material no processo de dobramento, que pode variar dependendo da sua espessura e características mecânicas. Alguns aços muito dúcteis apresentam raio mínimo de dobramento igual à zero. A deformação plástica ocorre na região da dobra e o restante do material não sofre alteração após o processo.

A linha neutra é a região onde o material após o processo de dobramento, apresentará o mesmo comprimento inicial. Desprezando a variação de espessura, a linha neutra ficará situada na região central da dobra e as tensões de tração e compressão serão iguais.

A para Huang e Leu.1998, a linha neutra pode ser calculada levando em consideração o raio do punção e a espessura da chapa de acordo com a equação 1.

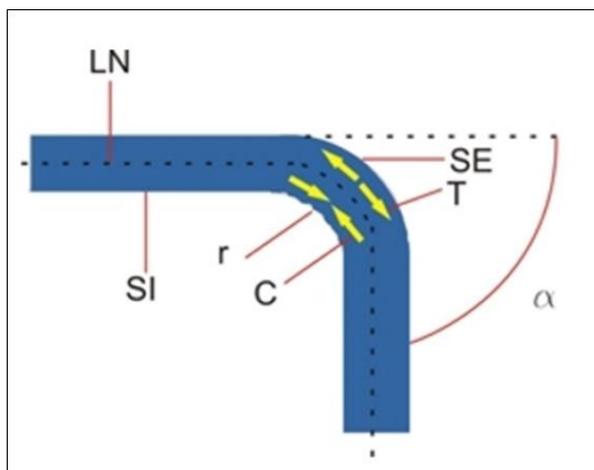
$$y = R_p + T - \sqrt{R_p^2 + R_p * T} \quad (1)$$

onde: R_p é o raio do punção;

T é a espessura.

Quando um metal é dobrado, a sua superfície externa fica tracionada, sofrendo uma redução de espessura, e a superfície interna é comprimida. Estas tensões aumentam a partir de uma linha neutra, chegando a valores máximos nas camadas externas e internas, conforme é representado esquematicamente na figura 2.

Figura 2 - Linha neutra no processo de dobra



Fonte: Borges (2008)

onde: LN é linha neutra;
 SI é a superfície interna;
 SE é a superfície externa;
 R é o raio de concordância;
 C é a força de compressão;
 T é a força de tração.

De acordo com BRESCIANI FILHO et al., 2011, a deformação plástica existente no dobramento provoca uma redução na espessura da chapa, decorrente da ação de tensões de tração, em contrapartida, a largura da chapa tende a aumentar sob esforços de compressão. O efeito dessa deformação concentra-se ao longo da espessura, uma vez que a largura é muito maior que a espessura, causando pequenas distorções na seção transversal da chapa. Quando os esforços de tensão na superfície externa ultrapassam o limite de resistência à tração do material da chapa, há possibilidade de fissuramento dessa região, no entanto, na parte interna há possibilidade de enrugamento devido aos esforços de compressão aplicados.

Fatores como a redução do raio de curvatura do dobramento, aumento da espessura da chapa e do ângulo de dobramento favorecem a obtenção de maiores níveis de deformação plástica, de maneira que o ângulo de dobramento deve ser maior do que o determinado para a peça deformada durante a operação de conformação, devido ao fenômeno observado de recuperação da deformação elástica, que será maior quanto maior for o limite de escoamento do material da chapa, maior for o ângulo de dobramento e quanto mais espessa for a chapa (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

2.4 RETORNO ELÁSTICO

A necessidade da previsibilidade e repetibilidade nos processos de produção exigem condições adequadas com relação ao projeto e fabricação. Os problemas dimensionais e geométricos em peças após o processo de dobramento são normalmente em funções de condição de processo e propriedades mecânicas dos aços materiais utilizados. O desvio dimensional entre o projetado e o executado é chamado de retorno elástico e estão presentes em todos os materiais. A magnitude do desvio dimensional está associada a resistência mecânica e a microestrutura do material.

O processo de deformação tende a gerar uma grande quantidade de energia elástica residual no material conformado. Esta energia fica acumulada durante o carregamento e é liberada de forma moderada no descarregamento. A energia imposta à peça causa um retorno a posição de equilíbrio causa um desvio dimensional. Este desvio dimensional é chamado de retorno elástico. A intensidade do retorno elástico não só depende da geometria da ferramenta e matriz, mas também da quantidade de energia elástica gerada no processo de deformação plástica. A energia de deformação imposta no material gera tensões inferiores ao limite de escoamento, o material tende a retornar a um estado de equilíbrio. Este retorno é maior para raios de dobramento menores, chapas mais espessas e materiais temperados (ARAÚJO, 2007).

O retorno elástico pode variar conforme as características de fabricação do material e composição química. Com relação ao processo de conformação, o retorno elástico está relacionado a:

- a) geometria da ferramenta;
- b) espessura das chapas;
- c) condições físicas da ferramenta.

De acordo com Silva.2013, a magnitude do retorno elástico é governada pela ferramenta e componentes geométricos. Quando a geometria da peça impede a descarga completa de tensões elásticas, as tensões remanescentes na peça são chamadas de tensões residuais. A peça, em seguida, irá assumir qualquer forma possível para minimizar o restante das tensões. Se todas as tensões elásticas não puderem ser aliviadas, então é criado um padrão de tensão residual, levando a reduzir o retorno elástico.

Segundo Silva (2013), o retorno elástico pode ser classificado em 3 tipos:

- a) Alteração angular: É formada quando o plano da aresta dobrada da peça se desvia do plano da ferramenta. O retorno elástico é medido fora da área de dobra. É

causado pela diferença de tensão na direção da espessura da chapa. A chave para minimizar este efeito é eliminar ou minimizar esse efeito de flexão

- b) Curvatura lateral: Criada na parede lateral de um canal. Ocorre quando uma folha de metal é conformada sobre um raio de molde ou punção através de uma ferramenta de conformação.
- c) Torção: O deslocamento é definido como duas seções transversais rotacionando diferente ao longo de um eixo. É causado por momentos de torção na seção transversal da peça.

Segundo Silva (2012), o fenômeno de curvatura lateral é o evento de maior deformação devido a flexão e deflexão do aço sobre o raio de dobramento. O retorno elástico é dependente de muitos fatores, como a geometria da peça, parâmetros de processo e as propriedades dos materiais. A alta taxa de encruamento pode causar maiores aumentos na resistência do aço deformado para a mesma quantidade de deformação. O retorno elástico teórico para aços convencionais pode ser calculado utilizando a equação 1.

$$K = 1 - \frac{[12 * Mb * (r_1 + 0,5 * s)]}{E * b * s^3} \quad (2)$$

$$Mb = \frac{Fb * l}{4} \quad (3)$$

onde: Fb é a força de dobramento;
l é a largura;
S é a espessura;
Mb é o momento de dobramento.

$$Ks = \frac{\alpha}{\alpha'} \quad (4)$$

onde: α : Ângulo desejado;
 α' : Ângulo teórico.

A dificuldade na previsão e no controle do retorno elástico pode implicar na necessidade de ajustes de projeto da peça e no processo. O retorno elástico nas peças dobradas pode gerar dificuldades de montagem na linha de produção, ou redução da qualidade do produto

final. Para a previsão e controle do retorno elástico geralmente é realizada a análise experimental que pode contribuir na geração de princípios de projeto para melhoria. Entretanto, apesar de o conhecimento experimental gerar uma série de recomendações práticas, os modelos matemáticos para equacionamento do problema ainda necessitam de complemento pela análise fenomenológica.

2.4.1 Retorno elástico para aços de alta resistência

A conformação dos aços avançados de alta resistência apresenta tensões elásticas residuais que são proporcionais ao seu limite de resistência. Quanto maior o limite de resistência do aço, maior será o retorno elástico da peça conformada. O retorno elástico ocorre após a remoção da carga aplicada pela ferramenta na conformação da chapa, resultando em desvio de forma do componente estampado (LAJARIN; SANTOS, 2013).

A indústria automobilística necessita de componentes de alta precisão geométrica e dimensional, devido ao fato da montagem automatizada e da necessidade de atendimento a um severo controle de qualidade. Por este motivo o retorno elástico é um problema grave na produção de componentes automotivos, e o conceito básico aplicado para sua diminuição é a redução da tensão na chapa durante a conformação. Também são aplicadas compensações nas formas das matrizes para acomodar o retorno elástico (GAN; WAGONER, 2004).

O Advanced High Strength Steel (AHSS) tem mecanismos de falha diferentes dos aços High Strength Low Alloy (HSLA). Esta realidade é causada principalmente por falhas locais que são observadas na formação de AHSS, devido a sua estrutura multifásica e mudanças de fase durante a deformação.

É essencial testar esses materiais sob vários estados de tensão e deformação, como (WAGONER et al., 2013):

- a) alongamento;
- b) flexão;
- c) flexão por estiramento;
- d) estampagem profunda.

O percentual do retorno elástico relaciona-se diretamente com a força de escoamento. Portanto, o AHSS, particularmente o bifásico, complexo e martensítico, provam dificuldade no controle do retorno elástico. Enquanto AKDQ de baixa resistência, apresenta recuo de 2 a 3%, o retorno elástico de um aço HSLA é de 8 a 12%. O aço MS exibe recuo de 16% a 24%. Depois de conformar uma peça, quando as cargas da ferramenta são removidas, o material sofre uma

recuperação elástica. Durante a deformação plástica, vários fenômenos não lineares resultantes de alterações microestruturais não são bem descritos por aproximação e equações convencionais. O principal causador da não linearidade do comportamento desses aços é o próprio fenômeno da variação do módulo de elasticidade durante o carregamento.

A magnitude do retorno elástico é descrita pelo modelo de encruamento e pela geometria do componente e da ferramenta. Quando a geometria impede o relaxamento completo das tensões elásticas durante o descarregamento, as tensões mantidas no componente são chamadas de tensões residuais (LAJARIAN, PLACIDI, 2012).

Os AHSS são caracterizados com maior resistência e maior encruamento em comparação com graus leves. Portanto, quando os aços AHSS são formados a um nível de tensão, o retorno elástico observado é maior do que o do aço macio (ULINTZ, 2011).

Para a fabricação de peças com o uso de AHSS, a previsão do retorno elástico é essencial. No entanto, modelar o retorno do AHSS é um desafio devido a:

- a) equações de tensão-deformação não aplicáveis;
- b) módulo de descarga não é constante ;
- c) o efeito de Bauschinger é maior comparado a aços suaves.

De acordo com M. Pereira, existe uma inevitável falta de conhecimento sobre a conformação de peças automotivas complexas, onde a recuperação elástica é muito mais significativa para os aços AHSS e deve ser compensada no projeto da matriz. Dessa forma, foi realizada uma análise do retorno elástico de um componente automotivo de geometria complexa, contendo diferentes profundidades de tração ao longo do comprimento. Para esta análise, foi utilizado o material TRIP. Para a simulação do processo de conformação, foram adotados dois softwares, AutoForm e DynaForm. Após as parametrizações com relação as propriedades do material, o processo de conformação foi executado. Com base nos dados, a quantidade de retorno é proporcional à parte elástica da curva de tensão-deformação. Um aumento na tensão de escoamento produz um aumento nas tensões elásticas e, portanto, um aumento na elasticidade.

Na análise do retorno elástico realizado por Silva (2012), o retorno elástico está associado a diversos fatores, mas em destaque o limite de escoamento. No estudo, foram analisados os materiais bifásicos de baixo carbono, endurecido após pintura e com interstícios livres. O processo de dobramento foi realizado em uma máquina de tração. Foi analisado o comportamento do retorno elástico na variação de ângulo para um punção de 5mm de raio. Relacionando com os ensaios de tração, o material com maior limite de escoamento, apresentou

maior retorno elástico. Outro ponto de destaque é a relação do retorno elástico com o ângulo de dobramento. Conforme a autora, a variação angular foi crescente para os aços analisados.

2.5 ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DAS CHAPAS

Para que um produto possa ser fabricado em condições otimizadas, com qualidade de forma econômica, deve-se estar ciente de que é necessário considerar alguns parâmetros de processo (SCHAEFFER, 2004).

Desse modo, determina-se a estampabilidade das chapas com os seguintes testes:

- a) ensaio de tração;
- b) curva de escoamento;
- c) índice de anisotropia;
- d) curva limite de conformação;
- e) testes tecnológicos.

2.5.1 Ensaio de tração

O ensaio consiste em tracionar um corpo-de-prova de forma a garantir um estado uniaxial de tensão, com força e velocidade constante até sua ruptura, registrando a força e o comprimento em cada instante. O cálculo da tensão convencional é obtido dividindo-se a força pela área inicial da seção transversal. A partir dos comprimentos, obtidos em cada instante e do comprimento inicial do corpo-de-prova, calcula-se a deformação relativa (SCHAEFFER, 2004). Com as medidas feitas da força e do comprimento, obtém-se a tensão e a deformação relativa em cada instante do ensaio. A tensão convencional, nominal ou de engenharia é calculada pelas equações (SCHAEFFER, 2004)

Por meio do ensaio de tração uniaxial, podemos obter a variação de tensão de escoamento ou limite de escoamento que o material apresenta durante uma deformação em função da deformação verdadeira, medindo a força e a variação do comprimento. O limite de Escoamento (k_f) pode ser observado na equação 4 (SCHAEFFER, 2004).

$$k_f = \frac{F}{A} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (5)$$

onde: F é a força;

A é a área.

$$A = \frac{A_0}{1+\varepsilon} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (6)$$

onde: A_0 é a área inicial;
 ε é a deformação real.

2.5.2 Curva de escoamento

Através de um ensaio de tração uniaxial, é possível obter a variação da tensão de escoamento de um determinado material em função da deformação verdadeira. A tensão de escoamento é um dos parâmetros fundamentais para o processo de conformação mecânica, pois com ela pode-se quantificar a força, o trabalho, o preenchimento da matriz, o desgaste e as tensões na ferramenta, entre outras características do processo (KNOLL; LIMA; SCHAEFFER, 2007).

O método mais correto para determiná-la consiste em descarregar e carregar novamente o corpo de prova na região plástica de deformação, possibilitando a formação de histerese mecânica. O índice de encruamento é um importante indicador das características de encruabilidade dos materiais, pois quanto maior for o número, maior será a encruabilidade deste. O índice pode ser obtido transferindo os dados da tensão de escoamento e da deformação para um diagrama em escala logarítmica.

A deformação verdadeira e curva de escoamento pode ser observada nas equações a seguir (SCHAEFFER, 2004).

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (7)$$

$$kf = C * \varphi^n \quad (8)$$

onde: n é o índice de encruamento;
 C é a constante do material.

$$C = \frac{1}{4} (C_{0^\circ} + C_{45^\circ} + 2 \cdot C_{45^\circ}) \quad (9)$$

$$n = \frac{1}{4} (n_{0^\circ} + n_{45^\circ} + 2 \cdot n_{90^\circ}) \quad (10)$$

2.5.3 Índice de anisotropia

O comportamento anisotrópico das chapas está relacionado com os tratamentos térmicos posteriores utilizados na produção e técnicas de laminação. As peças laminadas apresentam normalmente dois tipos de anisotropia: a anisotropia planar e a normal.

- a) anisotropia planar: resulta das propriedades mecânicas no plano da chapa variarem com a direção em que são medidas, enquanto a tração;
- b) anisotropia normal: surge quando as propriedades segundo a espessura são diferentes das que se obtêm no plano da chapa índice de anisotropia.

Com relação a direção de laminação, a anisotropia apresentará valores diferentes dependendo da posição e direção de onde o corpo de prova foi retirado. O coeficiente de anisotropia planar, fornece uma indicação quantitativa da diferença entre as propriedades nas direções a 45° e nas dos eixos principais de anisotropia (MARTINS; RODRIGUES, 2010).

Para quantificar a anisotropia, define-se o coeficiente de anisotropia normal médio pesando igualmente os coeficientes de anisotropia medidos segundo as direções de 0°, 45° e 90° (MARTINS; RODRIGUES, 2010).

Um material isotrópico, sendo ($r_m = 1$), tem suas propriedades mecânicas iguais em todas as direções. Materiais anisotrópicos com $r_m > 1$, a diminuição da espessura é menor do que a diminuição na largura. Materiais anisotrópicos, em que $r_m < 1$, não apresentam boa estampabilidade, pois para uma mesma solicitação mecânica, uma deformação da espessura será maior que na largura, devido a isso, ocorrerá falha prematura na direção da espessura (SCHAEFFER, 2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo esta apresentada a metodologia dos ensaios experimentais que serão utilizados na caracterização dos materiais, a fim de determinar experimentalmente a análise comparativa da conformabilidade de dois materiais de alta resistência, USI CP 900 e DOCOL DP 1000, submetidos a processo de dobramento. O material USI CP 900 é produzido pela siderúrgica Usiminas e o material DOCOL DP 1000, produto importado, produzido pela SSAB.

A composição química e as propriedades mecânicas estão disponíveis nas tabelas 1 e 2. As informações dos materiais foram coletas em laudos técnicos e catálogos dos fabricantes.

Tabela 1 - Composição química dos materiais a serem analisados

Material	Espessura (mm)	Composição Química (% p/p)				
		C	Mn	Si	Al	S
USI 900 CP	2	0,15	2,13	0,43	0,032	0,002
DOCOL 1000 DP	2	0,18	1,8	0,8	0,0015 – 1,00	0,10

Fonte: Usiminas, SSAB (2019)

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais a serem analisados

Material	Densidade	LE	LR	Al
USI 900 CP	-	700 - 950 Mpa	980 - 1200 Mpa	16%
DOCOL 1000 DP	7,85g/cm ³	700 - 950 Mpa	1000 - 1200 MPa	6%

Fonte: Usiminas, SSAB (2019)

O processo de análise foi dividido em 3 fases:

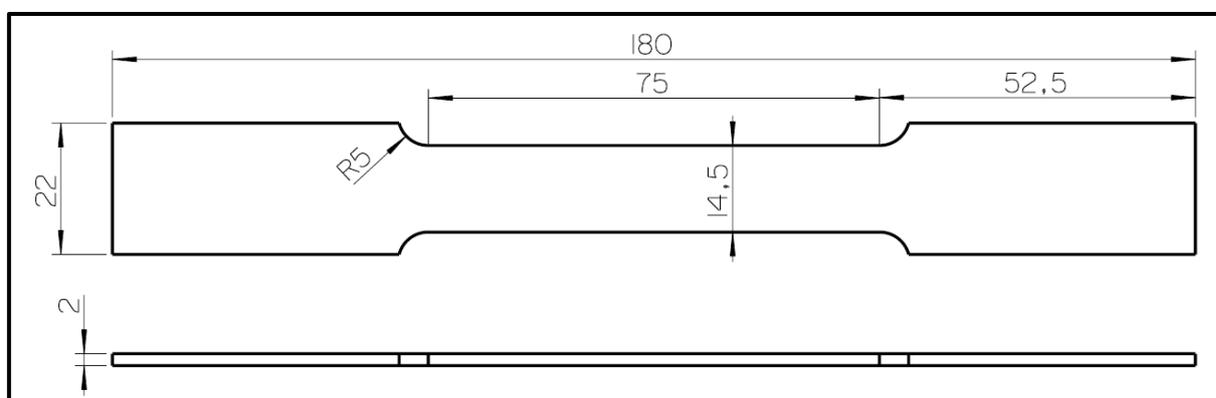
- a) ensaio de tração: Para a caracterização dos materiais com relação a suas propriedades mecânicas;
- b) ensaio de dobramento: Para a caracterização dos materiais no processo de dobramento com a variação de raio de dobra e sentido de laminação;
- c) ensaio metalográfico: Para a caracterização da microestrutura e análise do deslocamento percentual da linha neutra.

3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para realização do ensaio de tração, foi utilizado como base a Norma ABNT 6892 - 2002 que regulamenta as dimensões do corpo de prova, assim como os parâmetros utilizados no ensaio de tração. Os corpos de prova terão as dimensões apresentadas conforme figura 7.

A produção foi a partir da programação de corte a laser levando em consideração os sentidos de laminação: 0, 45 e 90°. Para minimizar a influência térmica gerada no processo de corte, os corpos de prova foram usinados.

Figura 3 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: O autor (2009)

Na caracterização do material empregado neste estudo, foram utilizados dois corpos de prova para determinar a anisotropia e o índice de encruamento e três corpos de prova para determinar o limite de resistência de cada material. No total, foram 12 corpos de prova conforme tabela 5. Os ensaios foram realizados no equipamento disponível no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul. Na figura 8, o ensaio de tração com o extensômetro acoplado no corpo de prova para a determinação da curva tensão x escoamento.

Tabela 3 - Determinação de corpo de prova para ensaio de tração

Material	Dir. Laminação	Corpos de Prova	Ensaio
USI CP 900 / DOCOL DP 1000	0°	2	LR, LE e AI
	45°	2	
	90°	2	

Fonte: o autor (2019)

Tabela 4 - Determinação de corpo de prova para ensaio de tração

Material	Dir. Laminação	Corpos de Prova	Ensaio
USI CP900 / DOCOL DP 1000	0°	2	Índice de encruamento
	45°	2	
	90°	2	

Fonte: O autor (2019)

A partir dos valores coletados da tensão e alongamento na região plástica, pode ser possível identificar o índice de encruamento do material.

Figura 4 - Ensaio de tração com extensômetro

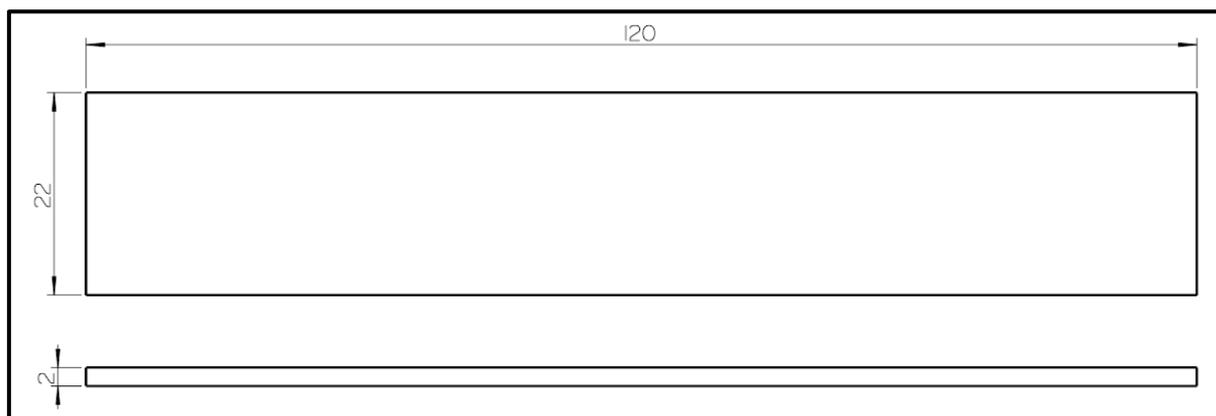


Fonte: O autor (2019)

3.3 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Para o ensaio, será utilizado o processo de dobramento a 90°. Os corpos de prova foram preparados a partir das amostras de chapa com dimensões de 120mmx22mm conforme figura 9. A produção será a partir da programação de corte a laser levando em consideração os sentidos de laminação: 0 e 90°. Para minimizar a influência térmica gerada no processo de corte, os corpos de prova foram usinados.

Figura 5 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de dobramento em V



Fonte: O autor (2009)

Tabela 5 - Determinação de corpo de prova para ensaio de dobramento

Teste	Réplica	Raio do Punção (mm)	Dir. Laminação	Material
1	(1),(2), (3)	4	0°	USI CP 900 / DOCOL DP 1000
2	(1),(2), (3)	8	0°	
3	(1),(2), (3)	12	0°	
4	(1),(2), (3)	17	0°	

Fonte: O autor (2019)

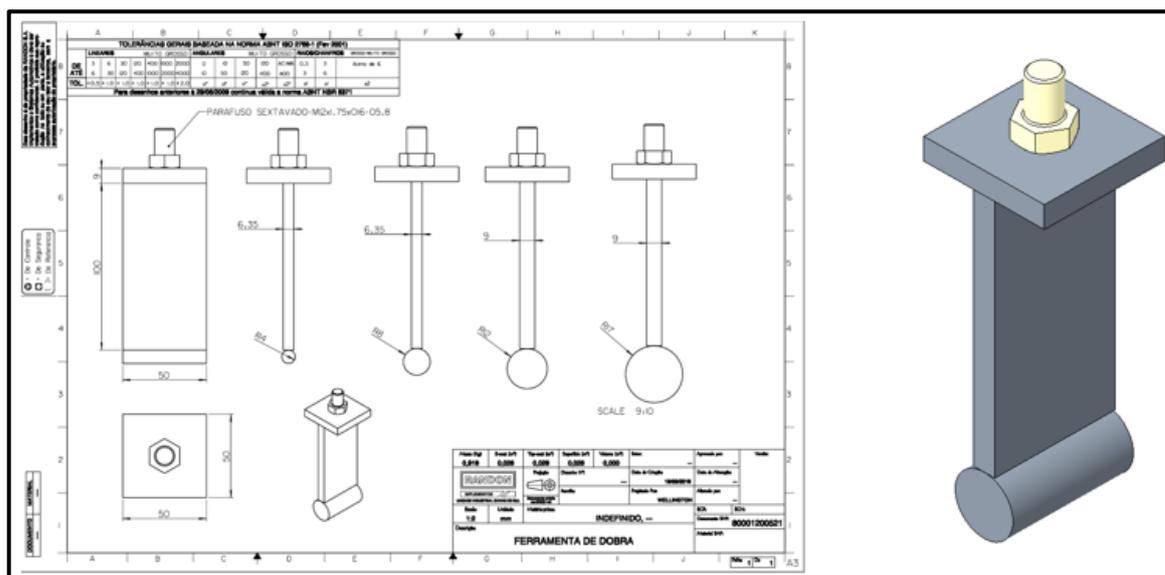
Tabela 6 - Determinação de corpo de prova para ensaio de dobramento

Teste	Réplica	Raio do Punção (mm)	Dir. Laminação	Material
1	(1),(2), (3)	4	90°	USI CP 900 / DOCOL DP 1000
2	(1),(2), (3)	8	90°	
3	(1),(2), (3)	12	90°	
4	(1),(2), (3)	17	90°	

Fonte: O autor (2019)

Para a análise, foram adotadas variações de raios de dobra para a mesma espessura de chapa. Dessa forma, foram desenvolvidas quatro ferramentas de conformação mecânica. A geometria da ferramenta pode ser observada na figura 6. Para a compatibilidade entre máquinas de tração para futuros ensaios, foram criados adaptadores rosqueados. Os pinos correspondentes ao raio dos cutelos foram usinados. Para o ensaio, foram desconsiderados a influência do atrito entre peças dobradas e as ferramentas de dobramento.

Figura 6 - Ferramenta de dobramento



Fonte: O autor (2009)

Os ensaios foram realizados no equipamento disponível no Laboratório de Ensaios Mecânicos da empresa Randon Implementos. Na figura 7, é possível visualizar o punção de raio 8mm acoplado na máquina de tração. Os deslocamentos verticais dos punções foram determinados na régua métrica localizada na lateral do equipamento. Para a determinação do deslocamento correspondente ao ângulo de dobramento de 90°, os valores inicial e final foram estabelecidos a partir da calibração do punção e material a ser dobrado.

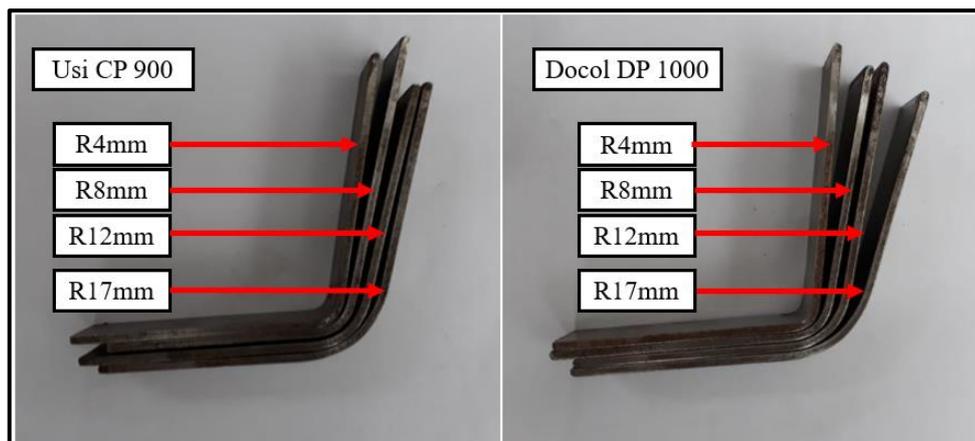
Figura 7 - Ensaio de dobramento utilizando punção com raio de 8mm



Fonte: O autor (2009)

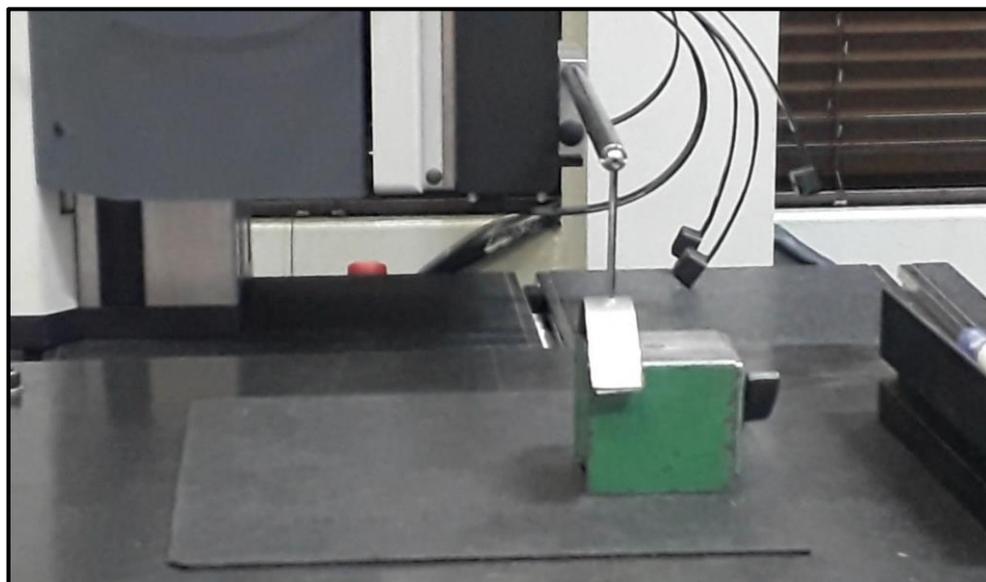
Na figura 8 é possível observar o desvio dimensional das amostras após o processo o processo de dobramento. A medição do retorno elástico foi com base na medição do contorno de superfície, utilizando o equipamento MarTalk disponível no Laboratório de Qualidade da empresa Suspensys. O processo de medição pode ser visualizado na figura 9.

Figura 8 - Comportamento do retorno elástico para amostras de materiais de alta resistência após ensaio de dobramento a 90° - Sentido de laminação – 0°



Fonte: O autor (2019)

Figura 9 - Contorno de superfície para a medição do retorno elástico



Fonte: O autor (2009)

3.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Para o procedimento de análise da microestrutura e da linha neutra, as amostras foram cortadas na região de dobra para as peças com dobramento de 90°, levando em consideração o sentido de laminação, 0° e 90°.

Os ensaios serão realizados conforme as Normas ABNT NBR 13284: 1995, NBR 8108:1983, ABNT NBR 15454. A preparação será feita com o corte da secção transversal das amostras, embutimento, lixamento, polimento seguido de ataque químico, utilizando NITAL 2%.

Tabela 7 - Determinação de corpo de prova para análise metalográfica

Teste	Réplica	Raio do Punção	Dir. Laminação	Material
1	(1),(2), (3)	4mm	0°	USI CP 900 / DOCOL DP 1000
2	(1),(2), (3)	8mm	0°	
3	(1),(2), (3)	12mm	0°	
4	(1),(2), (3)	17mm	0°	

Fonte: O autor (2019)

Tabela 8 - Determinação de corpo de prova para análise metalográfica

Teste	Réplica	Raio do Punção	Dir. Laminação	Material
1	(1),(2), (3)	4mm	90°	USI CP 900 /DOCOL DP 1000
2	(1),(2), (3)	8mm	90°	
3	(1),(2), (3)	12mm	90°	
4	(1),(2), (3)	17mm	90°	

Fonte: O autor (2019)

As análises foram realizadas no equipamento disponível no Laboratório de metrologia da Universidade de Caxias do Sul. As amostras foram cortadas, utilizando para a análise, somente a região da dobra. Na figura 10, é possível observar a amostra e o equipamento utilizado no processo.

Figura 10 - Processo de embutimento das amostras de materiais de alta resistência para ensaios metalográficos



Fonte: O autor (2019)

Para o processo de lixamento, foram utilizadas superfícies com granulação 300, 420, 600 e 1200. No polimento, as amostras foram polidas utilizando pasta diamantada. Na figura 11, equipamentos utilizados no processo.

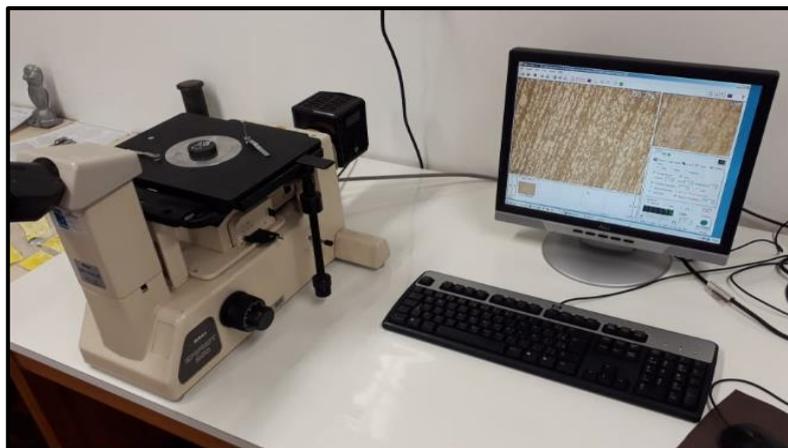
Figura 11 - Processo de lixamento das amostras de aços de alta resistência para ensaios metalográficos



Fonte: O autor (2019)

Após o lixamento, as amostras foram atacadas com solução de Nital 2% com um tempo de imersão de aproximadamente 3 segundos. Para a análise da microestrutura e análise do deslocamento da linha neutra, foi utilizado o equipamento indicado na figura 12. As identificações foram realizadas com a utilização do software instalado no computador. Através das imagens obtidas das amostras, com aproximação microscópica de 500 e 1000X para caracterização da microestrutura. Para análise da linha neutra, foram geradas imagens com 50x de aproximação.

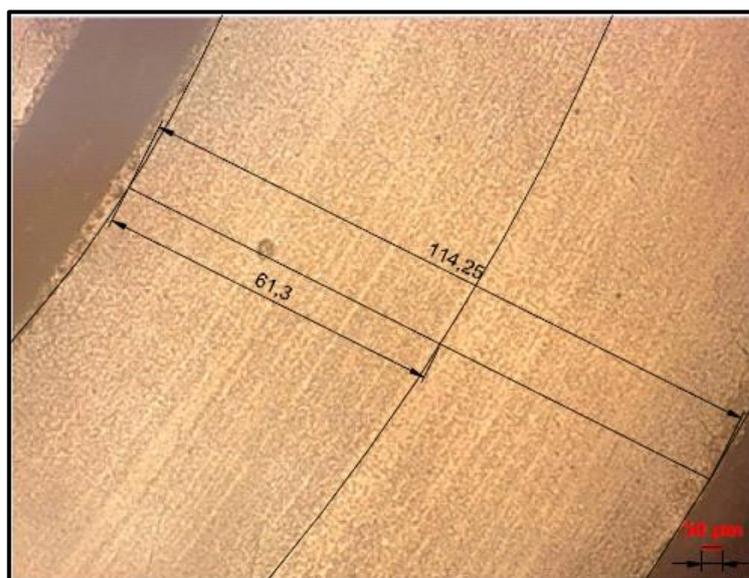
Figura 12 - Análise metalográfica das amostras de aços de alta resistência Usi CP 900 e Docol DP 1000



Fonte: O autor (2019)

Nas medições realizadas utilizando o software CREO, as imagens foram importadas para a função DWG e posteriormente ajustadas em escala. Foram medidas as distancias entre o raio interno e externo na região da dobra. A partir do valor encontrado, foi analisado o desvio percentual do deslocamento da linha neutra a partir do centro entre os raios. Na figura 13, identificação da linha neutra de uma amostra pertencente a este trabalho.

Figura 13 - Análise do deslocamento da linha neutra após ataque superficial



Fonte: O autor (2019)

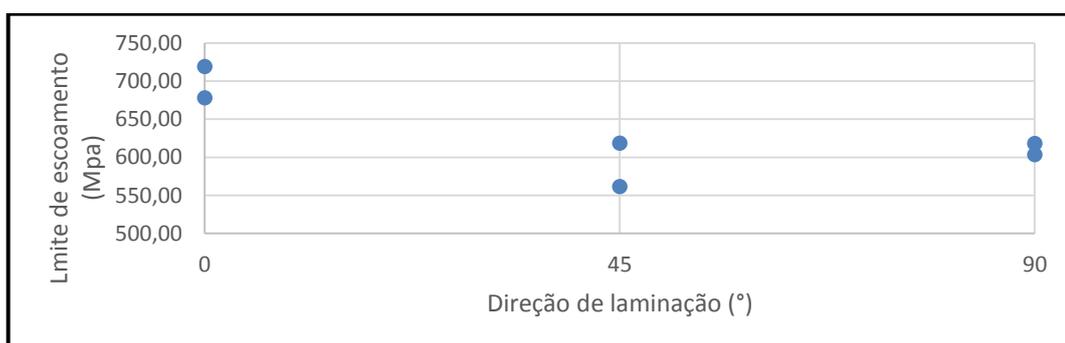
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios propostos no capítulo anterior.

4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

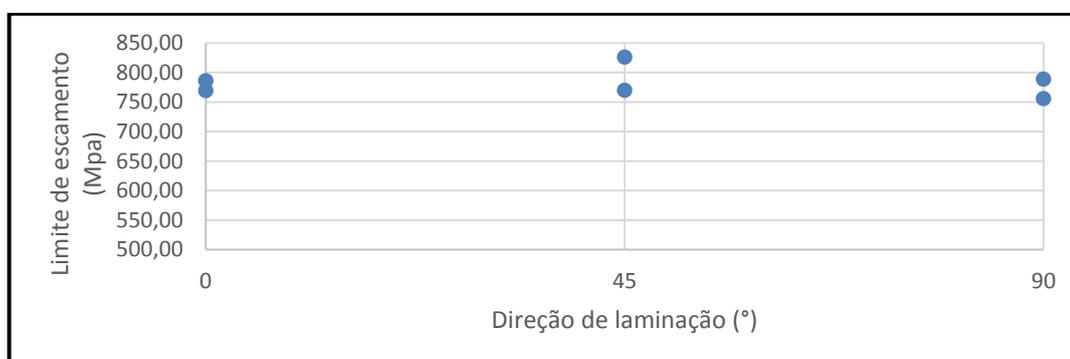
Os ensaios de tração fornecem as propriedades mecânica do material. É possível identificar o limite de escoamento, limite de resistência máximo e o alongamento. A partir de cálculos específicos, podemos definir o índice de encruamento. Os corpos de prova foram realizados a partir de 0, 45 e 90° em relação a direção de laminação da chapa. Nas figuras 14 e 15, é possível observar o comportamento do material USI CP 900 e DOCOL DP 1000 com relação ao limite de escoamento.

Figura 14 - Limite de escoamento do material USI CP 900



Fonte: O autor (2019)

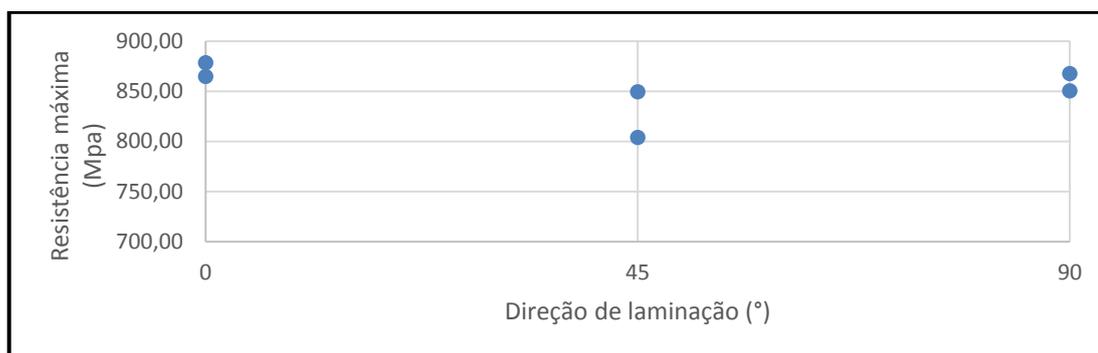
Figura 15 - Limite de escoamento do material DOCOL DP 1000



Fonte: O autor (2019)

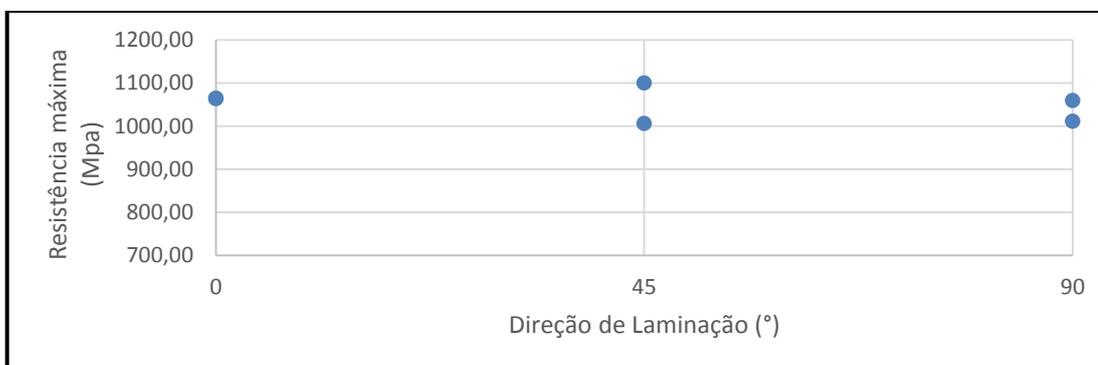
Para o grupo de amostras analisadas, o material USI CP 900 apresentaram limite de escoamento semelhante ao informado pelo fabricante no sentido de laminação a 0°. Para o sentido de laminação 45 e 90°, os valores foram inferiores comparados com a tabela 2. Para o material DOCOL DP 1000, os limites de escoamento apresentaram valores semelhantes ao informado pelo fabricante para todos os sentidos de laminação. Podemos destacar neste material, a baixa variação de valores entre o sentido de laminação 0, 45 e 90°.

Figura 16 - Resistência máxima do material USI CP 900



Fonte: O autor (2019)

Figura 17 - Resistência máxima do material DOCOL DP 1000



Fonte: O autor (2019)

Nas figuras 16 e 17 estão apresentadas o comportamento dos materiais com relação a resistência máxima. O material USI CP 900 apresentou nenhuma semelhança com os valores apresentados pelo fabricante, disponível na tabela 1. Podemos destacar no sentido de laminação a 45° onde apresentaram resistência máxima inferior comparado com os demais sentidos de laminação. Para o material DOCOL DP 1000, as resistências máximas apresentaram valores semelhantes ao informado pelo fabricante para todos os sentidos de laminação. Podemos destacar neste material, a baixa variação de valores entre o sentido de laminação 0, 45 e 90°.

Com relação ao alongamento, o material USI CP 900 apresentou alongamento inferior comparado com o informado pelo fabricante. O alongamento foi 3% inferior do que o informado na tabela 1. Para o material DOCOL DP 1000, as amostras apresentaram alongamento superiores ao informado pelo fabricante.

Com relação às propriedades informadas e experimentais dos materiais analisados, podemos destacar o material USI CP 900. As diferenças de valores encontrados podem estar associadas ao processo de fabricação e a microestrutura do material. Mesmo considerando os limites mínimos de ensaios e laudos pesquisados, o material apresenta valores abaixo do esperado. O fato do material apresentar baixa demanda nacional possivelmente pode contribuir para esta situação. As diferenças de propriedades mecânicas podem ser comparadas com o estudo realizado por Lajarian(2012). No estudo, foram analisados aços de alta resistência DP350/600, DP 450/780, DP 750/980 e HSLA 420/490 no processo de embutimento. Para os ensaios experimentais foram utilizadas amostras de chapas dimensão de 100 mm de comprimento, 12 mm de largura e espessuras, que variaram de 1.5 à 2 mm. De acordo com os resultados após ensaios, os aços avançados de alta resistência tiveram redução no módulo de elasticidade conforme o limite de resistência. O aço TRIP 450/780 é o aço que apresentou o maior limite de resistência entre os materiais ensaiados e a maior redução no módulo de elasticidade. O aço DP350/600 da Usiminas apresentou menor retorno elástico. Neste estudo, podemos destacar que aços produzidos por diferentes fabricantes podem ter composições e comportamentos significativamente diferentes. Como exemplo, o DP350/600 da Usiminas apresentou retorno elástico abaixo do esperado comparado ao DP350/600 da ArcelorMittal. De acordo com o autor, há uma diferença na microestrutura, podendo haver a presença de outra fase ou microconstituente. Os resultados dos ensaios para obtenção do limite de escoamento, resistência máxima e alongamento estão disponíveis nas tabelas de resultados apresentados no apêndice A.

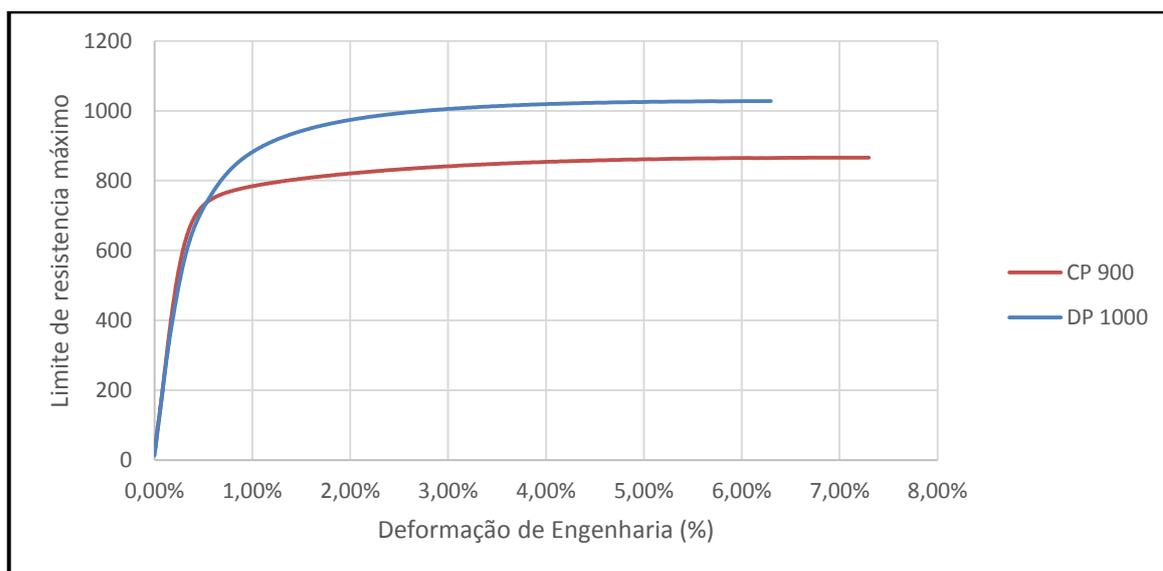
O fator de encruamento é responsável por determinar a encruabilidade do material. Quanto maior for este índice, maior será o ganho de resistência do material na conformação. Na figura 18, podemos verificar as curvas geradas durante ensaio de tração com o auxílio de extensômetro. O material DOCOL DP 1000 atingiu o ponto máximo de resistência a 1027 Mpa em 6,30% de alongamento e o material USI CP 900, 865 Mpa e alongamento 7,30%. Para a comparação, foi utilizado a amostra 1 para USI CP 900 e amostra 3 para o DOCOL DP 1000.

As equações das curvas de escoamento estão disponíveis no apêndice B.

Para a determinação da equação da curva, foram levados em consideração as deformações entre o limite de escoamento até a resistência máxima. As deformações posteriores

as resistências máximas foram desconsideradas. O material USI CP 900, a partir do ajuste numérico, apresenta o índice de encruamento (n) igual a 0,080, e o material DOCOL DP 1000, igual 0,1132. O coeficiente de resistência do material USI CP 900 é de 1102,82 e do material DOCL DP 1000, 1438,02. Os resultados da análise numérica do índice de encruamento com relação a direção de laminação estão disponíveis no apêndice C.

Figura 18 - Curva comparativa da Tensão x Escoamento para os aços de alta resistência Usi CP 900 e Docol DP 1000



Fonte: O autor (2019)

O ganho de resistência devido ao encruamento foi de 200Mpa para ambos os materiais. De forma quantitativa, o material USI CP 900 apresentou índice de encruamento 27% menor comparado com o material DOCOL DP 1000. Para o coeficiente de resistência, o material USI CP 900 apresentou resultado 23% menor. Em estudos realizados, é possível estimar o retorno elástico considerando a inclinação da curva tensão-deformação e a equação de Hollomon. Dessa forma, é esperado que o material Docol DP 1000 tenha maior retorno elástico na conformação mecânica.

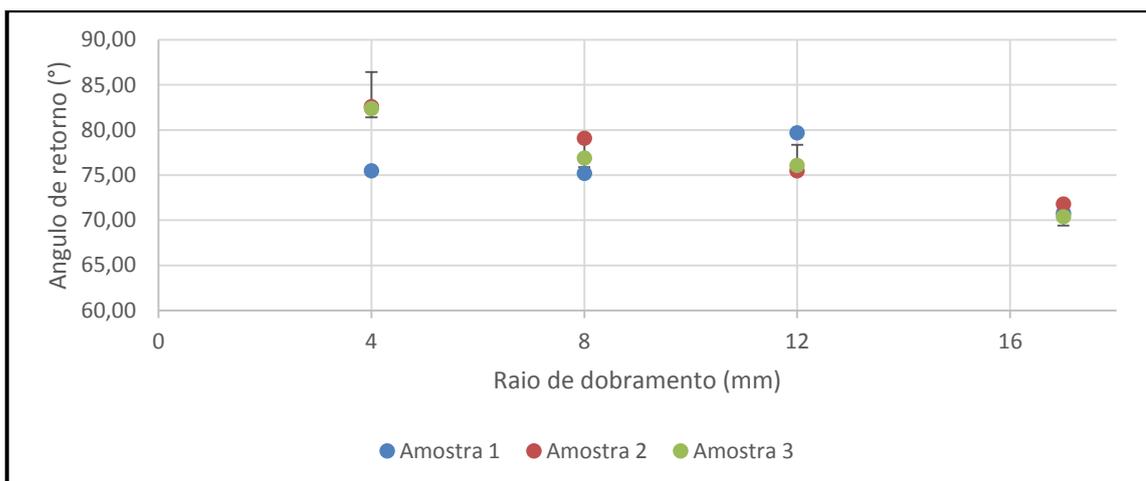
4.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento foi realizado a partir de amostras cortadas do mesmo blank mas em posições diferentes com relação ao ângulo de laminação. Não foram levadas em consideração o atrito entre o punção a base de apoio. Os resultados dos ensaios com relação as

amostras após o dobramento a 90° com relação ao raio de dobramento, sentido de laminação e ângulo de retorno estão disponíveis nas tabelas de resultados no apêndice D.

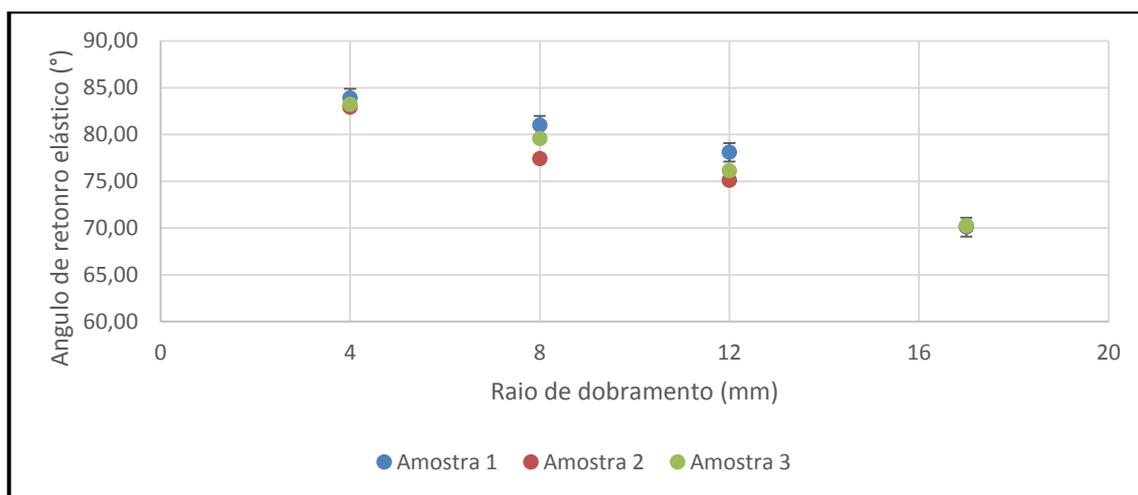
Para o material USI CP 900, o comportamento do ângulo de retorno elástico com relação ao sentido de laminação pode ser observado nas figuras 19 e 20.

Figura 19 - Resultados do retorno elástico das amostras após processo de dobramento a 90° do material USI CP 900 – Sentido de laminação – 0°



Fonte: O autor (2019)

Figura 20 - Resultados do retorno elástico das amostras após processo de dobramento a 90° do material USI CP 900 – Sentido de laminação – 90°



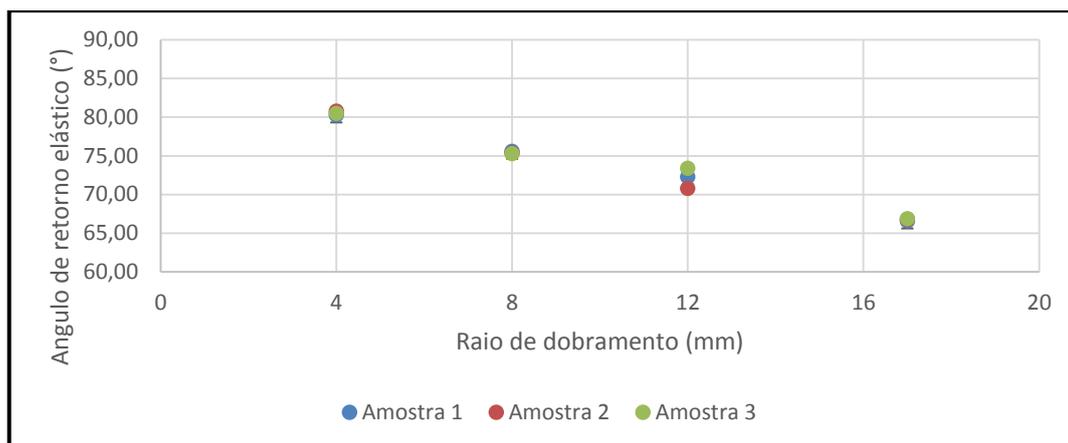
Fonte: O autor (2019)

Para o grupo de amostras analisadas, o material USI CP 900 apresentou menor desvio padrão entre o ângulo de retorno no dobramento com punção de raio 17mm. Para as amostras com sentido de laminação a 90° , o menor desvio padrão foi com o punção de raio 4 e 17mm.

Com relação a variação do raio de dobramento, as amostras dobradas com punção de raio 4mm a 0° do sentido de laminação apresentaram menor retorno elástico.

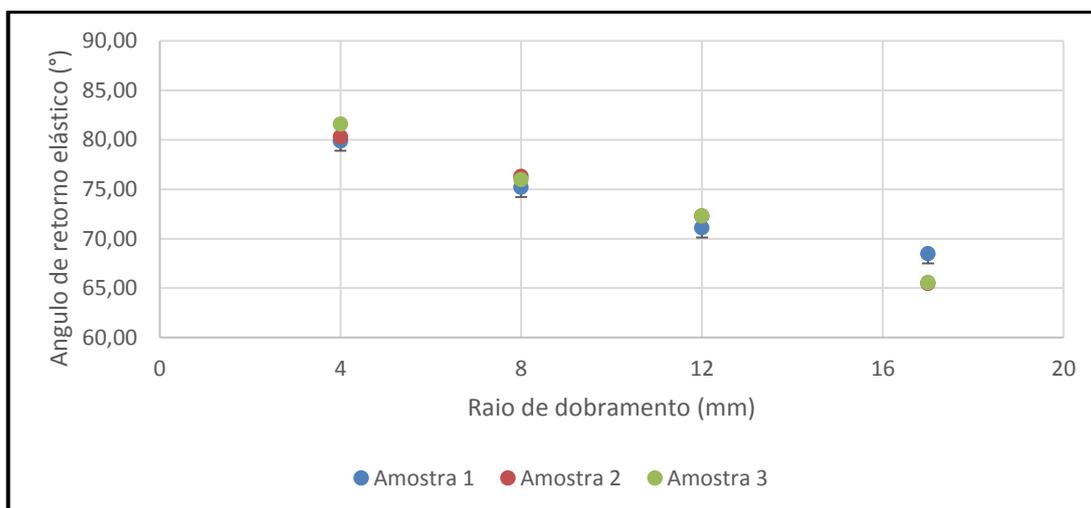
Para o material DOCOL DP 1000, de acordo com as figuras 21 e 22, o ângulo de retorno com relação ao sentido de laminação.

Figura 21 - Resultados do retorno elástico das amostras após processo de dobramento a 90° do material DOCOL DP 1000 – Sentido de laminação – 0°



Fonte: O autor (2019)

Figura 22 - Resultados do retorno elástico das amostras após processo de dobramento a 90° do material DOCOL DP 1000 – Sentido de laminação –90°



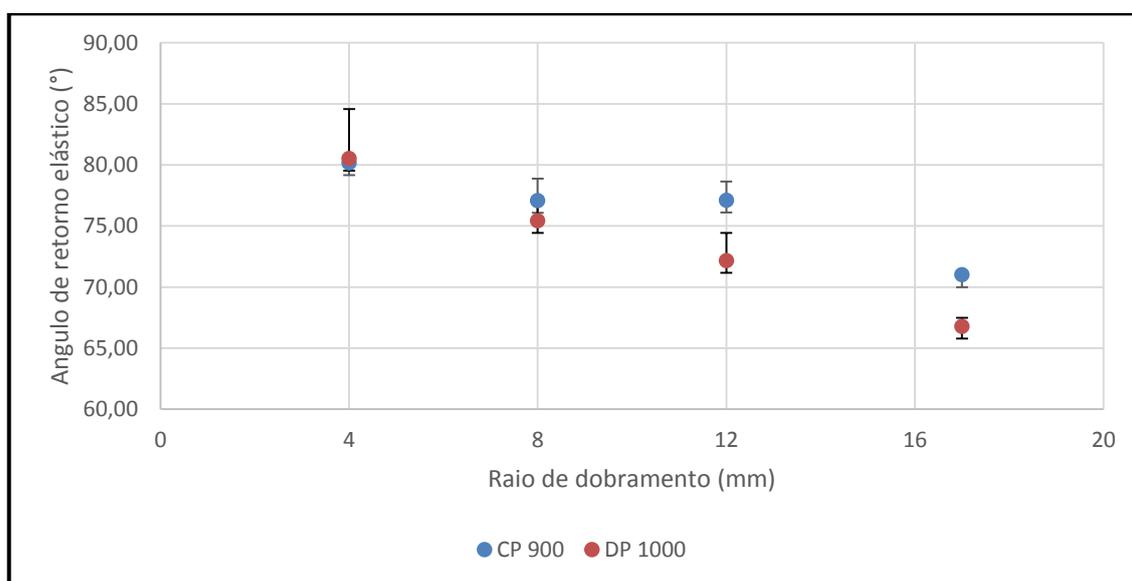
Fonte: O autor (2019)

Para o grupo de amostras analisadas, o material DOCOL DP 1000 apresentou maior desvio padrão entre o ângulo de retorno no dobramento com o punção de raio 12mm. Para os cutelos de raio 4, 8 e 12mm, os desvios são semelhantes. Nas amostras com sentido de laminação a 90°, os maiores desvios padrão foram no cutelo com raio de 17mm. Com relação

a variação do raio de dobramento, as amostras dobradas com punção de raio 4mm a 90° do sentido de laminação apresentaram menor retorno elástico.

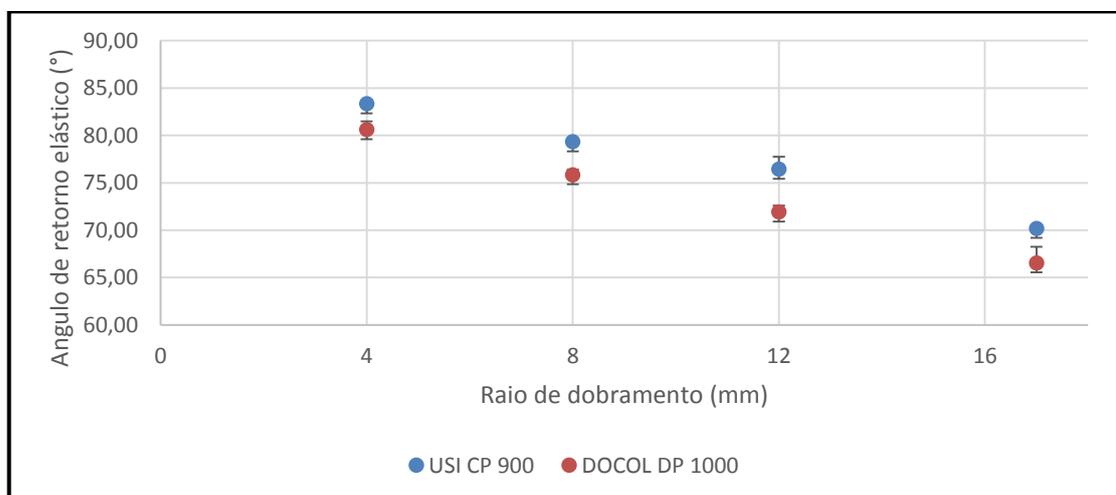
Para a comparação entre os materiais, foi relacionado as médias entre o ângulo de retorno elástico em função do raio de dobramento de acordo com o sentido de laminação. As bases de análise estão disponíveis nas tabelas de resultados no apêndice D. Nas figuras 23 e 24, o retorno elástico de modo comparativo entre o material USI CP 900 e DOCOL DP 1000.

Figura 23 - Análise comparativa das médias do fator de retorno elástico para os materiais de alta resistência USI CP 900 e DOCOL DP 1000. Sentido de laminação – 0°



Fonte: O autor (2019)

Figura 24 - Análise comparativa das médias do fator de retorno elástico para os materiais de alta resistência USI CP 900 e DOCOL DP 1000. Sentido de laminação – 90°



Fonte: O autor (2019)

As amostras do material USI CP 900 e DOCOL DP 1000 no sentido de laminação a 0° , apresentam retorno elástico semelhantes para o dobramento utilizando cutelo de raio 4 e 8mm. A diferença de comportamento ocorre a partir do cutelo de 8mm. Nenhuma das amostras dobradas a 90° apresentou comportamentos semelhantes. Dessa forma, é possível observar a diferença de comportamento dos materiais. As amostras do material USI CP 900 apresentam menores ângulos de retorno elástico em todos os raios de dobramento.

Para determinar o fator de retorno elástico de forma experimental, devemos determinar a razão entre o ângulo encontrado com o ângulo desejado, conforme equação 12. Como o fator de retorno elástico leva em consideração o ângulo de retorno e a espessura do material, a espessura foi considerada como constante. Dessa forma, o fator de retorno elástico é em função da variação do raio de dobramento. O material USI CP 900 e DOCOL DP 1000 apresentaram resultados semelhantes com relação ao K_s para o menor raio de dobramento. A diferença pode ser observada com o aumento do raio de dobramento. Correlacionado com os limites de escoamento e índice de encruamento, para as amostras analisadas, o retorno elástico é maior para o material DOCOL DP 1000 conforme aumento do raio de dobramento no sentido de laminação a 0 e 90° . Os resultados das análises estão disponíveis nas tabelas do apêndice E.

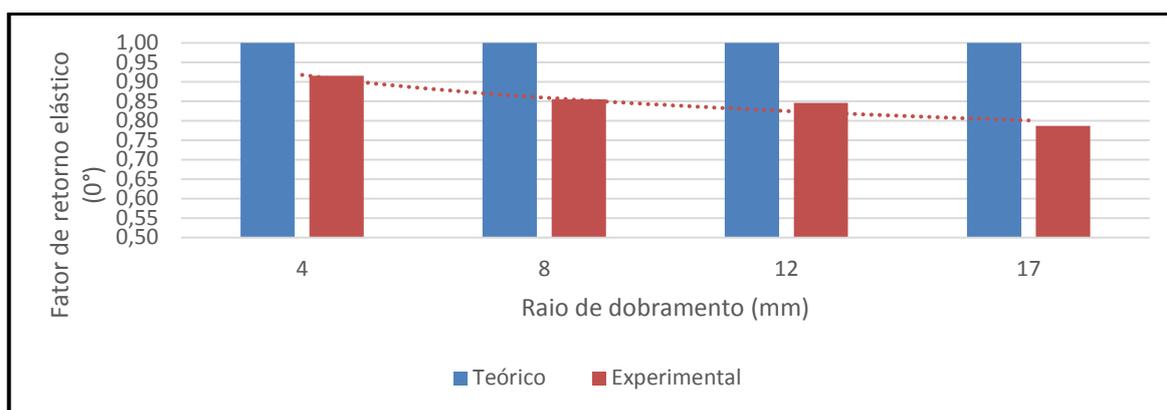
Os resultados dos ângulos de retorno elástico foram analisados estatisticamente utilizando a ferramenta de análise de variância teste t de Student com distribuição bicaudal. As análises estão disponíveis no apêndice G. Para determinação, foi levando em consideração os números de amostras para cada grupo de análise. Os ângulos de retorno para os materiais de alta resistência USI CP 900 e DOCOL DP 1000 são estatisticamente iguais para os raios de dobramento de 4, 8, 12 e 17mm no sentido de laminação a 90° . Para o sentido de laminação 0° , são estatisticamente iguais para os raios de dobramento de 4, 8, 12mm. A única amostra que apresentou diferença entre materiais foi no dobramento com raio de 17mm no sentido de laminação 0° . Para que de fato seja possível indicar a igualdade ou diferença no retorno elástico, é necessária quantidade maior de amostras a serem analisadas.

Na previsão teórica do fator de retorno elástico e o ângulo para chapas metálicas, foram considerados os valores médios das forças de dobramento e a equação 10. No cálculo, o módulo de elasticidade, força de dobramento e espessura é levando em consideração. Nas figuras 25 e 26, a análise comparativa entre a previsão teórica e o experimental do fator de retorno elástico para o mesmo sentido de laminação.

Conforme análise comparativa entre os materiais de alta resistência USI CP 900 e DOCOL DP 1000, com base nos dados experimentais e teóricos, não é possível a utilização da equação 10 para previsão do retorno elástico de materiais de alta resistência analisados neste

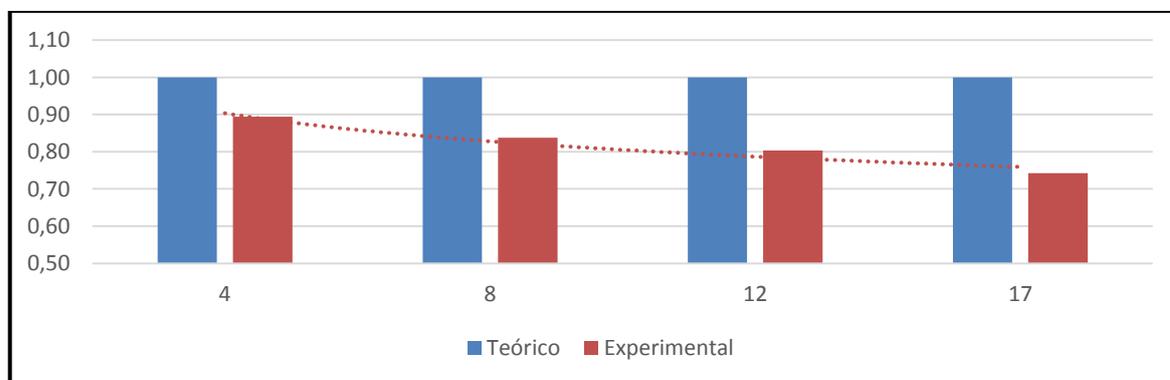
trabalho. A diferença entre o experimental e teórico é de aproximadamente 8 a 22% em função da variação do raio de punção para o material USI CP 900. Para o material DOCOL DP 1000, a diferença entre o experimental e teórico é de aproximadamente 10 a 27%.

Figura 25 - Análise comparativa do fator de retorno elástico do material USI CP 900 - Sentido de laminação - 0°



Fonte: O autor (2019)

Figura 26 - Análise comparativa do fator de retorno elástico do material DOCOL DP 1000 - Sentido de laminação - 0°



Fonte: O autor (2019)

Os resultados podem ser comparados com estudo realizado por Martins (2013), onde as equações do livro *Conformação Mecânica – Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação* não se aplicam para os aços de alta resistência bifásicos, pois possuem um erro na previsão do retorno elástico com relação aos valores medidos experimentalmente. O material que apresentou o maior erro na previsão do retorno elástico foi o DP 800. As fórmulas apresentam erros relativos de 8% para o aço DP 600 e de 15% para o aço DP 800. O autor realizou uma comparação entre a previsão numérica x ensaio experimental do retorno elástico para tiras de aço DP 600 e DP 800. O estudo foi efetivado com base nas formulas tradicionais e em ensaios

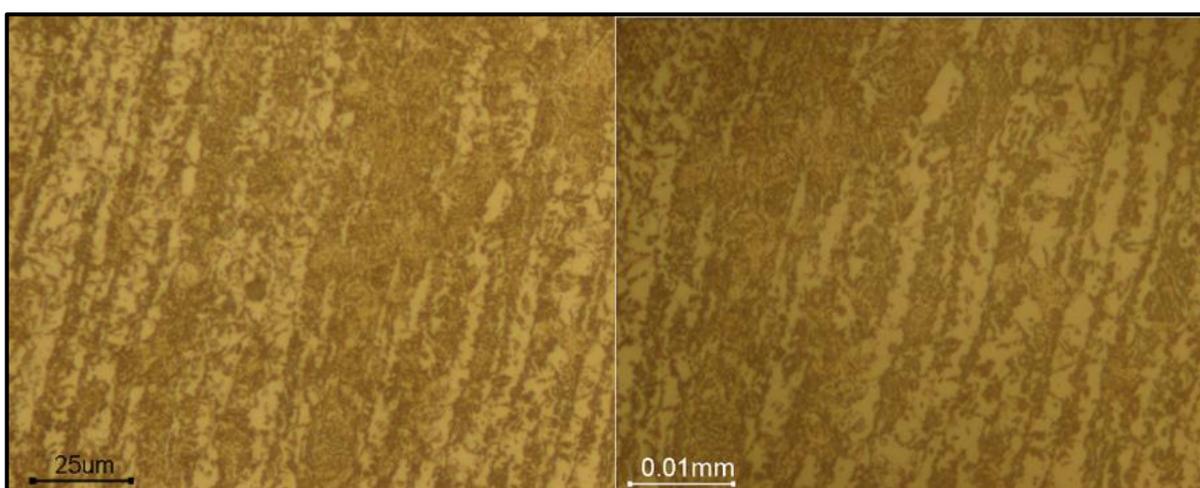
experimentais de dobramento. Os corpos de prova tinham 80x20mm com espessura de 1 mm. Estes procedimentos foram realizados em uma máquina universal para ensaio mecânico com cinco corpos de prova para cada material.

4.3 ENSAIO METALOGRAFICO

Na Tabela 1, foram apresentadas as composições químicas com as concentrações máximas de elementos de liga dos materiais ensaiados. As composições químicas foram adquiridas de acordo com laudos e catálogos dos fabricantes. É possível observar o percentual de carbono combinados com elementos de liga. Os materiais de alta resistência têm como principais elementos de liga, o carbono, manganês, silício e cromo. O carbono tem como objetivo a distribuição de fases. O manganês, estabilizar a austenita e retardar a transformação em perlita no resfriamento. O silício acelera a formação da ferrita. Nos dois materiais, os principais elementos estão presentes porem com frações diferentes. O material USI CP 900 apresentou maior percentual de manganês e enxofre. O material Docol DP 1000 apresentou maior percentual de carbono, silício e fósforo.

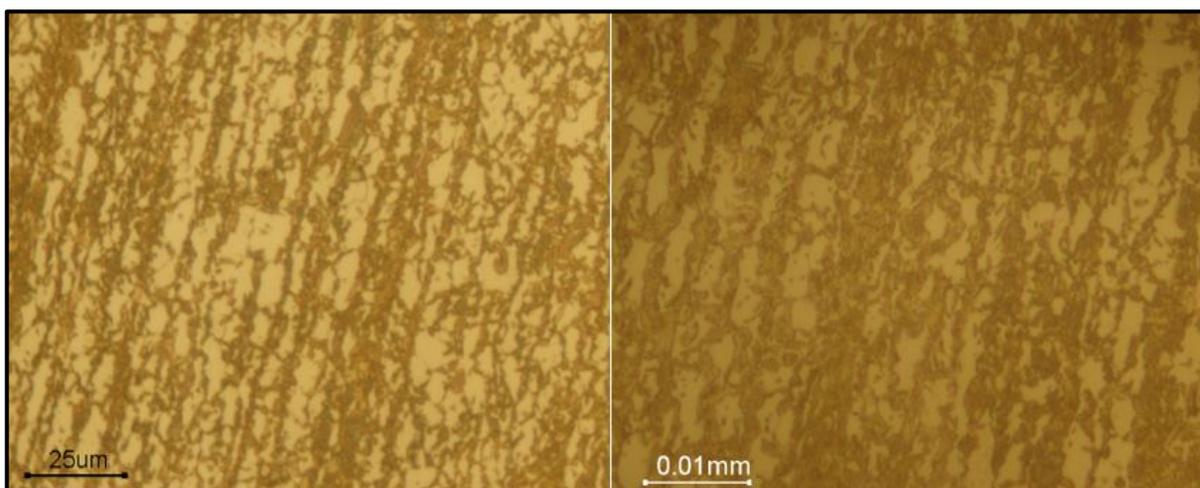
Na figura 27 e 28, estão apresentadas a microestrutura dos materiais de alta resistência USI CP 900 e DOCOL DP 1000 após ataque químico. As imagens das amostras foram ampliadas a 500 e 1000 vezes.

Figura 27 - Análise metalográfica do material de alta resistência USI CP 900



Fonte: O autor (2019)

Figura 28 - Análise metalográfica do material de alta resistência DOCOL DP 1000



Fonte: O autor (2019)

O ataque químico com NITAL 2% mostrou-se ineficiente para a caracterização da martensita e bainita. Podemos observar existência de duas fases nos dois materiais. As amostras podem ser comparadas com o trabalho de Faria Neto (2015), onde foram analisados os aços DP 600 e DP 780 com relação a microestrutura. É possível diferenciar fases claras, ferrítica, e fases escuras, martensítica. Caso houver austenita retida, poderá estar presente na fase clara. Caso houver bainita, poderá estar presente na fase mais escura, junto com a martensita.

Com relação as amostras analisadas, o material USI CP 900 apresenta microestrutura em dispersão conforme figura 28. De acordo com o a literatura, este modelo de microestrutura garante a ductilidade e conformabilidade do material.

Para Wein Gan (2006) no estudo dos efeitos da microestrutura para materiais de alta resistência, os aços produzidos por diferentes fabricantes podem ter composições significativamente diferentes. Os efeitos microestruturais devem ser considerados para o sucesso da simulação de ambas as distribuições de tensão após a formação. Na análise, foram adotadas amostras de chapas de aço DP 780 e TRIP 780 com espessuras de 1,58 e 1,45 mm. Os testes de dobramento foram realizados utilizando o equipamento Interlaken a 90°. É possível destacar também que a variação de propriedade de espessura pode interferir dramaticamente na previsão do retorno elástico, os ângulos de retorno previstos mudam em mais de 20% após a consideração das variações de propriedade. Portanto, a variação de propriedade de espessura é um dos fatores que afetam a modelagem do retorno elástico e sua previsão.

Figura 29 - Linha neutra de materiais de alta resistência



Fonte: O autor (2019)

Os deslocamentos teóricos e experimentais da linha neutra apresentaram valores percentuais semelhantes. O mesmo pode ser considerado com relação ao sentido de laminação. Para os dois materiais a linha neutra se deslocou para a região de tração. Este mesmo comportamento pode ser comparado no estudo realizado por Santos (2013). No estudo, foram analisados o deslocamento da linha neutra de materiais HSLA450, TRIP800 e DP800 levando em consideração a variação de força de dobramento.

De acordo com a tabela 31 e 32 disponível no apêndice H, o maior deslocamento percentual da linha neutra ocorre quando os materiais são conformados com o cutelo de raio 4mm. Considerando a força e raio de dobramento, a linha neutra deslocou 9% para a região de compressão. O deslocamento percentual tende a 0 no aumento do raio de dobramento. A degradação do deslocamento percentual era esperando conforme aumento do raio de dobramento. Devido a equívocos gerados na identificação das amostras durante o processo de embutimento, as amostras a partir do raio de 17mm de dobramento foram desconsideradas para a análise de deslocamento da linha neutra.

De acordo com a literatura, estima-se que a linha neutra de uma peça submetida ao processo de dobramento deve permanecer com o mesmo comprimento durante e após a dobra. No processo, há fenômenos indesejados como a variação de espessura onde a distribuição de deformações e tensões no dobramento não é constante. Em virtude da característica particular da microestrutura de aço AHSS, transformações podem ser induzidas na região de tração e compressão, causando assim comportamento diferente comparado com os aços convencionais. Em virtude disso, é necessário utilizar outros métodos experimentais para a análise da linha neutra.

5 CONCLUSÃO

Conforme proposto, todos os objetivos inicialmente previstos foram alcançados. Foram efetuados ensaios de caracterização dos materiais, assim como ensaios de dobramento e metalográfico. Com base nas análises experimentais, é possível concluir que:

- a) O material DOCOL DP 1000 apresenta maior resistência e maior índice de encruamento. O material USI CP 900 apresenta menor limite de escoamento e maior alongamento comparado ao material DOCOL DP 1000. Considerando as informações disponíveis de laudos, o material USI CP 900 apresenta propriedades mecânicas abaixo do esperado e com elevada amplitude entre as amostras. Esta situação pode ser caracterizada com inviabilidade técnica.
- b) O elevado retorno elástico é constatado para os materiais USI CP 900 e DOCOL DP 1000 comparado com aços comuns. Os dois materiais apresentaram maior fator de retorno elástico com o menor raio de dobramento. Com relação a variação do raio de dobramento, o material com menor limite de escoamento e menor índice de encruamento apresentou menor retorno elástico. É notável o desvio dimensional a partir dos ensaios experimentais. Mesmo utilizando previsão teoria por meio de equações, a previsão do retorno elástico é imprecisa. O desvio dimensional tende a aumentar a medida que o raio de dobramento aumenta;
- c) Com base na análise estatística, não é possível concluir a diferença entre o material USI CP 900 e DOCOL DP 1000 com relação ao retorno elástico no processo de dobramento. Para que de fato seja possível a substituição de um material, é necessário aumentar a quantidade de amostras para análise.
- d) Considerando a força e raio de dobramento, o maior deslocamento percentual da linha neutra ocorre com o menor raio de dobramento. Sendo que a redução do deslocamento percentual ocorre com aumento do raio de dobramento;
- e) De modo geral, a partir dos ensaios experimentais, o material DOCOL DP 1000 apresenta maior confiabilidade e repetitividade com relação a propriedades mecânicas e ao retorno elástico no processo de dobramento.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a influência da velocidade de conformação e atrito na previsão do retorno elástico para materiais de alta resistência CP 900 e DP 1000.

Avaliar o retorno elástico variando o ângulo de dobramento para os materiais de alta resistência CP 900 e DP 1000.

Avaliar o retorno elástico na conformação de peças com geometrias complexas para materiais de alta resistência CP 900 e DP 1000.

Utilizar microscópio eletrônico de varredura para caracterização da microestrutura dos materiais de alta resistência CP 900 e DP 1000.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, S. L., TAISS, J. M., ROSA, L. K. **O aço no automóvel do futuro**. In: 57º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002, São Paulo, Anais. São Paulo, Julho 2002.

ARAÚJO, Daniele Dias. **Estudo do Springback na conformação mecânica de segmentos toroidais em chapas grossas**. Dissertação de mestrado, 2007.

BRESCIANI FILHO, Ettore et al. **Conformação Plástica Dos Metais**. 6. ed. Campinas: Epusp, 2011.

BHADESHIA, H.K.F.H.; HONEYCOMBE R, R.W.K; **Steels: Microstructure and Properties**. Volume IV, Oxford, 2017.

B. T. Hang Tuah b. Baharudin , Mohd Khairol Anuar and Mohd Idris Shah b. Ismail; **Effect of elastic module degradation measurement in different sizes of the nonlinear isotropic-kinematic yield surface on springback prediction**. Department of Mechanical Engineering. Artigo publicado em maio de 2019.

CALLISTER; W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 7ª edição, 2009.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. Volume II, 2ª edição, 1986: Editora Makron Books.

FARIA NETO, Antonio dos Reis de; **Aços avançados de alta resistência: Avaliação da microestrutura e propriedades dos aços DP600 e DP 780**. Dissertação, Universidade Estadual Paulista, Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.

DEMERI, Mahmoud Y. **Advanced high-strength steels: chapter 5. Dual-Phase Steels**. USA, 2013.

GORNI, A. A. **Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas**. 5º Congresso de corte e conformação de metais, Aranda Eventos, São Paulo, 2009.

H, Lima. **Time-dependent springback of advanced high strength steels**, Artigo publicado em abril 2011.

LAJARIN, S. F. **Influência da variação do modulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2012.

MARTINS, M. S; SCHAEFFER, L. **Avaliação do retorno elástico em chapas de aço bifásicos através do processo de dobramento** Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127900>>.

M,Pereira, B.F Rolfe, M.Dingle, P.D. Hodgson; **Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis**. Journal of materials processing technology 203 (2008) 129–136. Artigo publicado 2008.

PALMEIRA, Alexandre Alvarenga. **Processos de dobramento e calandragem**, 2005.

SANTOS, Ricardo Adriano dos. **Influência da força pós dobra e da geometria da ferramenta no retorno elástico em processos de dobramento de aços de alta resistência**. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013

SCHAEFFER, L. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. **SSAB; Aço DP avançado de alta resistência para conformação e soldagem**. Disponível em: <<http://usiminas.com/wp-content/uploads/2014/02/novo-laminados-frio-v20-baixa.pdf>> Acessado em: 31 ago. 2018.

SILVA, Érika Aparecida da; **Estudo do efeito springback em aços avançados de alta resistência aplicados a indústria automobilística**. Tese Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SSAB; **Bending of high strenght steel**. Disponível em: <<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:XkwxZFQhQm0J:https://ssabwebsites.azureedge.net/-/media/files/en/general-multibrand/912-en-bending-of-high-strength-steel.pdf%3Fm%3D20151126081119+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>>. Acesso em: 06 set. 2018.

USIMINAS; **Laminados a frio**. Disponível em: <<http://usiminas.com/wp-content/uploads/2014/02/novo-laminados-frio-v20-baixa.pdf>>. Acesso em 31 ago. 2018.

WEIN GAN,S.S.BABU; **Microstructural effect on the springback of Advanced hight-Strenght Steel**. Artigo publicado em novembro 2006.

WAGONER, R.H.; WANG, J.F.; LI, M. **Springback, Chapter in ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming**. ASM, Materials Park, OH, p. 733–755, 2006

WAGONER, R.H.; LIM, H.; LEE, M.G. **Advanced Issues in springback**. International Journal of Plasticity,2013.

World Auto Steel. **Advanced high strength steel application guidelines**. Disponível em: <www.worldautosteel.com>.

**APÊNDICE A - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO PARA OS MATERIAIS
USI CP 900 E DOCOL DP 1000**

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de tração para o limite de escoamento do material USI CP 900

Amostra	Direção de laminação (°)	Limite de escoamento (Mpa)	Limite de escoamento médio (Mpa)	Desvio padrão
Amostra 1	0	678,49	698,89	28,85
Amostra 2		719,29		
Amostra 3	45	561,45	589,99	40,35
Amostra 4		618,52		
Amostra 5	90	618,29	610,99	10,32
Amostra 6		603,70		

Fonte: O autor (2019)

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de tração para a resistência máxima do material USI CP 900

Amostra	Direção de laminação (°)	Resistência máxima (Mpa)	Resistência máxima média (Mpa)	Desvio padrão
Amostra 1	0	864,97	871,77	9,62
Amostra 2		878,57		
Amostra 3	45	803,98	826,82	32,31
Amostra 4		849,67		
Amostra 5	90	867,78	859,20	12,14
Amostra 6		850,62		

Fonte: O autor (2019)

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de tração para o limite de escoamento do material USI CP 900

Amostra	Direção de laminação (°)	Resistência máxima (Mpa)	Resistência máxima média (Mpa)	Alongamento total (%)	Média do alongamento total (%)
Amostra 1	0	864,97	871,77	12,92	13,17
Amostra 2		878,57		13,42	
Amostra 3	45	803,98	826,82	11,53	10,89
Amostra 4		849,67		10,25	
Amostra 5	90	867,78	859,20	12,60	12,07
Amostra 6		850,62		11,54	

Fonte: O autor (2019)

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de tração para o limite de escoamento do material
DOCOL DP 1000

Amostra	Direção de laminação (°)	Limite de escoamento (Mpa)	Limite de escoamento médio (Mpa)	Desvio padrão
Amostra 1	0	769,30	777,69	11,87
Amostra 2		786,08		
Amostra 3	45	825,89	797,72	39,83
Amostra 4		769,56		
Amostra 5	90	755,82	772,17	23,12
Amostra 6		788,52		

Fonte: O autor (2019)

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de tração para a resistência máxima do material DOCOL
DP 1000

Amostra	Direção de laminação (°)	Resistência máxima (Mpa)	Resistência máxima média (Mpa)	Desvio padrão
Amostra 1	0	1064,56	1064,08	0,67
Amostra 2		1063,61		
Amostra 3	45	1100,17	1053,08	66,59
Amostra 4		1005,99		
Amostra 5	90	1010,92	1035,12	34,23
Amostra 6		1059,33		

Fonte: O autor (2019)

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de tração para o alongamento total do material DOCOL
DP 1000

Amostra	Direção de laminação (°)	Resistência máxima (Mpa)	Resistência máxima média (Mpa)	Alongamento total (%)	Média do alongamento total (%)
Amostra 1	0	1064,56	1064,08	7,55	7,60
Amostra 2	0	1063,61		7,66	
Amostra 3	45	1100,17	1053,08	11,02	9,89
Amostra 4	45	1005,99		8,76	
Amostra 5	90	1010,92	1035,12	9,95	9,77
Amostra 6	90	1059,33		9,60	

Fonte: O autor (2019)

**APÊNDICE B - CURVAS DE ESCOAMENTO OBTIDAS NOS GRÁFICOS PARA OS
SEIS CORPOS DE PROVA**

CP 900 - Direção de laminação – 0°

Corpo de prova 1

Corpo de prova 2

$$y = 1057,7x^{0,0671}$$

$$y = 1109,7x^{0,0729}$$

CP 900 - Direção de laminação – 45°

Corpo de prova 3

Corpo de prova 4

$$y = 1101,1x^{0,0797}$$

$$y = 1085,7x^{0,0822}$$

CP 900 - Direção de laminação – 90°

Corpo de prova 5

Corpo de prova 6

$$y = 1120,1x^{0,0882}$$

$$y = 1114x^{0,0840}$$

DP 1000 - Direção de laminação – 0°

Corpo de prova 1

Corpo de prova 2

$$y = 1458,77x^{0,1105}$$

$$y = 1463,8x^{0,1021}$$

DP 1000 - Direção de laminação – 45°

Corpo de prova 3

Corpo de prova 4

$$y = 1367,5x^{0,1046}$$

$$y = 1381x^{0,1058}$$

DP 1000 - Direção de laminação – 90°

Corpo de prova 5

Corpo de prova 6

$$y = 1437x^{0,1148}$$

$$y = 1479,6x^{0,1269}$$

APÊNDICE C - CÁLCULOS PARA A DEFINIÇÃO DO ÍNDICE DE ENCRUAMENTO DOS MATERIAIS CP 900 E DP 1000

Tabela 15 - Médias dos índices de encruamento (n) e das constantes (C) obtidas nas curvas de escoamento para o material USI CP 900

Direção de Laminação	n	Média n	C	Média C
0°	0,0671	0,0700	1057,7	1083,7
	0,0729		1109,7	
45°	0,0797	0,0810	1101,1	1093,4
	0,0822		1085,7	
90°	0,0882	0,0861	1120,1	1117,1
	0,0840		1114,0	

Fonte: o autor (2019)

Tabela 16 - Médias dos índices de encruamento (n) e das constantes (C) obtidas nas curvas de escoamento para o material DOCOL DP 1000

Direção de Laminação	n	Média n	C	Média C
0°	0,1105	0,1063	1458,7	1461,25
	0,1021		1463,8	
45°	0,1046	0,1052	1367,5	1374,25
	0,1058		1381	
90°	0,1148	0,12085	1437	1458,3
	0,1269		1479,6	

Fonte: o autor (2019)

Utilizando a equação 7, 8 e 9:

Para USI CP 900:

$$C = \frac{1}{4} (C_{0^\circ} + C_{45^\circ} + 2 \cdot C_{45^\circ}) \quad C = 1102,82$$

$$C = \frac{1}{4} (1083,7 + 1093,4 + 2 \cdot 1117,1)$$

$$n = \frac{1}{4} (n_{0^\circ} + n_{45^\circ} + 2 \cdot n_{90^\circ}) \quad n = 0,0808$$

$$n = \frac{1}{4} (0,070 + 0,0810 + 2 \cdot 0,0861)$$

$$\tau = 1102,82 \varphi^{0,0808}$$

Para DOCOL DP 1000:

$$C = \frac{1}{4} (C_{0^\circ} + C_{45^\circ} + 2 \cdot C_{45^\circ}) \qquad C = 1438,02$$

$$C = \frac{1}{4} (1461,25 + 1374,25 + 2 \cdot 1458,3)$$

$$n = \frac{1}{4} (n_{0^\circ} + n_{45^\circ} + 2 \cdot n_{90^\circ}) \qquad n = 0,1132$$

$$n = \frac{1}{4} (0,1063 + 0,1052 + 2 \cdot 0,1208)$$

$$\tau = 1438,02 \varphi^{0,1132}$$

**APÊNDICE D - RESULTADOS DOS ENSAIO DE DOBRAMENTO EM V PARA OS
MATERIAIS CP 900 E DP 1000**

Figura 30 - Resultados dos ensaios de dobramento para materiais de alta resistência

Material		Direção de laminação (°)	Raio de dobramento (°)	Retorno elástico (°)	Força máxima (N)
Amostra 13	CP 900	0	4	75,50	137,08
Amostra 14	CP 900	0	4	82,60	139,55
Amostra 15	CP 900	0	4	82,40	144,49
Amostra 16	CP 900	90	4	83,90	130,9
Amostra 17	CP 900	90	4	82,90	118,55
Amostra 18	CP 900	90	4	83,20	113,61
Amostra 19	DP 1000	0	4	80,30	154,84
Amostra 20	DP 1000	0	4	80,80	127,2
Amostra 21	DP 1000	0	4	80,50	142,02
Amostra 22	DP 1000	90	4	79,90	150,66
Amostra 23	DP 1000	90	4	80,30	123,49
Amostra 24	DP 1000	90	4	81,60	122,26
Amostra 1	CP 900	0	8	75,20	146,96
Amostra 2	CP 900	0	8	79,10	154,37
Amostra 3	CP 900	0	8	76,90	138,31
Amostra 4	CP 900	90	8	81,00	148,19
Amostra 5	CP 900	90	8	77,40	150,66
Amostra 6	CP 900	90	8	80,30	149,23
Amostra 7	DP 1000	0	8	75,60	181,53
Amostra 8	DP 1000	0	8	75,40	144,49
Amostra 9	DP 1000	0	8	75,30	181,53
Amostra 10	DP 1000	90	8	75,20	175,36
Amostra 11	DP 1000	90	8	76,30	164,25
Amostra 12	DP 1000	90	8	76,00	181,53
Amostra 25	CP 900	0	12	79,70	132,14
Amostra 26	CP 900	0	12	75,50	85,21
Amostra 27	CP 900	0	12	76,10	88,92
Amostra 28	CP 900	90	12	78,10	114,85
Amostra 29	CP 900	90	12	75,10	116,08
Amostra 30	CP 900	90	12	76,10	90,15
Amostra 31	DP 1000	0	12	72,30	130,9
Amostra 32	DP 1000	0	12	70,80	118,55
Amostra 33	DP 1000	0	12	73,40	128,92
Amostra 34	DP 1000	90	12	71,10	128,43
Amostra 35	DP 1000	90	12	72,30	121,02
Amostra 36	DP 1000	90	12	72,30	114,85
Amostra 37	CP 900	0	17	70,80	111,14
Amostra 38	CP 900	0	17	71,80	88,92
Amostra 39	CP 900	0	17	70,40	107,44

(Conclusão)

Amostra 40	CP 900	90	17	70,10	103,73
Amostra 41	CP 900	90	17	70,20	66,69
Amostra 42	CP 900	90	17	70,40	132,12
Amostra 43	DP 1000	0	17	66,60	129,67
Amostra 44	DP 1000	0	17	66,80	118,55
Amostra 45	DP 1000	0	17	66,90	122,26
Amostra 46	DP 1000	90	17	68,50	122,26
Amostra 47	DP 1000	90	17	65,50	127,20
Amostra 48	DP 1000	90	17	65,60	125,96

Fonte: o Autor (2019)

**APÊNDICE E - BASE DE CÁLCULO PARA DEFINIÇÃO DO RETORNO
ELÁSTICO PARA OS MATERIAIS CP 900 E DP 1000**

Tabela 17 - Angulo de retorno elástico após ensaio de dobramento a 90° para o material USI CP 900 - Direção de laminação - 0°

Raio de dobramento (mm)	Amostra	Réplica 1	Réplica 2	Média (°)	Desvio Padrão
	Retorno (°)	Retorno (°)	Retorno (°)		
4	75,50	82,60	82,40	80,2	4,04
8	75,20	79,10	76,90	77,1	1,96
12	79,70	75,50	76,10	77,1	2,27
17	70,80	71,80	70,40	71,0	0,72

Fonte: O autor (2019)

Tabela 18 - Angulo de retorno elástico após ensaio de dobramento em V para o material USI CP 900 - Direção de laminação - 90°

Raio de dobramento (mm)	Amostra	Réplica 1	Réplica 2	Média (°)	Desvio Padrão
	Retorno (°)	Retorno (°)	Retorno (°)		
4	83,90	82,90	83,20	83,3	0,51
8	81,00	77,40	79,57	79,3	1,81
12	78,10	75,10	76,10	76,4	1,53
17	70,10	70,20	70,23	70,2	0,07

Fonte: O autor (2019)

Tabela 19 - Angulo de retorno elástico após ensaio de dobramento em V para o material DOCOL DP 1000 - Direção de laminação - 0°

Raio de dobramento (mm)	Amostra	Réplica 1	Réplica 2	Média (°)	Desvio Padrão
	Retorno (°)	Retorno (°)	Retorno (°)		
4	80,30	80,80	80,50	80,5	0,25
8	75,60	75,40	75,30	75,4	0,15
12	72,30	70,80	73,40	72,2	1,31
17	66,60	66,80	66,90	66,8	0,15

Fonte: O autor (2019)

Tabela 20 - Angulo de retorno elástico após ensaio de dobramento em V para o material DOCOL DP 1000 - Direção de laminação - 90°

Raio de dobramento (mm)	Amostra	Réplica 1	Réplica 2	Média (°)	Desvio Padrão
	Retorno (°)	Retorno (°)	Retorno (°)		
4	79,90	80,30	81,60	80,6	0,89
8	75,20	76,30	76,00	75,8	0,57
12	71,10	72,30	72,30	71,9	0,69
17	68,50	65,50	65,60	66,5	1,70

Fonte: O autor (2019)

Utilizando equação 12:

Tabela 21 - Fator de retorno elástico (Ks) para o material USI CP 900 - Direção de laminação - 0°

Raio de dobramento (mm)	Ks			Média	Desvio Padrão
	Amostra	Réplica 1	Réplica 2		
4	0,84	0,92	0,92	0,891	0,045
8	0,84	0,88	0,85	0,856	0,022
12	0,89	0,84	0,85	0,857	0,025
17	0,79	0,80	0,78	0,789	0,008

Fonte: O autor (2019)

Tabela 22 - Fator de retorno elástico (Ks) para o material USI CP 900 - Direção de laminação - 90°

Raio de dobramento (mm)	Ks			Média	Desvio Padrão
	Amostra	Réplica 1	Réplica 2		
4	0,93	0,92	0,92	0,93	0,006
8	0,90	0,86	0,89	0,88	0,021
12	0,87	0,83	0,85	0,85	0,017
17	0,78	0,78	0,78	0,78	0,002

Fonte: O autor (2019)

Tabela 23 - Fator de retorno elástico (Ks) para o material DOCOL DP 1000 - Direção de laminação - 0°

Raio de dobramento (mm)	Ks				Desvio Padrão
	Amostra	Réplica 1	Réplica 2	Média	
4	0,89	0,90	0,89	0,89	0,003
8	0,84	0,84	0,84	0,84	0,002
12	0,80	0,79	0,82	0,80	0,015
17	0,74	0,74	0,74	0,74	0,002

Fonte: O autor (2019)

Tabela 24 - Fator de retorno elástico (Ks) para o material DOCOL DP 1000 - Direção de laminação - 90°

Raio de dobramento (mm)	Ks				Desvio Padrão
	Amostra	Réplica 1	Réplica 2	Média	
4	0,89	0,89	0,91	0,90	0,010
8	0,84	0,85	0,84	0,84	0,006
12	0,79	0,80	0,80	0,80	0,008
17	0,76	0,73	0,73	0,74	0,019

Fonte: O autor (2019)

Tabela 25 - Força máxima para o dobramento em V para o material USI CP 900 – Direção de laminação – 0°

Raio de Dobramento (mm)	Força Máxima (N)				Desvio Padrão
	Amostra	Replica 1	Replica 2	Média (N)	
4	137,08	139,55	144,49	140,37	3,77
8	146,96	154,37	138,31	146,55	8,04
12	132,14	85,21	88,92	102,09	26,09
17	111,14	88,92	107,44	102,50	11,91

Fonte: O autor (2019)

Tabela 26 - Força máxima para o dobramento em V para o material USI CP 900 – Direção de laminação – 90°

Raio de Dobramento (mm)	Força Máxima (N)				Desvio Padrão
	Amostra	Replica 1	Replica 2	Média (N)	
4	130,9	118,55	113,61	121,02	8,91
8	148,19	150,66	149,23	149,36	1,24
12	114,85	116,08	90,15	107,03	14,63
17	103,73	66,69	132,12	100,85	32,81

Fonte: O autor(2019)

Tabela 27 - Força máxima para o dobramento em V para o material DOCOL DP 1000 – Direção de laminação – 0°

Raio de Dobramento (mm)	Força Máxima (N)				Desvio Padrão
	Amostra	Replica 1	Replica 2	Média (N)	
4	154,84	127,2	142,02	141,35	13,83
8	181,53	144,49	181,53	169,18	21,39
12	130,9	118,55	128,92	126,12	6,63
17	129,67	118,55	122,26	123,49	5,66

Fonte: O autor(2019)

Tabela 28 - Força máxima para o dobramento em V para o material DOCOL DP 1000 – Direção de laminação – 90°

Raio de Dobramento (mm)	Força Máxima (N)				Desvio Padrão
	Amostra	Replica 1	Replica 2	Média (N)	
4	130,9	118,55	113,61	121,02	8,91
8	148,19	150,66	149,23	149,36	1,24
12	114,85	116,08	90,15	107,03	14,63
17	103,73	66,69	132,12	100,85	32,81

Fonte: O autor(2019)

**APÊNDICE F - ANÁLISE TEÓRICA DO FATOR DE RETORNO ELÁSTICO PARA
OS MATERIAIS DE ALTA RESISTÊNCIA USI CP 900 E DOCOL DP 1000**

Utilizando a equação 10, 11 e 12:

Tabela 29 - Fator de retorno elástico e ângulo teórico para o material USI CP 900 -
Sentido de laminação - 0

r (mm)	Fb (N)	l (mm)	b (mm)	s (mm)	E (Gpa)	Mb	K	α'
4	140,37	120	20	2	205	4211,20	0,9999999923	90,0000007
8	146,55					4396,40	0,9999999855	90,0000013
12	102,09					3062,70	0,9999999854	90,0000013
17	102,50					3075,00	0,9999999798	90,0000018

Fonte: O autor (2019)

Tabela 30 - Fator de retorno elástico e ângulo teórico para o material USI CP 900 -
Sentido de laminação - 90°

r (mm)	Fb (N)	l (mm)	b (mm)	s (mm)	E (Gpa)	Mb	K	α'
4	121,02	120	20	2	205	3630,60	0,9999999934	90,0000006
8	149,36					4480,80	0,9999999852	90,0000013
12	107,03					3210,80	0,9999999847	90,0000014
17	100,85					3025,40	0,9999999801	90,0000018

Fonte: O autor(2019)

Tabela 31 - Fator de retorno elástico e ângulo teórico para o material DOCOL DP
1000 - Sentido de laminação - 0°

r (mm)	Fb (N)	l (mm)	b (mm)	s (mm)	E (Gpa)	Mb	K	α'
4	141,35	120	20	2	205	4240,60	0,999999992	90,0000007
8	169,18					5075,50	0,999999983	90,0000015
12	126,12					3783,70	0,999999982	90,0000016
17	123,49					3704,80	0,999999975	90,0000022

Fonte: O autor(2019)

Tabela 32 - Fator de retorno elástico e ângulo teórico para o material DOCOL DP 1000 - Sentido de laminação - 90°

r (mm)	Fb (N)	l (mm)	b (mm)	s (mm)	E (Gpa)	Mb	K	α'
4	132,14	120	20	2	205	3964,10	0,999999992	90,0000007
8	173,71					5211,40	0,999999982	90,0000015
12	121,43					3643,00	0,999999982	90,0000016
17	125,14					3754,20	0,999999975	90,0000022

Fonte: O autor(2019)

Tabela 33 - Análise comparativa entre o fator de retorno teórico e experimental do material USI CP 900 – Sentido de laminação – 0°

Raio de dobramento (mm)	Teórico	Experimental	Erro (%)
4	0,9999999923	0,92	8,44
8	0,9999999855	0,85	14,56
12	0,9999999854	0,85	15,44
17	0,9999999798	0,79	21,33

Fonte: O autor(2019)

Tabela 34 - Análise comparativa entre o fator de retorno teórico e experimental do material USI CP 900 – Sentido de laminação – 90°

Raio de dobramento (mm)	Teórico	Experimental	Erro (%)
4	0,9999999934	0,92	7,56
8	0,9999999852	0,89	10,78
12	0,9999999847	0,85	15,44
17	0,9999999801	0,78	22,00

Fonte: O autor(2019)

Tabela 35 - Análise comparativa entre o fator de retorno teórico e experimental do material DOCOL DP 1000 – Sentido de laminação – 0°

Raio de dobramento (mm)	Teórico	Experimental	Erro (%)
4	0,999999992	0,89	10,56
8	0,999999983	0,84	16,22
12	0,999999982	0,80	19,67
17	0,999999976	0,74	25,78

Fonte: O autor(2019)

Tabela 36 - Análise comparativa entre o fator de retorno teórico e experimental do material
DOCOL DP 1000 – Sentido de laminação – 90°

Raio de dobramento (mm)	Teórico	Experimental	Erro (%)
4	0,99999999	0,89	10,78
8	0,99999998	0,84	15,56
12	0,99999998	0,80	19,67
17	0,99999998	0,73	27,11

Fonte: O autor(2019)

**APÊNDICE G - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO ÂNGULO DE RETORNO ELÁSTICO
PARA OS MATERIAIS DE ALTA RESISTÊNCIA USI CP 900 E DOCOL DP 1000**

Tabela 37 - Análise estatística do angulo de retorno elástico utilizando método Teste t de Student para os materiais USI CP 900 e DOCOL DP 1000

Raio de dobramento (mm)	Material	Direção de laminação (°)	Amostra	Réplica 1	Réplica 2	Teste t
			Retorno (°)	Retorno (°)	Retorno (°)	
4	DP 1000	0	80,30	80,80	80,50	0,8838
	CP 900	0	75,50	82,60	82,40	
8	DP 1000	0	75,60	75,40	75,30	0,3016
	CP 900	0	75,20	79,10	76,90	
12	DP 1000	0	72,30	70,80	73,40	0,068
	CP 900	0	79,70	75,50	76,10	
17	DP 1000	0	66,60	66,80	66,90	0,01
	CP 900	0	70,80	71,80	70,40	

Fonte: O autor (2019)

Tabela 38 - Análise estatística do angulo de retorno elástico utilizando método Teste t de Student para os materiais USI CP 900 e DOCOL DP 1000

Raio de dobramento (mm)	Material	Direção de laminação (°)	Amostra	Réplica 1	Réplica 2	Teste t
			Retorno (°)	Retorno (°)	Retorno (°)	
4	DP 1000	90	79,90	80,30	81,60	0,591
	CP 900	90	83,90	82,90	83,20	
8	DP 1000	90	75,20	76,30	76,00	0,1238
	CP 900	90	81,00	77,40	79,57	
12	DP 1000	90	71,10	72,30	72,30	0,0699
	CP 900	90	78,10	75,10	76,10	
17	DP 1000	90	68,50	65,50	65,60	0,007
	CP 900	90	70,10	70,20	70,23	

Fonte: O autor (2019)

APÊNDICE H - ANÁLISE DA LINHA NEUTRA PARA OS MATERIAIS DE ALTA RESISTÊNCIA USI CP 900 E DOCOL DP 1000

Figura 31 - Previsão teórica da linha neutra para materiais de alta resistência

Espessura (mm)	Raio de dobramento (mm)	Linha neutra teórico (mm)	Centro entre Re e Ri (mm)	Deslocamento percentual
2	4	1,101020514	1	9%
2	8	1,05572809	1	5%
2	12	1,038518603	1	4%
2	17	1,027799244	1	3%

Fonte: O autor (2019)

Figura 32 - Linha neutra experimental de aços de alta resistência

Amostra	Material	Rp (mm)	S.L (°)	D (mm)	(Re-Ri)/2	LN (mm)	Deslocamento percentual	Média deslocamento percentual	DP	
1	Usi CP 900	4	0	1,107	0,553	0,586	6%	6%	0,011	
2	Usi CP 900			1,102	0,551	0,579	5%			
3	Usi CP 900			1,108	0,554	0,596	7%			
4	Usi CP 900		90	0,955	0,478	0,508	6%	6%	0,018	
5	Usi CP 900			0,947	0,473	0,516	8%			
6	Usi CP 900			0,971	0,486	0,510	5%			
7	Docol DP 1000		0	1,547	0,774	0,838	8%	7%	0,017	
8	Docol DP 1000			1,540	0,770	0,831	7%			
9	Docol DP 1000			1,530	0,765	0,801	5%			
10	Docol DP 1000			90	1,560	0,780	0,827	6%	6%	0,021
11	Docol DP 1000				1,546	0,773	0,847	9%		
12	Docol DP 1000				1,551	0,776	0,814	5%		
13	Usi CP 900	8	0	1,820	0,910	0,956	5%	5%	0,020	
14	Usi CP 900			1,800	0,900	0,963	7%			
15	Usi CP 900			1,789	0,895	0,918	3%			
16	Usi CP 900		90	1,663	0,832	0,890	7%	4%	0,019	
17	Usi CP 900			1,697	0,848	0,876	3%			
18	Usi CP 900			1,685	0,842	0,872	3%			
19	Docol DP 1000		0	1,852	0,926	0,940	2%	4%	0,024	
20	Docol DP 1000			1,874	0,937	1,000	6%			
21	Docol DP 1000			1,852	0,926	0,958	3%			
22	Docol DP 1000		90	1,842	0,921	0,978	6%	4%	0,019	
23	Docol DP 1000			1,852	0,926	0,948	2%			
24	Docol DP 1000			1,842	0,921	0,946	3%			

(Conclusão)

25	Usi CP 900	12	0	1,872	0,936	0,946	1%	3%	0,020		
26	Usi CP 900			1,925	0,963	1,012	5%				
27	Usi CP 900			1,964	0,982	1,000	2%				
28	Usi CP 900		90		1,582	0,791	0,849	7%	4%	0,029	
29	Usi CP 900				1,631	0,815	0,824	1%			
30	Usi CP 900				1,655	0,827	0,852	3%			
31	Docol DP 1000		12	0	1,643	0,821	0,834	1%	3%	0,025	
32	Docol DP 1000				1,695	0,847	0,897	6%			
33	Docol DP 1000				1,639	0,820	0,828	1%			
34	Docol DP 1000			90		1,732	0,866	0,885	2%	3%	0,015
35	Docol DP 1000					1,727	0,864	0,910	5%		
36	Docol DP 1000					1,740	0,870	0,900	3%		
37	Usi CP 900	17	0	x	x	x	x	x	x		
38	Usi CP 900			x	x	x	x				
39	Usi CP 900			x	x	x	x				
40	Usi CP 900		90		x	x	x	x	x	x	
41	Usi CP 900				x	x	x	x			
42	Usi CP 900				x	x	x	x			
43	Docol DP 1000		17	0	x	x	x	x	x	x	
44	Docol DP 1000				x	x	x	x			
45	Docol DP 1000				x	x	x	x			
46	Docol DP 1000			90		x	x	x	x	x	