

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DÊNIS VINÍCIUS ZÜEHL

**ANÁLISE COMPARATIVA DO RETORNO ELÁSTICO BIBLIOGRÁFICO,
ANALÍTICO E EXPERIMENTAL EM DIFERENTES ESPESSURAS DO AÇO
LNE250**

CAXIAS DO SUL

2026
DÊNIS VINÍCIUS ZÜEHL

**ANÁLISE COMPARATIVA DO RETORNO ELÁSTICO BIBLIOGRÁFICO,
ANALÍTICO E EXPERIMENTAL EM DIFERENTES ESPESSURAS DO AÇO
LNE250**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Área de Conhecimento de
Ciências Exatas e Engenharias da
Universidade de Caxias do Sul, como
requisito parcial para obtenção do título
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fassini
Michels

CAXIAS DO SUL
2026

DÊNIS VINÍCIUS ZÜEHL

**ANÁLISE COMPARATIVA DO RETORNO ELÁSTICO BIBLIOGRÁFICO,
ANALÍTICO E EXPERIMENTAL EM DIFERENTES ESPESSURAS DO AÇO
LNE250**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Área de Conhecimento de
Ciências Exatas e Engenharias da
Universidade de Caxias do Sul, como
requisito parcial para obtenção do título
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fassini
Michels

Aprovado em __/__/____

Banca Examinadora

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

Prof. Me. Vagner Grison
Universidade de Caxias do Sul

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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, minha mãe Marisel Vanisse Beck Züehl e meu pai Sidnei Züehl, pelo amor e apoio constante e incentivo em todos os momentos. Também a minha irmã Daniela Züehl que fez parte desta caminhada de graduação em engenharia na Universidade de Caxias do Sul.

Ao meu orientador Alexandre Fassini Michels, pela paciência, apoio técnico e acadêmico para a realização deste trabalho.

À empresa Randon S.A. Implementos e Participações, por disponibilizar a estrutura e recursos necessários, cruciais para a conclusão deste estudo.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, que ao longo da graduação, compartilharam seus conhecimentos e aumentaram meu o interesse por aprender e me aperfeiçoar.

Aos colegas e amigos com quem compartilhei momentos e conhecimento agradeço pelo companheirismo, especialmente aqueles que contribuíram diretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Estendo meus agradecimentos a todos os que direta ou indiretamente, contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui.

RESUMO

O processo de dobramento de chapas metálicas é amplamente empregado na indústria metalmeccânica, sendo utilizado na fabricação de componentes que exigem elevada precisão dimensional. Entre os fenômenos inerentes a esse processo, o retorno elástico destaca-se por provocar alterações na geometria final da peça após a remoção da carga de conformação, tornando-se um dos principais desafios para a obtenção de componentes com elevada precisão geométrica. Nesse contexto, a correta previsão do retorno elástico é fundamental para a definição de compensações geométricas e para a redução de retrabalhos e custos de fabricação. Este trabalho apresenta uma análise comparativa do retorno elástico em chapas de aço LNE 250 com espessuras de 3,00 mm, 4,75 mm e 6,35 mm, utilizando abordagens bibliográfica, experimental e numérica por meio do Método dos Elementos Finitos. Inicialmente, foram realizados ensaios de tração para a determinação das propriedades mecânicas do material, utilizadas nos cálculos analíticos e na modelagem numérica. Posteriormente, foram executados ensaios de dobra ao ar em condições representativas do processo industrial, sendo os ângulos finais e os raios de dobra determinados por medições dimensionais. Os resultados experimentais evidenciaram a ocorrência de retorno elástico em todas as espessuras analisadas, com amplitudes de $0,23^\circ$ até $4,83^\circ$ nos modelos analisados, demonstrando a influência da espessura da chapa na magnitude do fenômeno. Os modelos analíticos apresentaram tendência à subestimação do retorno elástico, enquanto a modelagem por elementos finitos forneceu previsões mais próximas dos resultados experimentais. Dessa forma, conclui-se que a metodologia numérica constitui uma ferramenta promissora para a previsão do retorno elástico, desde que adequadamente calibrada e validada para as condições de material e processo avaliadas.

Palavras-chave: retorno elástico; dobramento de chapas; conformação mecânica; método dos elementos finitos; aço LNE 250.

ABSTRACT

Sheet metal bending is widely employed in the metalworking industry for the manufacturing of components requiring high dimensional accuracy. Among the phenomena inherent to this process, springback stands out for causing changes in the final geometry of the part after the forming load is removed, representing one of the main challenges to achieving high geometric precision. In this context, accurate springback prediction is essential for defining geometric compensation strategies and reducing rework and manufacturing costs. This study presents a comparative analysis of the springback behavior of LNE 250 steel sheets with thicknesses of 3.00 mm, 4.75 mm, and 6.35 mm, using bibliographic, experimental, and numerical approaches based on the Finite Element Method (FEM). Initially, tensile tests were carried out to determine the mechanical properties of the material, which were subsequently used in the analytical calculations and numerical modeling. Air bending tests were then performed under conditions representative of industrial manufacturing, and the final bending angles and bend radii were obtained through dimensional measurements. The experimental results confirmed the occurrence of springback for all sheet thicknesses evaluated, with angular recovery ranging from 0.23° to 4.83° , demonstrating the influence of sheet thickness on the magnitude of the phenomenon. The analytical models tended to underestimate springback, whereas the finite element simulations provided predictions that were in closer agreement with the experimental results. Therefore, it is concluded that the numerical approach constitutes a promising tool for springback prediction, provided that it is properly calibrated and validated for the specific material and processing conditions under investigation.

Keywords: springback; sheet metal bending; metal forming; finite element method; LNE 250 steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Equipamento para ensaio de tração	20
Figura 2 - Diagrama tensão-deformação	21
Figura 3 - Representação do sentido de laminação	24
Figura 4 - Dobramento em V	25
Figura 5 - Retorno Elástico (Ângulo)	27
Figura 6 - Retorno Elástico (Ângulo)	28
Figura 7 - Esforços internos no dobramento	29
Figura 8 - Modelos de malha simples e refinada	34
Figura 10 - Diagrama de Etapas	36
Figura 11 - Corpo de Prova para Tração	38
Figura 12 - Corpo de Prova para Dobramento	38
Figura 13– Método de obtenção Módulo Elasticidade	41
Figura 14 - Máquina universal de ensaios Wolpert Panantec (Dobra)	45
Figura 15 - Perfilômetro CNC Mitutoyo Formtracer SV-4500	46
Figura 16 - Simulação 3,00mm (Springback)	56
Figura 17 - LNE250 3,00mm (Amostra 1 - Sentido 0°)	66
Figura 18 - LNE250 3,00mm (Amostra 2 - Sentido 0°)	66
Figura 19 - LNE250 3,00mm (Amostra 3 - Sentido 0°)	67
Figura 20 - LNE250 3,00mm (Amostra 4 - Sentido 45°)	67
Figura 21 - LNE250 3,00mm (Amostra 5 - Sentido 45°)	68
Figura 22 - LNE250 3,00mm (Amostra 6 - Sentido 45°)	68
Figura 23 - LNE250 3,00mm (Amostra 7 - Sentido 90°)	69
Figura 24 - LNE250 3,00mm (Amostra 8 - Sentido 90°)	69
Figura 25 - LNE250 3,00mm (Amostra 9 - Sentido 90°)	70
Figura 26 - LNE250 4,75mm (Amostra 10 - Sentido 0°)	70
Figura 27 - LNE250 4,75mm (Amostra 11 - Sentido 0°)	71
Figura 28 - LNE250 4,75mm (Amostra 12 - Sentido 0°)	71
Figura 29 - LNE250 4,75mm (Amostra 13 - Sentido 45°)	72
Figura 30 - LNE250 4,75mm (Amostra 14 - Sentido 45°)	72
Figura 31 - LNE250 4,75mm (Amostra 15 - Sentido 45°)	73
Figura 32 - LNE250 4,75mm (Amostra 16 - Sentido 90°)	73
Figura 33 - LNE250 4,75mm (Amostra 17 - Sentido 90°)	74
Figura 34 - LNE250 4,75mm (Amostra 18 - Sentido 90°)	74
Figura 35 - LNE250 6,35mm (Amostra 19 - Sentido 0°)	75
Figura 36 - LNE250 6,35mm (Amostra 20 - Sentido 0°)	75
Figura 37 - LNE250 6,35mm (Amostra 21 - Sentido 0°)	76
Figura 38 - LNE250 6,35mm (Amostra 22 - Sentido 45°)	76
Figura 39 - LNE250 6,35mm (Amostra 23 - Sentido 45°)	77
Figura 40 - LNE250 6,35mm (Amostra 24 - Sentido 45°)	77

Figura 41 - LNE250 6,35mm (Amostra 25 - Sentido 90°)	78
Figura 42 - LNE250 6,35mm (Amostra 26 - Sentido 90°)	78
Figura 43 - LNE250 6,35mm (Amostra 27 - Sentido 90°)	79
Figura 44 - Simulação 3,00mm (Dobramento)	91
Figura 45 - Simulação 3,00mm (Springback)	91
Figura 46 - Simulação 4,75mm (Dobramento)	92
Figura 47 - Simulação 4,75mm (Springback)	92
Figura 48 - Simulação 6,35mm (Dobramento)	93
Figura 49 - Simulação 6,35mm (Springback)	93
Figura 50 - Gráfico de Curva de Engenharia LNE250 (3,00mm)	94
Figura 51 - Gráfico de Curva de Engenharia LNE250 (4,75mm)	94
Figura 52 - Gráfico de Curva de Engenharia LNE250 (6,35mm)	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Requisitos de composição química LNE 250	19
Quadro 2 - Propriedades físicas e mecânicas LNE 250	19
Quadro 3 - Especificações Usiminas - LNE250	32
Quadro 4 - Quantidade de Amostras de Corpos de Prova	39
Quadro 5 - Parâmetros Matriz e Punção	44
Quadro 6 - Ferramental Definido e Força de Dobra	44
Quadro 7 - Propriedades Mecânicas - Ensaio de Tração LNE250	49
Quadro 8 - Propriedades Mecânicas LNE250	51
Quadro 9 - Resultados de medição para espessura 3,00mm	52
Quadro 10 - Resultados de medição para espessura 4,75mm	53
Quadro 11 - Resultados de medição para espessura 6,35mm	54
Quadro 12 - Resultados Bibliográficos vs. Experimentais	55
Quadro 13 - Simulação Abaqus CAE vs. Experimental	57
Quadro 14 - Comparativo Geral	58
Quadro 15 - Retorno Elástico por Dieter (1981) - 3,00mm	80
Quadro 16 - Retorno Elástico por Dieter (1981) - 3,00mm	81
Quadro 17 - Retorno Elástico por Hosford e Caddell (2007) - 3,00mm	82
Quadro 18 - Retorno Elástico por Schaeffer, Nunes e Brito (2017) - 3,00mm	83
Quadro 19 - Retorno Elástico por Dieter (1981) - 4,75mm	84
Quadro 20 - Retorno Elástico por Hosford e Caddell (2007) - 4,75mm	84
Quadro 21 - Retorno Elástico por Schaeffer, Nunes e Brito (2017) - 4,75mm	85
Quadro 22 - Retorno Elástico por Dieter (1981) - 6,35mm	86
Quadro 23 - Retorno Elástico por Hosford e Caddell (2007) - 6,35mm	86
Quadro 24 - Retorno Elástico por Schaeffer, Nunes e Brito (2017) - 6,35mm	87
Quadro 25 - Parâmetros de Propriedades	88
Quadro 26 - Tabela Yield Stress vs. Plastic Strain - 3,00mm	88
Quadro 27 - Tabela Yield Stress vs. Plastic Strain - 4,75mm	89
Quadro 28 - Tabela Yield Stress vs. Plastic Strain - 6,35mm	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano de Ferro e Aço (sigla em inglês)
CPT	Corpo de Prova de Tração
CPE	Corpo de Prova Experimental
DIN	Instituto Alemão de Normalização (sigla em alemão)
MEF	Método de Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos (sigla em inglês)
VAB	Valor Adicionado Bruto

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	tensão normal [MPa]
P	carga aplicada [N]
S_0	área da seção transversal inicial [mm ²]
ε	deformação linear média [-]
Δl	variação do comprimento no corpo de prova [mm]
l_0	comprimento inicial do corpo de prova [mm]
E	módulo de Elasticidade ou módulo de Young [MPa]
φ	deformação verdadeira [-]
k_f	tensão verdadeira [MPa]
F_i	força instantânea [N]
S_i	área da seção transversal instantânea [mm ²]
l_1	comprimento final do corpo de prova [mm]
C	coeficiente de resistência [-]
n	índice de encruamento [-]
r	índice de anisotropia [-]
φ_b	deformação principal na largura [-]
φ_s	deformação principal no comprimento [-]
b_0	largura inicial do corpo de prova [mm]
b_1	largura final do corpo de prova [mm]
r_m	anisotropia média [-]
Δr	anisotropia planar [-]
r_{0°	anisotropia no corpo de prova a 0° em relação a laminação [-]
r_{45°	anisotropia no corpo de prova a 45° em relação a laminação [-]
r_{90°	anisotropia no corpo de prova a 90° em relação a laminação [-]
K_s	fator de retorno elástico (Schaeffer) [-]
R_i	raio interior antes da recuperação elástica [mm]
R_f	raio interior após recuperação elástica [mm]
M_b	momento de dobramento [N.mm]
R_d	raio do punção [mm]

h	espessura da chapa [mm]
L	comprimento da dobra [mm]
α_i	Ângulo inicial de dobra [°]
α_f	Ângulo final (após liberação de carga) [°]
σE	Tensão de Escoamento do Material [MPa]
ν	Coeficiente de Poisson [-]
E'	Módulo de deformação plana [MPa]
t	distância da linha neutra à face interna da chapa [mm]
K	Fator K [-]
L_t	Comprimento do planificado [mm]
Δl	Fator de compensação [mm]
q	coeficiente de estricção [-]
R_{min}	raio mínimo de punção de dobra [mm]
F_d	Força de dobra [N]
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima do material [MPa]
V	Abertura da matriz [mm]
F_{dc}	Força de dobra corrigida [N]
K_d	Fator corretivo [-]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo Geral.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	17
 2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	 18
2.1 AÇO CARBONO.....	18
2.1.1 Aço LNE 250.....	18
2.2 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	19
2.2.1 Interpretação da Curva Tensão-Deformação.....	20
2.3 CONFORMAÇÃO MECÂNICA.....	23
2.3.1 Anisotropia.....	23
2.3.2 Dobramento.....	25
2.3.2.1 Retorno Elástico.....	25
2.3.2.2 Linha Neutra.....	28
2.3.2.3 Dobra ao Ar.....	30
2.3.2.4 Geometria Ferramental de Dobra: V e Espessura da Chapa.....	31
2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	33
 3 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	 38
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	38
3.1.1 Corpos de Prova.....	39
3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	40
3.2.1 Construção da Curva de Engenharia.....	41
3.2.2 Construção da Curva Real.....	42
3.2.3 Cálculo de Anisotropia.....	43
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE DOBRA.....	44
3.4 CÁLCULO ANALÍTICO.....	47
3.5 SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS.....	48
 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	 50
4.1 PROPRIEDADES MECÂNICA DO MATERIAL.....	50
4.1.1 Curvas de Engenharia.....	50
4.1.2 Curvas Reais.....	51
4.2 RESULTADOS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	53
4.3 RESULTADOS DO CÁLCULO ANALÍTICO.....	55
4.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS.....	56
4.5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE OS MÉTODOS.....	58

5 CONCLUSÕES.....	59
6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTURO.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
APÊNDICE A - RESULTADOS DA MEDIÇÃO DO TESTE EXPERIMENTAL DE DOBRAMENTO DE CADA ESPESSURA.....	65
APÊNDICE B – CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DE RETORNO ELÁSTICO ANALÍTICO DO AÇO LNE250 - ESPESSURA 3,00MM.....	79
APÊNDICE C – CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DE RETORNO ELÁSTICO ANALÍTICO DO AÇO LNE250 - ESPESSURA 4,75MM.....	83
APÊNDICE D – CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DE RETORNO ELÁSTICO ANALÍTICO DO AÇO LNE250 - ESPESSURA 6,35MM.....	85
APÊNDICE E – DADOS INSERIDOS NO SOFTWARE ABAQUS PARA CARACTERIZAÇÃO DE CADA MATERIAL.....	87
APÊNDICE F – SIMULAÇÕES DE CONFORMAÇÃO NO SOFTWARE ABAQUS.....	91
APÊNDICE G – RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	94

1 INTRODUÇÃO

O estado do Rio Grande do Sul possui uma economia fortemente industrializada, destacando-se o setor metalmeccânico que é responsável por grande parte do processamento das matérias-primas metálicas em produtos acabados. Segundo o Atlas Socioeconômico do RS (2020), esta indústria representou 22,5% do Valor Adicionado Bruto (VAB) estadual em 2019, mostrando sua importância econômica. Neste contexto, o aço carbono mostra-se um dos materiais mais utilizados, principalmente em procedimentos de conformação mecânica, como corte, estampagem e dobramento de chapas metálicas.

O aço denominado LNE 250, de acordo com especificações de fabricantes como a Usiminas, é um material de baixo teor de carbono voltado para utilizações que demandam boa conformidade e resistência mecânica moderada. Essa categoria de material é amplamente empregada em elementos estruturais e componentes fabricados por meio de conformação a frio, sendo adequada a processos como o dobramento ao ar. Embora esse método seja comum, ele requer precisão na elaboração da geometria planificada, buscando garantir a qualidade dimensional do produto final.

Em softwares CAD 3D, como o Siemens NX, o projeto de uma peça dobrada é realizado com base em sua geometria final conformada. Entretanto, para que a peça produzida apresente as dimensões e ângulos desejados, é necessário considerar os fenômenos inerentes ao processo de dobramento, dentre os quais se destaca o retorno elástico. Esse fenômeno consiste na recuperação parcial da deformação elástica armazenada no material após a remoção da carga de conformação, provocando alterações no ângulo final e no raio de dobra da peça. Conforme discutido por Groover (2014, p. 126-139), o retorno elástico é influenciado por diversos fatores, como as propriedades mecânicas do material, a espessura da chapa, o raio de dobra e as condições de processamento.

Na indústria metalmeccânica, a ocorrência do retorno elástico representa um dos principais desafios para a obtenção da precisão dimensional em componentes conformados. A previsão inadequada desse comportamento pode resultar em desvios geométricos, necessidade de ajustes nos parâmetros do processo, retrabalhos, desperdício de material e aumento dos custos de produção. Dessa forma, engenheiros e pesquisadores buscam métodos que permitam estimar o

retorno elástico de maneira mais precisa, utilizando abordagens analíticas, simulações computacionais e ensaios experimentais.

A magnitude do retorno elástico é diretamente influenciada pela relação entre as propriedades elásticas e plásticas do material. Além disso, a espessura da chapa desempenha um papel importante nesse fenômeno. Ela altera a distribuição de tensões ao longo da seção dobrada e modifica a relação entre as deformações elásticas e permanentes que se desenvolvem durante a conformação. Em geral, chapas de diferentes espessuras apresentam comportamentos distintos quanto à recuperação elástica, tornando necessária uma análise específica para cada condição de processamento.

Neste contexto, propôs-se uma análise comparativa do retorno elástico em chapas de aço LNE 250 com espessuras de 3,00 mm, 4,75 mm e 6,35 mm. Essa análise foi realizada por meio de três abordagens distintas: bibliográfica, experimental e numérica, utilizando o Método dos Elementos Finitos. O estudo buscou avaliar a influência da espessura no comportamento do retorno elástico. Além disso, compara os resultados obtidos entre diferentes metodologias e analisa a aplicabilidade dos modelos de previsão na determinação da geometria final das peças dobradas. Essas ações contribuem para aumentar a precisão dimensional e reduzir os custos associados ao processo de fabricação.

Com isso, buscou-se melhorar a eficiência dos processos de projeto e fabricação no setor metalmecânico, proporcionando uma metodologia prática e validada que poderá ser utilizada por empresas e profissionais da área metalmecânica.

1.1 JUSTIFICATIVA

Nesse contexto, o retorno elástico representa um dos principais desafios no processo de dobramento de chapas metálicas, pois influencia diretamente a geometria final das peças conformadas. A utilização de estimativas genéricas ou incompatíveis com as condições reais de fabricação pode resultar em desvios dimensionais, retrabalho, desperdício de matéria-prima e aumento dos custos de produção.

Diante da necessidade de compreender melhor esse fenômeno e obter previsões mais precisas sobre o processo de conformação, é importante avaliar como a espessura da chapa influencia o comportamento do retorno elástico em aços

LNE 250. Essa avaliação contribui para aumentar a precisão dimensional e a confiabilidade no projeto e na fabricação de componentes dobrados.

A relevância do estudo é reforçada pelo impacto econômico associado às inconformidades produtivas, que representaram aproximadamente R\$ 39.709,00 em custos de não qualidade no ano de 2025, correspondendo a cerca de 11% do total registrado pela empresa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Comparar o comportamento do retorno elástico em chapas de aço LNE 250 com diferentes espessuras, por meio de abordagens bibliográfica, experimental e simulação numérica, avaliando a influência da espessura na recuperação elástica após o dobramento e contribuindo para uma previsão mais precisa da geometria final de peças conformadas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar o retorno elástico teórico para o aço LNE 250 com base em modelos clássicos da literatura e nos parâmetros geométricos e mecânicos do material.
- b) Obter e analisar experimentalmente o retorno elástico por meio de ensaios de dobra ao ar em chapas de diferentes espessuras, avaliando sua variação em função das condições de processamento.
- c) Simular numericamente o processo de dobramento pelo Método dos Elementos Finitos, determinando o retorno elástico previsto para cada condição analisada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 AÇO CARBONO

O aço carbono é uma liga metálica composta essencialmente por ferro (Fe) e carbono (C), podendo conter pequenas quantidades de elementos residuais como manganês (Mn), silício (Si), fósforo (P) e enxofre (S). Sua classificação é definida pelo teor de carbono presente, onde ligas com teor inferior a 0,25% são enquadradas como aços de baixo carbono segundo Callister e Rethwisch (2012, p. 375).

No contexto normativo, os aços carbono são organizados por sistemas como SAE e AISI (americanos), DIN (alemão) e ABNT (brasileiro). Conforme Chiaverini (1986, p. 219), a norma brasileira adota o sistema de quatro algarismos, onde os dois primeiros indicam o grupo de elementos químicos principais e os dois últimos indicam o teor de carbono em centésimos de ponto percentual. A ABNT NBR 6656 é a norma que estabelece as exigências técnicas para aços carbono laminados a quente, incluindo ligas como ABNT 1006, 1008 e 1020, muito utilizadas na indústria de conformação.

Aços de baixo carbono possuem microestrutura predominantemente ferrítica, o que representa elevada ductilidade, facilitando processos de dobramento e estampagem (GHOSH; CHATTERJEE, 2008, p. 102). A resistência desses materiais ainda pode ser elevada por encruamento em operações de conformação a frio, processo que endurece o material e reduz sua ductilidade (GHOSH; CHATTERJEE, 2008, p. 108).

Aços de baixo carbono têm ampla aplicação devido estas características na indústria metalmeccânica, construção civil, setor automotivo e na fabricação de eletrodomésticos.

2.1.1 Aço LNE 250

O aço LNE 250, conforme a norma ABNT NBR 6656:2018, é um aço de baixo teor de carbono classificado como laminado a quente, com aplicação em processos que exigem processo de conformação, como estampagem, corte e dobramento. A sigla "LNE" refere-se a "Laminado a quente, Não Estrutural, para uso geral", e o número 250 representa a tensão mínima de escoamento do material. Na norma

ABNT NBR 6656 são informados requisitos técnicos, incluindo os limites químicos para elementos como carbono, manganês, fósforo e enxofre, propriedades mecânicas (limite de escoamento (σ_E), resistência à tração e alongamento) e aspectos dimensionais e de acabamento superficial.

Conforme a norma NBR 6656, os requisitos de composição química do aço LNE 250 estão apresentados no Quadro 1:

Quadro 1 - Requisitos de composição química LNE 250

Elemento	C	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ti	C eq. máx.
% max	0,25	1,35	0,035	0,04	0,2	0,2	0,15	0,06	0,008	0,008	0,025	0,4
Notas: Para teores de Nb, Ti e V, o somatório deve ser no máximo 0,20%												

Fonte: Adaptado ASTM A1011

Devido às propriedades mecânicas, o aço LNE 250 é amplamente empregado na fabricação de componentes estruturais utilizados em chassis de implementos rodoviários.

O Quadro 2 apresenta as propriedades físicas e mecânicas exigidas do aço LNE 250 conforme norma NBR 6656:

Quadro 2 - Propriedades físicas e mecânicas LNE 250

Densidade	Tensão de Escoamento	Tensão de Ruptura	Alongamento			Raio Mínimo de Dobra	Redução de área (%)
7,85 g/cm³	250 MPa	400 a 550 MPa	0,65~1,6 mm	1,6~2,5 mm	2,25~6 mm	1,5 E	60
			16%	20%	21%		

Fonte: Adaptado Folha de material Randon Implementos (2022)

2.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

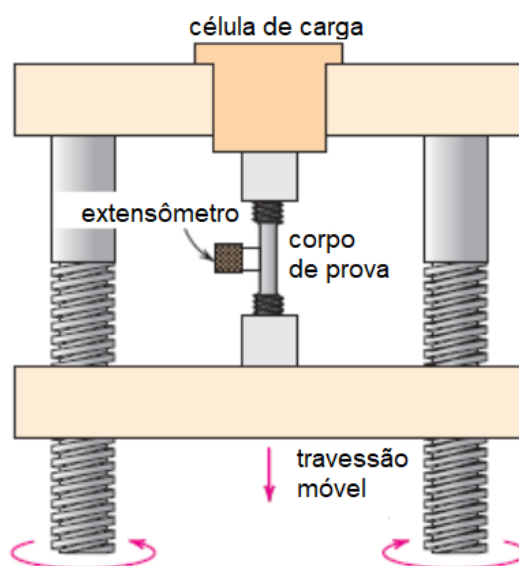
O ensaio de tração é um procedimento bastante utilizado na engenharia mecânica e na ciência dos materiais, com o objetivo de determinar as propriedades fundamentais de metais e ligas metálicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2012, p. 128). Essas propriedades são essenciais para o dimensionamento correto de componentes estruturais e também para análises computacionais por métodos como

o dos elementos finitos.

Durante o teste registra-se a força aplicada (P) e a variação de comprimento do corpo de prova (Δl), desta forma gerando o traçado da curva tensão-deformação ($\sigma \times \epsilon$), onde podem ser obtidas as principais propriedades mecânicas (VAN VLACK, 1982, p. 273). O procedimento deve seguir os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 6892-1:2020, considerando o devido alinhamento axial da amostra e o uso de extensômetros ou sistemas equivalentes para medição das deformações.

A carga deve ser aplicada de forma constante e controlada até a ruptura do corpo de prova, respeitando os indicativos da norma. Após o rompimento, devendo ocorrer na área central útil do corpo de prova para validação, os dados obtidos são analisados para obtenção das informações requeridas. (CALLISTER; RETHWISCH, 2012, p. 129).

Figura 1 - Equipamento para ensaio de tração



Fonte: Adaptado CALLISTER (2000)

2.2.1 Interpretação da Curva Tensão-Deformação

A curva tensão-deformação é obtida no ensaio de tração e é fundamental para a análise do comportamento mecânico. Esse gráfico permite a identificação de propriedades do material como limite de escoamento (σ_E), resistência máxima à tração, módulo de elasticidade (E) e alongamento total ($A\%$). O gráfico é gerado a

remoção da carga aplicada (P) (CALLISTER; RETHWISCH, 2012, p. 159). Com o aumento gradativo da força aplicada, a curva atinge um pico na resistência máxima à tração (R_m) e, logo em seguida, apresenta queda de tensão associada ao fenômeno de estrição, caracterizado pela redução da seção transversal até a fratura (MEYERS; CHAWLA, 2009, p. 184). A tenacidade do material é representada pela área sob a curva gerada, enquanto o alongamento total ($A\%$) expressa sua ductilidade.

O módulo de elasticidade (E), também conhecido por módulo de Young, pode ser obtido a partir da razão entre a tensão e deformação na região elástica, conforme apresentado por Callister e Rethwisch (2012, p. 158).

A curva tensão-deformação pode ser representada de duas maneiras diferentes, sendo uma convencional, relacionando a força aplicada com a área inicial da seção transversal (S_0), e a verdadeira, que por sua vez considera a redução da área durante a deformação, utilizando a área instantânea durante o ensaio.

Segundo Schaeffer (2004, p. 126), é possível determinar tanto a deformação verdadeira (φ) quanto a tensão verdadeira instantânea (k_f), através de equações específicas que levando em consideração a força aplicada e deformação do material durante o ensaio.

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

$$k_f = \frac{F_i}{S_i} \quad (2)$$

$$S_i = \frac{S_0 * l_0}{l_1} \quad (3)$$

Onde:

φ	deformação verdadeira [-]
k_f	tensão verdadeira [MPa]
F_i	força instantânea [N]
S_i	área da seção transversal instantânea [mm ²]
S_0	área da seção transversal inicial [mm ²]
l_0	comprimento inicial do corpo de prova [mm]
l_1	comprimento instantâneo do corpo de prova [mm]

Dieter (1981, p. 165) apresenta de forma detalhada o comportamento do material durante o processo de deformação plástica, incluindo a equação de Hollomon, que apresenta parâmetros essenciais para a caracterização do comportamento mecânico de materiais metálicos submetidos à conformação plástica. A equação de Hollomon é representada pela Equação 4, que permite descrever o comportamento de encruamento do material na região plástica uniforme:

$$kf = C * \varphi^n \quad (4)$$

Onde:

φ	deformação verdadeira [-]
kf	tensão verdadeira [MPa]
C	coeficiente de resistência [-]
n	índice de encruamento [-]

A literatura clássica (DIETER, 1981; HOSFORD; CADDELL, 2007) estabelece uma ampla faixa do expoente de encruamento (n) para metais, normalmente entre 0,1 e 0,5, porém não informa um valor de referência devido a considerável variação composição química, das condições de processamento, do histórico de deformação e da condição metalúrgica. Sendo necessária a determinação dos parâmetros (C) e (n) a partir do ajuste da curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira obtida experimentalmente.

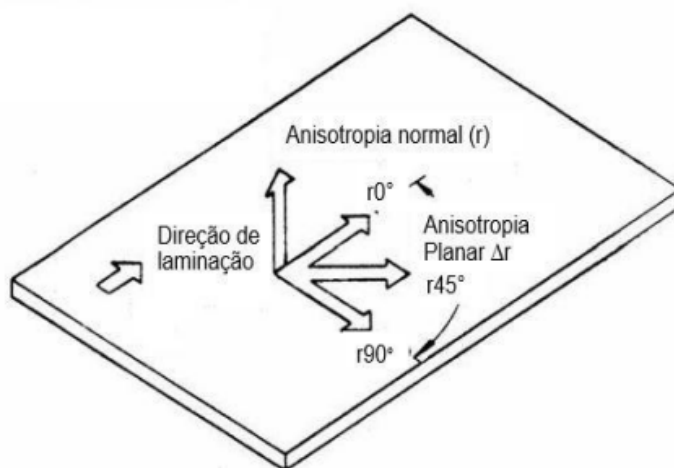
2.3 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

2.3.1 Anisotropia

A anisotropia é uma característica microestrutural resultante dos processos de conformação como laminação e forjamento, contidas principalmente em chapas metálicas. Esta característica explica a variação das propriedades mecânicas em diferentes direções do material, sendo influenciado diretamente pela organização e orientação dos grãos formados durante o processo de conformação (REED-HILL; ABBASCHIAN, 2010, p. 358). Quando chapas metálicas são laminadas, os grãos tendem a se alongar na direção da laminação, gerando resultados e

comportamentos mecânicos diferentes nas direções longitudinal (0°), transversal (90°) e a 45° em relação ao sentido de laminação.

Figura 3 - Representação do sentido de laminação



Fonte: CHEMIN FILHO (2004)

O comportamento plástico do material é influenciado pela anisotropia, afetando características como o retorno elástico (*springback*), o encruamento e a localização da linha neutra durante operações de dobramento.

Anisotropia pode ser avaliada em chapas, utilizando-se o coeficiente de anisotropia plástica (r), obtido através dos ensaios de tração uniaxial de corpos de prova retiradas em diferentes direções da chapa (0° , 45° e 90°), conforme as diretrizes da norma ASTM E517 (ASTM, 2020). Valores elevados da anisotropia plástica (r) indicam melhor capacidade de deformação transversal. Por outro lado, valores baixos ou não uniformes podem indicar a possibilidade de defeitos, como orelhamento ou distorções na geometria (LANGE, 1985, p. 281).

Materiais que apresentam propriedades mecânicas uniformes em todas as direções do plano da chapa tendem a apresentar um coeficiente de anisotropia médio (r_m) igual a 1. Quando esse coeficiente é menor que 1, o material é considerado anisotrópico, exibindo comportamentos diferentes dependendo da direção do esforço mecânico. Segundo Schaeffer (2004, p. 136), valores de r menores que 1 indicam uma tendência à deformação que é vista principalmente na

espessura, enquanto valores maiores que 1 indicam um desvio maior do plano da chapa, desejável em processos de estampagem profunda.

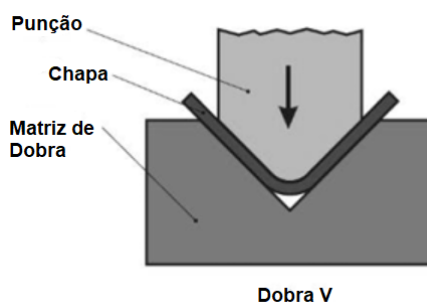
2.3.2 Dobramento

O processo é realizado em dobradeiras e exige atenção a parâmetros como limite de escoamento (σE), espessura e raio de dobra, além de controle do retorno elástico para garantir precisão dimensional e reduzir retrabalho (DIETER, 1981, p. 444).

No ambiente de modelagem tridimensional, softwares como o NX, da Siemens, utilizam o fator K e a posição da linha neutra para gerar automaticamente o planificado da peça. É muito importante que esses dados sejam precisos para que não ocorram erros entre o projeto virtual e o produto final (FERREIRA, 2011, p. 102).

Outro fator que afeta o resultado do processo é a anisotropia do material, as tensões residuais e a escolha correta das ferramentas (SILVA, 2010, p. 88). A dobra em “V” é uma das técnicas mais comuns e mais indicada para ângulos próximos a 90°, pois proporciona dimensões mais precisas e pode ser utilizada com chapas de diferentes espessuras (FERREIRA, 2011, p. 103).

Figura 4 - Dobramento em V



Fonte: Adaptado de: Schuler (1998)

2.3.2.1 Retorno Elástico

O retorno elástico, também conhecido como *springback*, é um fenômeno característico da conformação plástica, especialmente perceptível no dobramento de chapas metálicas. Consiste na recuperação parcial da deformação elástica após a remoção da carga aplicada (P), resultando em uma variação angular entre o ângulo

de dobra sob carga e o ângulo final da peça (DIETER, 1981, p. 450).

Sua magnitude depende de fatores como o limite de escoamento (σE), o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de encruamento do material, além de parâmetros geométricos, como a espessura da chapa e o raio do punção. Em geral, materiais com maior limite de escoamento e menor módulo elástico tendem a apresentar maior *springback* (MARCINIACK; DUNCAN; HU, 2002, p. 221).

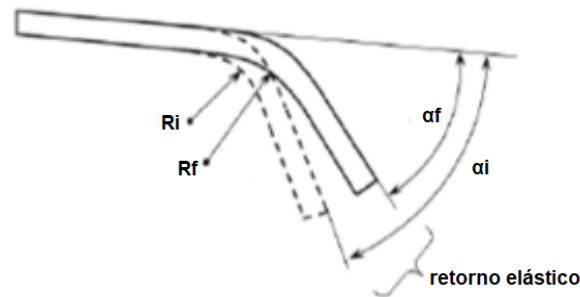
O fenômeno também é apresentado por KUT, PASOWICZ e STACHOWICZ (2023), em ensaios de dobra a três pontos com ligas de alumínio, onde este foi correlacionado diretamente com o raio da ferramenta e a espessura da chapa.

A previsão do retorno elástico permanece como um dos principais desafios nos processos de conformação de chapas metálicas, uma vez que sua magnitude depende simultaneamente das propriedades mecânicas do material, da geometria do ferramental e das condições de processamento. Embora diversos modelos analíticos tenham sido desenvolvidos para estimar esse fenômeno, a literatura indica que sua precisão é limitada pelas simplificações adotadas na representação do comportamento do material e das condições reais de dobramento. Dessa forma, a associação entre ensaios experimentais e simulações numéricas por meio do Método dos Elementos Finitos tem sido amplamente utilizada para validar modelos de previsão e aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos em operações de dobramento (BANABIC, 2010, p. 341–368).

Para minimizar o retorno elástico, podem ser aplicadas estratégias como a supercompensação do ângulo de dobra (*overbending*) e o uso de simulações pelo método dos elementos finitos (MEF), que permitem prever e ajustar o comportamento do material antes da fabricação.

Conforme Dieter (1981, p. 455), a equação utilizada para calcular analiticamente o retorno elástico baseia-se na relação entre ângulos, o que ajuda a reduzir o número de tentativas durante o processo de planificação. O autor, por outro lado, ressalta que sua precisão é limitada, pois o modelo matemático não considera todas as variáveis. Para que seja possível utilizá-la na prática, também é necessário levar em consideração a relação entre os raios mostrados na Equação 9.

Figura 5 - Retorno Elástico (Ângulo)



Fonte: Adaptado de: DIETER (1981)

$$K_D = \frac{\alpha_i}{\alpha_f} = \frac{Ri + h/2}{Rf + h/2} \quad (8)$$

Onde:

 K_D Fator de retorno elástico (Dieter) [-] α_i Ângulo de inicial dobra [°] α_f Ângulo final após liberação da carga [°] Ri Raio interno antes da recuperação elástica [mm] Rf Raio interno após recuperação elástica [mm]

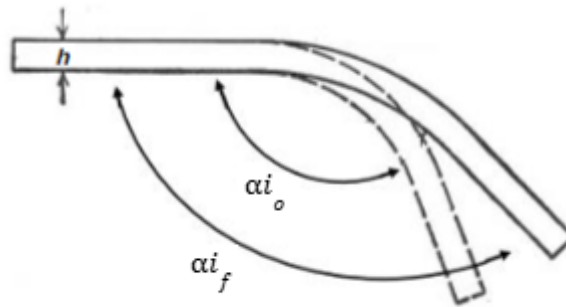
$$\frac{Ri}{Rf} = 4 \cdot \left(\frac{Ri \cdot \sigma E}{E \cdot h} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{Ri \cdot \sigma E}{E \cdot h} \right) + 1 \quad (9)$$

Onde:

 σE Tensão de Escoamento do Material [MPa] E módulo de Elasticidade ou módulo de Young [MPa]

Schaeffer, Nunes e Brito (2017, cap. Dobramento, p. 170-185), apresentam uma maneira de calcular o retorno elástico com base nos ângulos medidos antes e depois da liberação da carga durante o processo de dobra. Essa relação é expressa na Equação 10, enquanto a Equação 11 permite a obtenção do fator K. No entanto, o autor não especifica em quais processos de conformação esse modelo pode ser utilizado.

Figura 6 - Retorno Elástico (Ângulo)



Fonte: Adaptado de DIETER (1981)

$$M_b = (Fd \cdot L/2)/4 \quad (10)$$

Onde:

M_b Momento de dobramento [N.mm]

L Comprimento da dobra [mm]

F_d Força de dobra [N]

$$K_S = 1 - \frac{12.M_b.(R_d + 0,5.h)}{E.L.h^3} \quad (11)$$

Onde:

K_S Fator de retorno elástico (Schaeffer) [-]

h Espessura da chapa [mm]

R_d Raio do punção [mm]

Hosford e Caddell (2007, p. 264) sugerem uma maneira de calcular o retorno elástico usando parâmetros da curva tensão-deformação real. Embora não especifiquem como usá-lo para dobramento, este método será utilizado neste trabalho como forma de estimar o processo de dobra ao ar.

$$\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f} = \left(\frac{6}{2+n}\right) \cdot \left(\frac{C}{E'}\right) \cdot \left(\frac{h}{2.R_i}\right)^n \cdot \left(\frac{1}{h}\right) \quad (14)$$

Para cálculo de E' , utilizar:

$$E' = \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (15)$$

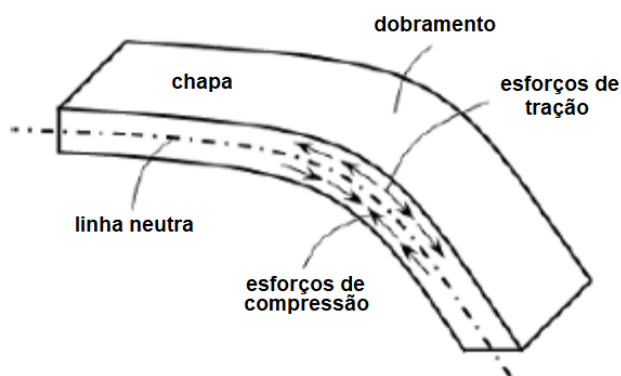
Onde:

- ν Coeficiente de Poisson [-]
- E' Módulo de deformação plana [MPa]
- C coeficiente de resistência [-]
- n índice de encruamento [-]

2.3.2.2 Linha Neutra

A linha neutra é uma região teórica dentro da espessura da chapa que não se alonga nem se comprime durante o processo de dobramento de chapas metálicas. Essa linha mantém seu comprimento original após ser dobrada e separa as áreas sujeitas à tensão (na parte externa) e à compressão (na parte interna) (GROOVER, 2014, p. 415). A posição da linha neutra varia de lugar dependendo do tipo de material, da espessura da chapa e do raio de curvatura aplicado (DIETER, 1981, p. 350).

Figura 7 - Esforços internos no dobramento



Fonte: Adaptado de: Sales (2013)

O fator K representa a posição da linha neutra, que é a fração da espessura da chapa onde essa linha se localiza. Esse número pode variar de 0 (na face interna) a 0,5 (no meio da espessura). Para chapas de aço de baixo carbono dobradas ao ar, o fator K geralmente fica entre 0,3 e 0,45, dependendo das

condições do processo (GROOVER, 2014, p. 417).

Se esse fator não for definido corretamente, poderá afetar a precisão do desenvolvimento planejado da peça em CAD/CAM, o que poderá gerar falhas na montagem, necessidade de retrabalho e desperdício de material. Por isso, a linha neutra precisa estar na posição certa para garantir precisão dimensional, otimização de recursos e garantir eficiência produtiva na fabricação de peças metálicas dobradas (GROOVER, 2014, p. 417). A relação entre a posição da linha neutra e a espessura total da chapa é mostrada na Fórmula 16.

$$K = \frac{t}{h} \quad (16)$$

Onde:

K	Fator K [-]
t	distância da linha neutra à face interna da chapa [mm]
h	espessura da chapa [mm]

O valor do fator K não é fixo e depende de diversos parâmetros, tais como:

- i) tipo de material (propriedades mecânicas e anisotropia),
- ii) espessura da chapa,
- iii) raio de curvatura (interno),
- iv) ferramenta de dobra (punção e matriz),
- v) tipos de dobra: ao ar, cunhagem e matriz fechada.
- vi) coeficiente de atrito entre ferramenta e chapa.

Normalmente, o fator K usado para calcular o comprimento planificado (L_t) de chapas dobradas de aços de baixo carbono no ar, valores entre 0,33 e 0,42 são comuns (DAVIES, 2003, p. 147). No entanto, para projetos industriais que exigem alta precisão dimensional e repetibilidade, é melhor determinar o fator K analiticamente ou experimentalmente para maior precisão.

2.3.2.3 Dobra ao Ar

Dobra ao ar é uma das formas mais comuns de moldar chapas metálicas. É conhecida por sua versatilidade e por exigir menos força do que outros métodos, como estampagem ou cunhagem. Nesse processo, a chapa é colocada sobre uma matriz em forma de "V" e o punção aplica uma força controlada até uma determinada profundidade. O ângulo final depende diretamente da profundidade, o que significa que é possível obter diferentes formas com as mesmas ferramentas (GROOVER, 2010, p. 388).

A dobra ao ar tem vantagens importantes, como menos consumo de energia, menos desgaste das ferramentas e facilidade de uso no processo produtivo. No entanto, as variações na espessura da chapa, as propriedades mecânicas e o retorno elástico podem variar com sua precisão dimensional, o que exige ajustes constantes na parametrização do processo (TOTTEN, 2006, p. 117).

2.3.2.4 Geometria Ferramental de Dobra: V e Espessura da Chapa

A forma das ferramentas usadas para dobrar ao ar afeta diretamente a qualidade dimensional e o desempenho do processo. Punção e matriz inferior, que geralmente têm a forma de um "V", definem o raio de curvatura e a intensidade dos esforços envolvidos. A relação entre a abertura da matriz (V) e a espessura da chapa (h) é um parâmetro importante que afeta o raio interno da dobra e o comportamento do material durante a conformação (DIN, 1992).

A relação V/h de 6 a 12 é recomendada para chapas de aço de baixo carbono, e 8 vezes por espessura é uma prática comum em processos convencionais (DIN, 1992). Punções com raio pequeno e ângulos mais agudos fazem dobras com raios menores, mas também aumentam tensões localizadas e o risco de falha em materiais menos dúcteis. Por outro lado, punções com raios maiores suavizam as deformações e diminuem as tensões concentradas (GROOVER, 2014, p. 389).

Segundo a NBR 6656, o raio mínimo de dobra para aços LNE250 está determinado em 1,5 a razão da espessura do material, como demonstrado no Quadro 2. Contudo, alguns fabricantes informam o raio mínimo de dobra deste material como 0,0E, determinando que o material pode ser dobrado com raio interno

igual a zero vezes a espessura da chapa, ou seja, com uma dobra extremamente fechada, teoricamente sem raio interno e sem ocorrência de trincas ou ruptura.

Quadro 3 - Especificações Usiminas - LNE250

Norma	Grau	Faixa de Espessura (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento (%min)	Dobramento a 180°
NBR-6656 LNE (2008)	200	2,00 até 16,00	200 à 330	280 à 410	35	0,0E
	230		230 à 360	330 à 460	30	
	260		260 à 390	370 à 500	30	
	280		280 à 430	410 à 540	30	

Fonte: Adaptado de Usiminas (2019).

Dieter (1981, p. 462) informa que o raio mínimo de curvatura geralmente é baseado na espessura da chapa, e é comum sugerir valores como "3e", que é um raio igual a três vezes a espessura do material.

Rodrigues e Martins (2010, p. 68) afirmam que processos como a laminação a frio podem tornar o material menos dúctil na direção perpendicular à laminação, o que aumenta a probabilidade de formação de trincas durante a flexão. Portanto, é melhor dobrar perpendicularmente à direção da laminação ou, se isso não for possível, usar raios de dobra maiores para diminuir o risco de falhas. Também é muito importante escolher a abertura correta da matriz em forma de V, pois afeta diretamente a resistência necessária para o processo. Escolhas erradas podem exigir muito trabalho e prejudicar as ferramentas. A força necessária para a dobra pode ser estimada por meio da Equação 24 descrita por Schaeffer, Nunes e Brito (2017, p. 180), que considera tanto as características do material quanto as dimensões da ferramenta utilizada.

$$F_d = \frac{(1,2 \cdot L \cdot h^2 \cdot \sigma_{m\acute{a}x})}{V} \quad (24)$$

Onde:

- F_d Força de dobra [N]
- L Comprimento da dobra [mm]
- h Espessura da chapa [mm]
- $\sigma_{m\acute{a}x}$ Tensão máxima do material [MPa]
- V Abertura da matriz [mm]

Rodrigues e Martins (2010, p. 71) sugerem uma forma de cálculo da força de flexão (F_{dc}) que leva em consideração as propriedades do material e as características da ferramenta, incluindo um coeficiente de ajuste. A norma DIN 6935 sugere a aplicação de um fator corretivo (K_d) para compensar efeitos como atrito e encruamento, melhorando a precisão da estimativa (RODRIGUES; MARTINS, 2010, p. 71).

$$F_{dc} = K_d \cdot \sigma_{m\acute{a}x} \cdot \left(\frac{L \cdot h^2}{V} \right) \quad (25)$$

$$K_d = 1 + 4 \cdot \left(\frac{h}{V} \right) \quad (26)$$

Onde:

F_{dc} Força de dobra corrigida [N]

K_d Fator corretivo [-]

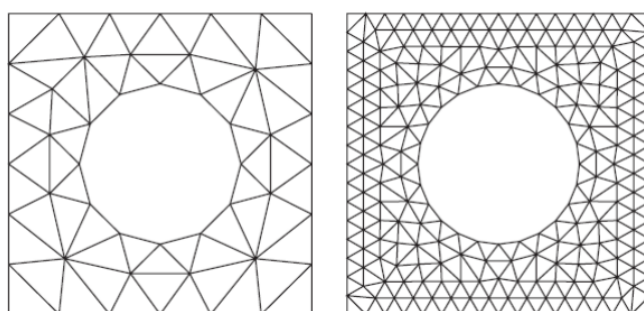
2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica amplamente empregada para a análise do comportamento mecânico de componentes submetidos a diferentes condições de carregamento. Em processos de conformação de chapas metálicas, o método permite prever a distribuição de tensões, deformações e o retorno elástico, reduzindo a necessidade de ensaios experimentais e auxiliando no desenvolvimento de produtos (SILVA, 2022; PALMEIRA; HABIBE; JACOME, 2023, p. 3–10).

Diversos estudos apontam que a utilização do MEF para a previsão do retorno elástico constitui uma abordagem consolidada na conformação de chapas metálicas. A possibilidade de representar o comportamento elastoplástico do material, as condições de contato entre a chapa e o ferramental, bem como as etapas de carregamento e descarregamento, permite estimar a geometria final da peça antes da fabricação física, reduzindo o número de ajustes experimentais necessários e os custos associados ao desenvolvimento do processo (BANABIC, 2010, p. 341–368; WAGONER; CHENOT, 2001, p. 327–356).

No MEF, a geometria é discretizada em pequenos elementos interligados por nós, formando uma malha. A qualidade dessa discretização influencia diretamente a precisão dos resultados, sendo comum o refinamento da malha em regiões sujeitas a elevadas concentrações de tensões, como a região de dobra (TAVEIRA; CAMPOS, 2018, p. 45–47). A Figura 8 apresenta exemplos de malhas com diferentes níveis de refinamento.

Figura 8 - Modelos de malha simples e refinada



Fonte: Fish e Belytschko (2007)

As análises podem ser realizadas por solucionadores implícitos ou explícitos. O método implícito é amplamente empregado em análises estáticas e quase-estáticas devido à sua elevada precisão, enquanto o método explícito é mais indicado para problemas envolvendo grandes deformações, contatos complexos e eventos dinâmicos. Dessa forma, a escolha do solucionador depende das características do problema analisado (DASSAULT SYSTÈMES, 2024).

Outro aspecto importante é a escolha do tipo de elemento. Para a simulação de chapas metálicas, os elementos de casca (*shell elements*) são amplamente utilizados por apresentarem boa precisão na representação simultânea dos esforços de membrana e flexão, com menor custo computacional quando comparados aos elementos sólidos (BATHE, 1996, p. 528).

De forma geral, uma análise por elementos finitos é composta pelas etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento. No pré-processamento são definidos a geometria, as propriedades do material, as condições de contorno, os contatos e a malha. Durante o processamento, o software resolve numericamente as equações de equilíbrio, enquanto no pós-processamento são obtidos resultados como deslocamentos, tensões e deformações (MADIER,

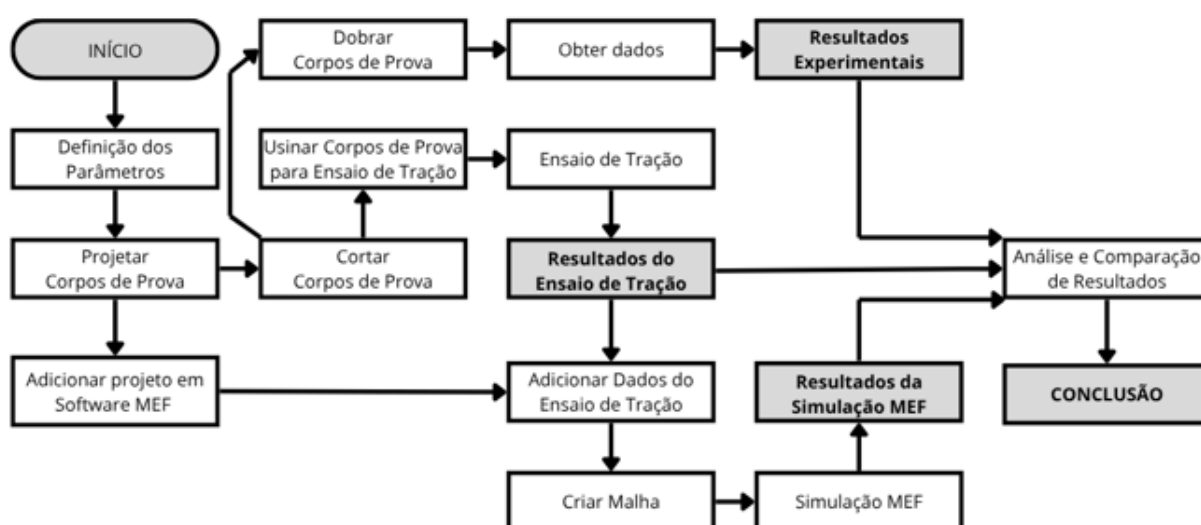
2020, p. 52–53).

Atualmente, softwares comerciais, como o Abaqus, são amplamente empregados na simulação de processos de conformação mecânica, permitindo avaliar previamente o comportamento do material e prever o retorno elástico com boa precisão, desde que os modelos sejam adequadamente calibrados e validados experimentalmente (SILVA, 2022).

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Este capítulo fornece a descrição estruturada das etapas do projeto, incluindo materiais utilizados, procedimentos de experimentação e as técnicas de simulação. As atividades foram organizadas cronologicamente, iniciando com a definição de parâmetros, seguindo com a preparação dos materiais expostos e finalizando com a execução dos ensaios mecânicos e análises dos corpos de prova. As especificações das chapas de aço LNE 250 escolhidas foram determinadas pela aplicação prática na indústria, com o objetivo de refletir as condições reais de fabricação. O fluxograma proposto para o desenvolvimento metodológico deste estudo está ilustrado na Figura 10, que também serve como um guia para as atividades realizadas e para a integração dos dados obtidos durante as fases experimental, analítica e numérica.

Figura 10 - Diagrama de Etapas



Fonte: O Autor (2026)

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

O material utilizado neste trabalho é o aço LNE 250, utilizado na empresa Randon Implementos, onde também foram realizadas as etapas experimentais. As amostras foram retiradas a partir de chapas em uso na linha de produção da empresa, sendo preparadas em conjunto com peças reais utilizadas na fabricação

de seus produtos.

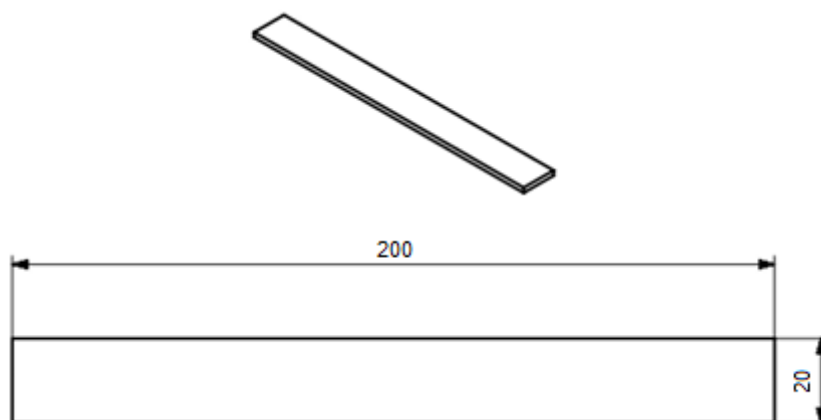
Na Randon, esse material é identificado internamente pela nomenclatura LN RAND 250. O fornecimento do LNE 250 é realizado pela empresa Usiminas, tradicional produtora de aços planos no Brasil. Para o estudo proposto, foram selecionadas amostras com três diferentes espessuras, a fim de possibilitar uma análise comparativa do comportamento mecânico durante o processo de dobra. As espessuras utilizadas foram: 3,00 mm, 4,75 mm e 6,35 mm.

3.1.1 Corpos de Prova

Foram definidos dois modelos de corpos de prova: um para o ensaio de tração (CPT) e outro para os ensaios experimentais de dobra (CPD). Os corpos de prova do tipo CPT seguiram a norma ABNT NBR 6292-1:2015. Após o corte a laser, as regiões afetadas termicamente (ZTA) foram usinadas, garantindo a integridade da área útil e a remoção completa da zona afetada termicamente (CALLISTER; RETHWISCH, 2012, p. 132). As bordas foram lixadas manualmente para remover rebarbas e evitar a concentração de tensões (DIETER, 1981, p. 293). Outra opção é o corte por guilhotina, não havendo desenvolvimento de ZTA neste processo, todavia, também foi necessária a usinagem para remoção das bordas afetadas, encruadas pelo cisalhamento e remoção de possíveis microtrincas superficiais, que podem provocar concentrações de tensão e falhas prematuras nos ensaios.

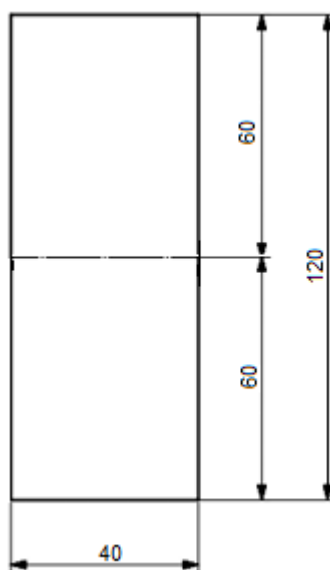
Os corpos de prova do tipo CPD, utilizados nos ensaios de dobra, também foram cortados em equipamento de corte a laser e usinados, a fim de remover a ZTA gerada a partir do processo de corte térmico.

Figura 11 - Corpo de Prova para Tração



Fonte: O Autor (2026)

Figura 12 - Corpo de Prova para Dobramento



Fonte: O Autor (2026)

Quadro 4 - Quantidade de Amostras de Corpos de Prova

Ensaio	Espessura (mm)	Orientação	Amostras (un.)
Tração	3	0°	3
		45°	3
		90°	3
	4,75	0°	3
		45°	3
		90°	3
	6,35	0°	3
		45°	3
		90°	3
Dobramento	3	0°	3
		45°	3
		90°	3
	4,75	0°	3
		45°	3
		90°	3
	6,35	0°	3
		45°	3
		90°	3

Fonte: O Autor (2026)

3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório da Universidade de Caxias do Sul, utilizando a máquina universal de ensaios mecânicos Emic DL20000. Para garantir elevada precisão na determinação das propriedades mecânicas e na aquisição dos dados de deformação, os testes foram realizados com a utilização de extensômetros, proporcionando maior precisão e confiabilidade aos resultados obtidos. O objetivo do ensaio foi determinar propriedades mecânicas fundamentais dos materiais, como módulo de elasticidade (E), limite de escoamento (σ_E), tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e índice de encruamento (n), parâmetros necessários para as análises analíticas e simulações computacionais.

Para isso, 9 unidades de corpos de prova (CPT) para cada espessura de chapa foram testadas, sendo 3 corpos de prova cortados a 0°, 3 unidades a 45° e mais 3 a 90°, totalizando 27 ensaios. Testes realizados conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 6673:1981, com velocidade de deformação controlada.

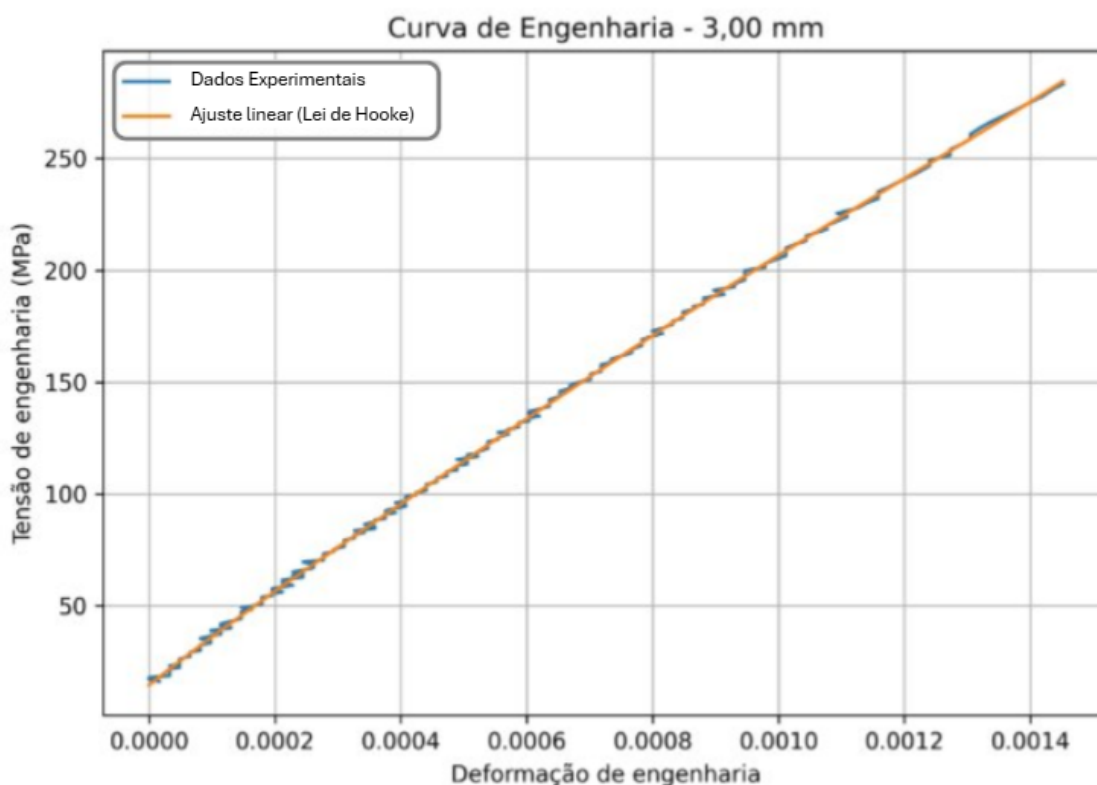
3.2.1 Construção da Curva de Engenharia

Após a realização dos ensaios de tração, foram obtidos os dados brutos de tempo, força aplicada e deslocamento do corpo de prova. A partir dessas informações, foi construída a curva tensão-deformação, também conhecida como curva de engenharia, utilizada para caracterizar o comportamento mecânico do material nas regiões elástica e plástica.

Para a construção da curva, a tensão normal (σ) foi calculada pela razão entre a carga aplicada (P) e a área inicial da seção transversal do corpo de prova (S_0), medida antes do início do ensaio. A deformação específica de engenharia (ε) foi obtida pela relação entre o alongamento do corpo de prova (Δl) e o comprimento útil inicial (l_0). A partir desses valores foi possível construir a curva tensão $\times$ deformação e determinar propriedades mecânicas como a tensão de escoamento (σ_E) e a tensão máxima ($\sigma_{\max}$).

Para a determinação do módulo de elasticidade (E), foi aplicada uma linha de tendência linear apenas sobre os pontos pertencentes à região elástica da curva, onde o comportamento do material obedece à Lei de Hooke. Essa linha foi obtida por meio de uma regressão linear dos dados experimentais, resultando em uma equação do tipo $\sigma = E\varepsilon + b$, em que o coeficiente angular da reta corresponde ao módulo de elasticidade do material. Conforme ilustrado na Figura 13, observou-se elevada concordância entre a linha de tendência e os dados experimentais, indicando comportamento linear na região elástica e proporcionando uma determinação mais precisa do valor de E , reduzindo a influência de pequenas oscilações experimentais presentes nos dados do ensaio.

Figura 13– Método de obtenção Módulo Elasticidade



Fonte: O Autor (2026)

3.2.2 Construção da Curva Real

Após a construção da curva de engenharia, os dados experimentais foram tratados para a obtenção da curva real de tensão-deformação. Este gráfico forneceu uma representação mais precisa do comportamento do material durante o processo de conformação, sendo utilizado nos cálculos analíticos e nas simulações por elementos finitos.

O primeiro passo para a construção da curva real consistiu na correção da área da seção transversal do corpo de prova, que se altera ao longo do ensaio devido à deformação plástica. Para isso, a área instantânea (S_i) foi calculada com base na área inicial (S_0) da seção e na deformação de engenharia obtida em cada ponto da curva.

Em seguida, foi possível determinar a tensão verdadeira (k_f). Este valor foi calculado dividindo-se a força aplicada (P) em cada instante pela área instantânea

da seção (S_i) correspondente.

Já a deformação verdadeira (φ) foi obtida a partir de uma conversão da deformação de engenharia, levando em consideração a variação contínua do comprimento ao longo do ensaio.

Os valores de tensão (σ) e deformação verdadeira (φ) foram organizados em uma planilha, possibilitando a construção da curva real Tensão x Deformação Verdadeira, a qual representa com maior fidelidade o comportamento elasto-plástico do material, especialmente nas regiões de grandes deformações.

Para caracterizar o comportamento do material na fase plástica, foi aplicada uma linha de tendência do tipo potência na região da curva entre a tensão de escoamento (σ_E) e a tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$). A equação ajustada em escala logarítmica resultou em dois parâmetros: a constante da equação ajustada fornece o coeficiente de resistência (C) enquanto o coeficiente angular da reta ajustada foi adotado como índice de encruamento (n). Esses coeficientes foram utilizados em equações complementares para previsão do comportamento plástico do material em análises posteriores.

Dessa forma, a curva real e os parâmetros extraídos permitiram uma avaliação mais precisa da resposta do material frente às solicitações mecânicas envolvidas nos processos de dobra e conformação.

3.2.3 Cálculo de Anisotropia

Os índices de anisotropia plástica r_{0° , r_{45° e r_{90° não foram determinados experimentalmente durante o desenvolvimento deste trabalho, tampouco foram encontrados valores específicos para o aço LNE 250 nas fontes bibliográficas consultadas. Contudo, estudos anteriormente publicados por Souza (2019) envolvendo o aço ABNT NBR 6656 LNE 380, material de composição e aplicação semelhantes ao LNE 250, sugeriram que a orientação em relação ao sentido de laminação exerce influência pouco significativa sobre o retorno elástico após o processo de dobramento. Dessa forma, considerando a similaridade entre os materiais e a ausência de dados específicos para o LNE 250, assumiu-se que os efeitos da anisotropia plástica sobre o retorno elástico foram pouco relevantes para as condições avaliadas neste estudo.

Dessa forma, optou-se por realizar as simulações numéricas considerando comportamento isotrópico do material, utilizando o critério de escoamento de Von Mises disponível no software Abaqus. Segundo Hosford e Caddell (2011), o critério de Von Mises é amplamente empregado na modelagem de materiais metálicos isotrópicos, apresentando resultados satisfatórios em análises de conformação quando não estavam disponíveis parâmetros específicos de anisotropia. De forma semelhante, Banabic (2010) destaca que modelos isotrópicos podem fornecer previsões adequadas para operações de dobramento, principalmente quando o objetivo está relacionado à avaliação do comportamento global do processo e não à caracterização detalhada da anisotropia plástica do material.

Para a caracterização do material no modelo numérico, foram utilizados os módulos de elasticidade, as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração e a curva tensão-deformação verdadeira determinada experimentalmente para cada espessura analisada. Conforme descrito por Dieter (1981) e Schaeffer (2004), a curva tensão-deformação verdadeira representa de forma mais fiel o comportamento plástico dos metais durante os processos de conformação, sendo amplamente utilizada na calibração de modelos numéricos.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE DOBRA

Para a realização dos ensaios de dobra, foram definidos previamente a abertura da matriz (V), o raio do punção e a força de dobra (F_{dc}), utilizando como base as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração, além de recomendações normativas e da literatura. A seleção do conjunto matriz-punção considerou tanto o raio mínimo de dobra recomendado para o material quanto a disponibilidade de ferramental industrial, buscando reproduzir condições reais de fabricação e garantir que os resultados obtidos sejam representativos da aplicação industrial.

A força de dobra (F_d) foi definida conforme a Equação 24, utilizando a tensão máxima do material ($\sigma_{m\acute{a}x}$) obtida no ensaio de tração considerando a direção 0° de laminação. A força de dobra corrigida (F_{dc}) foi calculada conforme proposto por Rodrigues e Martins (2010, p. 166) e pela norma DIN 6935, apresentada na Equação 25, considerando a espessura da chapa, o raio de punção e a abertura da matriz (V).

Os resultados para cada espessura e ferramental selecionado são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Parâmetros Matriz e Punção

Espessura (mm)	Raio de Dobra			Matriz V			
	Método	Raio de Dobra (mm)	Razão r/h	V Recomendado (mm)		V Definido (mm)	Razão V/h
				Min (6h)	Máx (12h)		
3,00	Usiminas	0	0,0	18	36	24	8,0
	Randon	3,00	1,0				
	NBR-6656 LNE	4,50	1,5				
	Dieter (1981)	9,00	3,0				
4,75	Usiminas	0	0,0	28,5	57	30	6,3
	Randon	4,00	0,84				
	NBR-6656 LNE	7,13	1,5				
	Dieter (1981)	14,25	3,0				
6,35	Usiminas	0	0,0	38,1	76,2	60	9,4
	Randon	8,00	1,26				
	NBR-6656 LNE	9,53	1,5				
	Dieter (1981)	19,05	3,0				

Fonte: O autor (2026)

Quadro 6 - Ferramental Definido e Força de Dobra

Espessura (mm)	Raio de Dobra		Matriz V	Força de Dobra		
	Método	Raio de Dobra (mm)	V Definido (mm)	σ máx (MPa)	Fd (kN)	Fdc (kN)
3,00	Randon	3,00	24	473	8,51	10,64
4,75	Randon	4,00	30	431	15,53	21,13
6,35	Randon	8,00	60	469	15,13	17,95

Fonte: O autor (2026)

Estes parâmetros foram fundamentais para garantir que o equipamento utilizado possuía a capacidade exigida pelo processo seguindo o processo de dobra ao ar, na máquina universal de ensaios Wolpert Panantec, pertencente ao laboratório da empresa Randon Implementos, com ferramentas adequadas ao material e às condições necessárias para o experimento.

Durante o teste, os corpos de prova foram conformados e os tamanhos antes e depois da dobra foram registrados. A partir desses procedimentos, foi possível determinar o fator experimental K. Esses resultados foram utilizados para realizar a comparação dos valores obtidos por métodos teóricos, analíticos e pelo método dos elementos finitos, permitindo a análise do comportamento do material em diferentes espessuras.

Figura 14 - Máquina universal de ensaios Wolpert Panantec (Dobra)



Fonte: O Autor (2026)

Após o processo de dobramento das amostras na máquina de ensaios, as amostras foram enviadas para o laboratório dimensional da empresa Castertech Fundição e Tecnologia, situada em Caxias do Sul. No laboratório foi realizada a medição precisa através do perfilômetro CNC Mitutoyo Formtracer SV-4500, garantindo precisão necessária nos dados geométricos para a análise experimental do retorno elástico.

Figura 15 - Perfilômetro CNC Mitutoyo Formtracer SV-4500



Fonte: O Autor (2026)

3.4 CÁLCULO ANALÍTICO

Após realização dos ensaios de tração, testes de dobramento e a obtenção dos dados experimentais e das propriedades mecânicas dos materiais, foram aplicados os três modelos analíticos para estimar o retorno elástico e o ângulo final da dobra: Dieter (1981), Schaeffer, Nunes e Brito (2017), e Hosford e Caddell (2007).

No método proposto por Dieter (1981), é inicialmente determinada a razão entre os raios interno e final da peça após a liberação da carga. A partir dessa relação e com base nas propriedades do material obtidas no teste de tração, foi possível calcular o fator de retorno elástico. Com esse fator, então, foi estimado o ângulo final da dobra (α_f) por meio da Equação 13, realizando posteriormente a conversão para o ângulo interno final.

Já no modelo de Schaeffer, Nunes e Brito (2017), o procedimento envolve o cálculo do momento de dobramento (M_b) da chapa com base na força aplicada e no braço de alavanca definido pela geometria da matriz utilizada. Em seguida, foi calculado o fator de retorno elástico (K_s) através da Equação 10, levando em

consideração variáveis como o módulo de elasticidade (E), a espessura da chapa (h) e o comprimento da região dobrada (L). A partir desse fator, o ângulo interno final foi obtido de forma direta.

Por fim, o método de Hosford e Caddell (2007) foi utilizado para estimar o raio interno após o retorno elástico. Para isso, o método utilizou o coeficiente de resistência (C) e o índice de encruamento (n) obtidos da curva tensão-deformação real. Além disso, considera as propriedades geométricas e mecânicas do material. Após obter o raio, a equação de Dieter foi utilizada para convertê-lo em ângulo. Em seguida, o ajuste foi realizado para apresentar o valor como ângulo interno final.

Os resultados dos três métodos foram comparados com os valores medidos experimentalmente. Essa comparação permitiu verificar a precisão e a aplicabilidade de cada modelo para as condições do aço LNE 250 analisadas neste trabalho.

3.5 SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS

A simulação computacional foi realizada utilizando o software Abaqus CAE, desenvolvido pela empresa Simulia, do grupo Dassault Systèmes. O programa permitiu o desenvolvimento completo da análise, abrangendo as etapas de pré-processamento, como modelagem geométrica, definição das propriedades do material, condições de contorno e carregamento, até o pós-processamento, envolvendo a execução da simulação e a análise dos resultados obtidos.

Considerando que o processo de dobramento analisado neste trabalho apresentou comportamento quase-estático e convergência satisfatória, optou-se pela utilização do Abaqus/Standard, que emprega o método implícito de integração, o que permitiu representar adequadamente o comportamento do material durante as etapas de carregamento e descarregamento.

Inicialmente, foram criadas as geometrias no ambiente bidimensional (2D) do próprio CAD integrado ao Abaqus, sendo definidos três componentes principais: o corpo de prova, modelado como corpo deformável utilizando elementos de casca (*shell*), o punção com o raio especificado e a matriz, ambos definidos como corpos rígidos analíticos, desconsiderando deformações nesses componentes.

Em seguida, foram atribuídas ao corpo de prova as propriedades do material obtidas nos ensaios de tração, incluindo densidade, módulo de elasticidade (E),

coeficiente de Poisson (ν) e a curva de tensão-deformação verdadeira. Posteriormente, o conjunto foi montado na posição inicial de contato e foram definidas as etapas da simulação: inicialmente, a descida do punção até a conformação da chapa e, na sequência, a retirada da carga para avaliação do retorno elástico. Também foi configurada a malha, gerada com elementos de casca (*shell*), definindo-se o tamanho dos elementos de acordo com as necessidades da análise.

Após a simulação, os resultados foram analisados com o auxílio da ferramenta COORD, que permitiu extrair as coordenadas dos nós da peça deformada e realizar a medição precisa do ângulo interno antes e após a retirada da carga aplicada pelo punção, o que tornou possível a comparação com os resultados obtidos pelos modelos analíticos e pelos ensaios experimentais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICA DO MATERIAL

A caracterização mecânica do aço LN250 foi realizada por meio de ensaios de tração em corpos de prova extraídos em diferentes orientações em relação ao sentido de laminação da chapa. A partir dos resultados foram determinadas as propriedades mecânicas de engenharia e os parâmetros da curva real utilizados em análises de dobramento apresentadas nos capítulos seguintes.

4.1.1 Curvas de Engenharia

As curvas de engenharia foram obtidas a partir dos ensaios de tração realizados, conforme descrito na Seção 3.2.1. Os dados fornecidos pela máquina de ensaio foram tratados para a construção das curvas tensão-deformação e para a obtenção das propriedades mecânicas.

O Quadro 6 apresenta os valores de tensão de escoamento (σ_E), tensão máxima ($\sigma_{\max}$), módulo de elasticidade (E) e alongamento obtidos experimentalmente. Os gráficos gerados a partir dos ensaios de tração do aço LN250, nas espessuras de 3,00 mm, 4,75 mm e 6,35 mm, são apresentados no Apêndice G.

Quadro 7 - Propriedades Mecânicas - Ensaio de Tração LNE250

Espessura [mm]	Orientação	Tensão de Escoamento [MPa]	Tensão Máxima [MPa]	Módulo de Elasticidade [MPa]	Alongamento [%]
3,00	0°	342	473	203623	33,6
	45°	342	457	202362	33,2
	90°	349	462	202718	29,4
	Desvio Padrão	4,0	8,2	650	2,32
4,75	0°	301	431	202587	40,4
	45°	293	432	204495	36,6
	90°	289	429	201428	35,2
	Desvio Padrão	6,1	1,5	1549	2,69
6,35	0°	324	469	201206	35,8
	45°	311	459	190097	22
	90°	298	439	202496	25,1
	Desvio Padrão	13,0	15,3	6817	7,24
ASTM A1011 SS Grade 36 Type 2 / Randon		250	400-550	-	21
Catálogo Usiminas	LNE 230	230 à 360	330 à 460	-	30
	LNE 260	260 à 390	370 à 500	-	

Fonte: O Autor (2026)

Todos os resultados de tensão e alongamento obtidos mantiveram-se dentro das especificações da norma e dos requisitos estabelecidos pela empresa, conforme apresentado no Quadro 6.

Os resultados demonstraram que as propriedades mecânicas do material apresentaram pequenas variações em função da espessura da chapa e da orientação em relação à direção de laminação. As amostras de 3,00 mm apresentaram os maiores valores de tensão de escoamento e de tensão máxima, indicando maior resistência ao início da deformação plástica e à ruptura quando comparadas às demais espessuras avaliadas. Por outro lado, as chapas de 4,75 mm exibiram os menores níveis de tensão de escoamento e os maiores valores de alongamento, evidenciando maior capacidade de deformação antes da fratura. Esse comportamento sugeriu uma condição mais favorável entre resistência mecânica e ductilidade para essa espessura.

Os desvios-padrão observados para a espessura de 6,35 mm indicaram maior dependência das propriedades mecânicas em relação à orientação do material, comportamento normalmente associado às variações microestruturais decorrentes do processo de laminação. Em contrapartida, as amostras de 3,00 mm apresentaram menor dispersão dos resultados, evidenciando comportamento mais uniforme nas três direções analisadas. O módulo de elasticidade permaneceu próximo de 200 GPa para todas as condições avaliadas, demonstrando que essa propriedade sofreu pouca influência tanto da espessura quanto da orientação do ensaio, conforme esperado para aços de mesma classe e composição química semelhante.

Embora a espessura de 6,35 mm tenha apresentado maior dispersão das propriedades mecânicas entre as direções de laminação, essa variação permaneceu relativamente pequena quando comparada aos valores médios obtidos e manteve-se dentro das especificações do material. Além disso, conforme verificado nos ensaios de dobramento apresentados nas seções seguintes, essas diferenças não se refletiram de forma significativa no comportamento do retorno elástico, indicando que a orientação em relação ao sentido de laminação exerceu influência limitada sobre a resposta mecânica do material nas condições avaliadas neste estudo.

4.1.2 Curvas Reais

A curva real foi obtida a partir do tratamento dos dados fornecidos pela máquina de ensaio de tração. O procedimento descrito na Seção 3.2.2 foi realizado através de uma planilha eletrônica, na qual também foram geradas as curvas de tensão e deformação reais. Para determinar as propriedades mecânicas utilizadas neste estudo, foram considerados os resultados dos corpos de prova extraídos na direção de 0°, correspondente ao mesmo sentido de laminação.

A partir do ajuste da curva real foi possível determinar o coeficiente de resistência (C), determinado a partir do parâmetro constante da curva e o índice de encruamento (n) a partir do coeficiente angular na região plástica do material pela equação de Hollomon (Equação 4). Parâmetros fundamentais para caracterizar o comportamento do material no processo de conformação mecânica e realização das análises teóricas deste trabalho.

O Quadro 7 apresenta as equações de tensão real obtidas experimentalmente para cada espessura, isolando os respectivos valores do coeficiente de resistência e do índice de encruamento.

Quadro 8 - Propriedades Mecânicas LNE250

Espessuras (mm)	Referências	Equação $kf = C * \varphi^n$	Coeficiente de Resistência (MPa)	Índice de Encruamento
3,00	Experimental	$kf = 699 * \varphi^{0,135}$	699	0,135
4,75	Experimental	$kf = 642 * \varphi^{0,139}$	642	0,139
6,35	Experimental	$kf = 679 * \varphi^{0,153}$	679	0,153

Fonte: O autor (2026)

Observou-se que o coeficiente de resistência (C) apresentou valores próximos entre as amostras, variando de 642 MPa a 699 MPa, indicando comportamento semelhante quanto à resistência ao escoamento plástico durante a conformação. A chapa de 3,00mm apresentou o maior valor de (C), sugerindo maior resistência à deformação plástica quando comparada às demais espessuras, enquanto a chapa de 4,75 mm apresentou o menor valor entre as amostras analisadas.

Em relação ao índice de encruamento (n), os valores obtidos variaram entre 0,135 e 0,153, indicando que o aço LNE 250 manteve comportamento plástico relativamente uniforme e dentro da faixa indicada na bibliografia nas diferentes

espessuras avaliadas. Observou-se, entretanto, uma tendência de aumento do índice de encruamento com o acréscimo da espessura da chapa, sendo o maior valor registrado para a espessura de 6,35mm, indicando um maior aumento de resistência conforme ocorreu a deformação plástica.

4.2 RESULTADOS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a obtenção dos resultados experimentais, os corpos de prova foram conformados até a obtenção do ângulo interno de 90°, conforme a metodologia descrita na Seção 3.3 deste trabalho. Com o objetivo de garantir repetibilidade do processo e precisão na conformação da medida interna, as primeiras amostras foram descartadas. Para cada espessura, foram avaliados três corpos de prova.

Após a conformação, as amostras foram encaminhadas para o laboratório dimensional da empresa Castertech. Os relatórios completos das medições são apresentados no Apêndice A. Os Quadros 8, 9 e 10 apresentam os resultados experimentais obtidos para cada condição analisada.

Quadro 9 - Resultados de medição para espessura 3,00mm

		Ângulo			Raio (mm)		
Amostra	Orientação	Ângulo Final (°)	Desvio Padrão	Média Angular (°)	Raio de Dobra	Raio	Raio Médio
1	0	94,09	0,65	94,84	3	4,48	4,50
2		95,15				4,48	
3		95,27				4,55	
4	45	94,22	0,06	94,15		4,52	4,48
5		94,10				4,45	
6		94,13				4,47	
7	90	94,26	0,20	94,41		4,48	4,49
8		94,64				4,55	
9		94,33				4,44	

Fonte: O autor (2026)

Os resultados obtidos para a chapa de 3,00 mm demonstraram boa repetibilidade do processo de dobramento, evidenciada pelos baixos desvios padrão e pela pequena variação entre os valores médios de ângulo e raio de dobra nas diferentes orientações em relação ao sentido de laminação. Os ângulos médios finais variaram entre 94,150° e 94,835°, resultando em média geral 94,465°.

enquanto os raios resultantes tiveram uma média global de 4,49mm, indicando baixa variação entre as amostras com diferentes orientações de laminação, conforme constatado anteriormente também por Souza (2019).

Observou-se ainda que todos os ângulos medidos foram superiores aos 90° programados, caracterizando a ocorrência de retorno elástico após a remoção da carga. As pequenas diferenças verificadas entre as direções de 0°, 45° e 90° sugeriram que a orientação do material exerceu influência pouco significativa sobre a geometria final das peças dobradas.

Quadro 10 - Resultados de medição para espessura 4,75mm

		Ângulo			Raio (mm)		
Amostra	Orientação	Ângulo Final (°)	Desvio Padrão	Média Angular (°)	Raio de Dobra	Raio	Raio Médio
10	0	91,17	0,39	91,21	4	5,60	5,66
11		91,63				5,73	
12		90,85				5,66	
13	45	91,00	0,05	91,04		5,56	5,63
14		91,10				5,56	
15		91,02				5,78	
16	90	91,16	0,04	91,16		5,57	5,55
17		91,12				5,58	
18		91,20				5,50	

Fonte: O autor (2026)

Os resultados obtidos para a chapa de 4,75 mm demonstraram boa repetibilidade do processo, evidenciada pela baixa dispersão dos valores medidos e pela pequena variação entre os ângulos médios nas direções de 0°, 45° e 90° em relação ao sentido de laminação. Os ângulos finais permaneceram próximos de 91°, indicando comportamento semelhante entre as amostras e baixa influência da orientação na geometria final.

Os raios médios obtidos variaram entre 5,548 mm e 5,659 mm, apresentando também baixa dispersão. Também foi possível observar o retorno elástico, confirmado pelos ângulos finais superiores aos 90° programados, porém inferior à verificada para a chapa de 3,00 mm, resultando em uma geometria final mais

próxima da condição nominal do projeto. As médias globais angulares e de raio para espessura de 4,75mm corresponderam a 91,138° e 5,612mm respectivamente.

Quadro 11 - Resultados de medição para espessura 6,35mm

		Ângulo			Raio (mm)		
Amostra	Orientação	Ângulo Final (°)	Desvio Padrão	Média Angular (°)	Raio de Dobra	Raio	Raio Médio
19	0	92,26	0,38	92,21	8	8,88	8,83
20		92,58				8,78	
21		91,81				8,83	
22	45	92,53	0,23	92,26		8,82	8,80
23		92,09				8,85	
24		92,17				8,72	
25	90	92,41	0,10	92,33		8,72	8,81
26		92,22				9,08	
27		92,36				8,62	

Fonte: O autor (2026)

Os resultados obtidos para a chapa de 6,35 mm demonstraram boa repetibilidade do processo de dobramento, mostrada pelos baixos desvios padrão e pela variação dos ângulos médios entre as orientações de 0°, 45° e 90° em relação ao sentido de laminação. Os ângulos finais apresentaram valor médio igual a 92,268°, a baixa variação demonstrou comportamento uniforme entre as amostras e também, assim como nas amostras anteriores, baixa influência da orientação na geometria final das peças.

A média dos raios de dobra obtidos convergiu para 8,812 mm, também com pequena variação entre as diferentes orientações. Embora tenha sido observado retorno elástico, caracterizado pelos ângulos finais superiores aos 90° programados, sua magnitude manteve-se consistente entre as amostras. Os resultados indicaram que a espessura de 6,35 mm apresentou comportamento estável durante o dobramento, boa repetibilidade dimensional e conformação homogênea nas diferentes direções de laminação.

4.3 RESULTADOS DO CÁLCULO ANALÍTICO

Os resultados apresentados no Quadro 11 demonstraram que todos os modelos analíticos avaliados foram capazes de prever a ocorrência de retorno elástico, uma vez que os ângulos calculados foram superiores aos 90° programados. Contudo, foi possível constatar que os valores obtidos pelos métodos de Dieter (1981), Hosford e Caddell (2007) e Schaeffer, Nunes e Brito (2017) apresentaram diferenças significativas em relação aos resultados experimentais, principalmente para as espessuras de 3,00 mm e 6,35 mm. De modo geral, os modelos teóricos estimaram ângulos finais próximos de 90,2° a 90,7°, enquanto os ensaios experimentais resultaram em ângulos entre 91,0° e 94,8°, indicando que os métodos analíticos subestimaram a magnitude do retorno elástico observado na prática.

Quadro 12 - Resultados Bibliográficos vs. Experimentais

	Espessura								
	3			4,75			6,35		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Dieter (1981)	90,33	90,33	90,34	90,23	90,22	90,22	90,40	90,41	90,37
Hosford e Caddell (2007)	90,52	90,52	90,52	90,38	90,38	90,39	90,62	90,65	90,61
Schaeffer, Nunes e Brito (2017)	90,66	90,67	90,67	90,53	90,53	90,54	90,71	90,74	90,69
Experimental	94,84	94,15	94,41	91,22	91,04	91,16	92,22	92,26	92,33

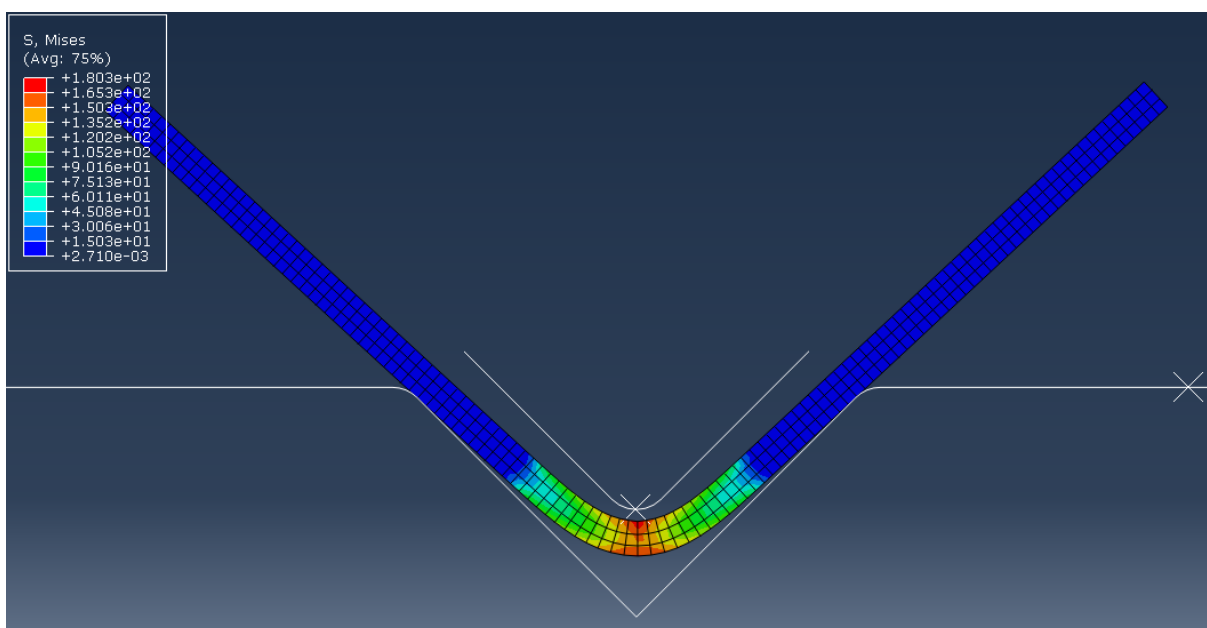
Fonte: O autor (2026)

Entre as espessuras avaliadas, a chapa de 4,75 mm apresentou a melhor concordância entre os resultados teóricos e experimentais, com diferenças próximas de 0,5°. Já para as chapas de 3,00 mm e 6,35 mm, as discrepâncias foram mais expressivas, alcançando aproximadamente 4,5° e 1,8°, respectivamente. Além disso, observou-se que as variações decorrentes da orientação foram pequenas, tanto nos resultados analíticos quanto nos experimentais, sugerindo que a orientação exerceu influência limitada sobre o retorno elástico nas condições estudadas. Dessa forma, os resultados indicaram que os modelos analíticos forneceram uma estimativa inicial satisfatória, porém não representam as condições reais do processo de dobramento, reforçando a importância da validação experimental para a definição de parâmetros mais precisos.

4.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS

Os resultados obtidos por meio da simulação em elementos finitos apresentaram boa concordância com os valores experimentais para as três espessuras analisadas. Para a chapa de 3,00 mm, o modelo previu um ângulo final de $94,45^\circ$, ilustrado na Figura 16, valor muito próximo aos resultados experimentais, que variaram entre $94,15^\circ$ e $94,84^\circ$. Para as espessuras de 4,75 mm e 6,35 mm, os ângulos simulados foram de $92,54^\circ$ e $93,30^\circ$, respectivamente, apresentando leve superestimação em relação aos valores medidos experimentalmente, conforme Quadro 12.

Figura 16 - Simulação 3,00mm (Springback)



Fonte: O autor (2026)

Quadro 13 - Simulação Abaqus CAE vs. Experimental

	Espessura (mm)								
	3			4,75			6,35		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Experimental	94,84	94,15	94,41	91,22	91,04	91,16	92,22	92,26	92,33
Abaqus CAE	94,45			92,54			93,3		

Fonte: O autor (2026)

De modo geral, a simulação reproduziu adequadamente a tendência do retorno elástico após a remoção da carga, demonstrando que o modelo numérico foi capaz de representar satisfatoriamente o comportamento do processo de dobramento. As diferenças observadas estiveram relacionadas às simplificações adotadas na modelagem, no contato e na discretização da malha, bem como às variações das propriedades microestruturais do material. Apesar disso, os resultados confirmaram a viabilidade da utilização do método dos elementos finitos como ferramenta de previsão do retorno elástico em operações de dobramento de chapas.

4.5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE OS MÉTODOS

Os resultados obtidos demonstraram que os modelos bibliográficos avaliados apresentaram tendência à subestimação do retorno elástico quando comparados aos valores experimentais. Embora tenham reproduzido a influência da espessura sobre o fenômeno, os ângulos previstos pelas metodologias permaneceram inferiores aos medidos experimentalmente para todas as condições analisadas. Em contrapartida, a modelagem por elementos finitos apresentou maior proximidade com os resultados experimentais, reproduzindo de forma aproximada a resposta mecânica do material durante o carregamento e descarregamento. Ainda que tenha ocorrido uma leve superestimação dos ângulos finais nas espessuras de 4,75 mm e 6,35 mm, os resultados numéricos apresentaram menor desvio em relação aos valores experimentais, indicando melhor representação de comportamento real do processo de dobramento. Dessa forma, concluiu-se que a abordagem por elementos finitos foi a metodologia que forneceu as previsões mais próximas dos resultados experimentais, enquanto os modelos analíticos mostraram-se adequados para estimativas preliminares do retorno elástico.

Quadro 14 - Comparativo Geral

	Espessura (mm)								
	3			4,75			6,35		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Dieter (1981)	90,33	90,33	90,34	90,23	90,22	90,22	90,40	90,41	90,37
Hosford e Caddell (2007)	90,52	90,52	90,52	90,38	90,38	90,39	90,62	90,65	90,61
Schaeffer, Nunes e Brito (2017)	90,66	90,67	90,67	90,53	90,53	90,54	90,71	90,74	90,69
Experimental	94,84	94,15	94,41	91,22	91,04	91,16	92,22	92,26	92,33
Abaqus CAE	94,45			92,54			93,3		

Fonte: O autor (2026)

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma análise comparativa do retorno elástico em chapas de aço LNE 250 com espessuras de 3,00 mm, 4,75 mm e 6,35 mm, por meio de abordagens bibliográfica, experimental e numérica. Os ensaios de tração demonstraram que as propriedades mecânicas do material apresentaram pequenas variações em função da espessura e da orientação em relação ao sentido de laminação. Os valores médios do módulo de elasticidade permaneceram próximos de 203 GPa para as chapas de 3,00 mm e 4,75 mm, enquanto a chapa de 6,35 mm apresentou média de aproximadamente 200 GPa. O coeficiente de resistência variou entre 642,27 MPa e 699 MPa, e o índice de encruamento entre 0,135 e 0,153, indicando comportamento plástico relativamente uniforme nas condições analisadas.

Os resultados experimentais confirmaram a ocorrência de retorno elástico em todas as espessuras avaliadas. A chapa de 3,00 mm apresentou o maior retorno elástico, com ângulo médio final de $94,47^\circ$, correspondente a uma recuperação elástica de aproximadamente $4,47^\circ$. Para as chapas de 4,75 mm e 6,35 mm, foram obtidos ângulos médios de $91,14^\circ$ e $92,27^\circ$, correspondendo a retornos elásticos de aproximadamente $1,14^\circ$ e $2,27^\circ$, respectivamente. As diferenças observadas entre as direções de laminação (0° , 45° e 90°) foram reduzidas, sugerindo que, nas condições estudadas, a orientação exerceu influência limitada sobre a geometria final das peças dobradas.

Os modelos analíticos avaliados foram capazes de prever a ocorrência do retorno elástico, porém apresentaram tendência à subestimação de sua magnitude quando comparados aos resultados experimentais. Para a chapa de 3,00 mm, os modelos forneceram ângulos entre $90,33^\circ$ e $90,67^\circ$, enquanto o valor experimental médio foi de $94,47^\circ$, resultando em diferenças superiores a $3,8^\circ$. Para a espessura de 4,75 mm, as previsões variaram entre $90,22^\circ$ e $90,54^\circ$, apresentando melhor concordância com o resultado experimental de $91,14^\circ$. Já para a chapa de 6,35 mm, os modelos estimaram ângulos entre $90,37^\circ$ e $90,76^\circ$, inferiores ao valor experimental médio de $92,27^\circ$. Essas diferenças evidenciam que os modelos analíticos são adequados para fornecer estimativas preliminares do retorno elástico, porém necessitam de validação experimental para aplicações em condições reais de fabricação.

A modelagem por elementos finitos apresentou os resultados mais próximos dos valores experimentais, prevendo ângulos finais de $94,45^\circ$, $92,54^\circ$ e $93,30^\circ$ para as espessuras de 3,00 mm, 4,75 mm e 6,35 mm, respectivamente. A diferença entre a simulação e o resultado experimental foi inferior a $0,1^\circ$ para a chapa de 3,00 mm, enquanto para as demais espessuras foram observadas diferenças de aproximadamente $1,4^\circ$ e $1,0^\circ$. Apesar da boa concordância obtida, ressalta-se que o modelo numérico considerou o material isotrópico e que sua precisão depende da adequada definição das propriedades mecânicas, das condições de contato e das simplificações adotadas na modelagem. Dessa forma, a simulação por elementos finitos mostrou-se uma ferramenta promissora para a previsão do retorno elástico, desde que previamente calibrada e validada para as condições de material e processo analisadas.

Dessa forma, considera-se que o objetivo geral deste trabalho foi alcançado, uma vez que foi possível comparar as abordagens bibliográfica, experimental e numérica na previsão do retorno elástico em chapas de aço LNE 250, identificando as potencialidades e limitações de cada metodologia. Os resultados obtidos ampliam o entendimento do comportamento do retorno elástico nesse material e fornecem dados experimentais e numéricos que podem servir de referência para estudos futuros e para o aperfeiçoamento de modelos de previsão aplicados à conformação mecânica. Assim, os resultados apresentados atendem aos objetivos propostos e reforçam a importância da integração entre abordagens experimental, analítica e numérica para aumentar a confiabilidade das previsões do retorno elástico e contribuir para o desenvolvimento de processos de dobramento com maior precisão dimensional.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTURO

- I. Aplicar a metodologia desenvolvida neste trabalho em outros materiais, como aços de alta resistência, aços inoxidáveis e ligas de alumínio, considerando a influência da anisotropia no comportamento do retorno elástico.
- II. Investigar a influência da abertura da matriz (V) no retorno elástico, analisando diferentes relações entre a espessura da chapa e a geometria das ferramentas de dobramento.
- III. Determinar experimentalmente o raio mínimo de dobra do aço LNE 250 por meio de análises macrográficas, relacionando a ocorrência de defeitos, trincas e deformações localizadas com a capacidade de conformação do material.
- IV. Avaliar o efeito da velocidade de dobramento sobre o retorno elástico, verificando possíveis alterações no comportamento mecânico e na precisão dimensional das peças conformadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6292-1:2015 – Materiais metálicos — Ensaio de tração — Parte 1: Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892-1:2020 – Materiais metálicos — Ensaio de tração — Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ArcelorMittal Brasil. **Catálogo técnico – Aços para estampagem: LNE, LE, LSE, LH**. Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com>. Acesso em: 10 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6656: Produtos laminados de aço-carbono de qualidade comercial e de qualidade estampável — Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6673: Materiais metálicos — Ensaio de tração — Velocidade de deformação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

ASTM. **ASTM E517-20: Standard test method for plastic strain ratio r for sheet metal**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E8/E8M – Standard test methods for tension testing of metallic materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. **Produto Interno Bruto – PIB por setor econômico 2019**. Porto Alegre: Fundação de Economia e Estatística – FEE, 2020. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br>. Acesso em: 10 maio 2025.

BANABIC, Dorel. ***Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation***. Berlin: Springer, 2010.

BATHE, K. J. **Finite element procedures**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CALLISTER Jr., W. D. **Materials science and engineering**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

CAMPOS, Polleri P. de. **Manual de corte e quinagem de chapa metálica**. Lisboa: CETOP, 1984.

CHEMIN FILHO, Ravilson Antônio. **Avaliação das deformações de chapas finas e curvas CLC para diferentes geometrias de punções**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica – Vol. 1: Materiais e processos de fabricação**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1986.

DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA CORP. **Abaqus 2024 Documentation**. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes, 2024. Disponível em: <https://help.3ds.com/>. Acesso em: 23 jun. 2026.

DAVIES, G. **Materials for automobile bodies**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 6935:1992 – Bending tools – Design of V-opening in lower dies**. Berlin: Beuth Verlag, 1992.

FERREIRA, M. B. **Conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2011.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A first course in finite elements**. New York: John Wiley & Sons, 2007. v. 1.

GAUSMANN, W. **Processos de conformação mecânica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2017. p. 25.

GHOSH, A.; CHATTERJEE, A. **Ironmaking and steelmaking: theory and practice**. New Delhi: PHI Learning, 2008.

GROOVER, M. P. **Princípios de processamento de materiais**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

GROOVER, Mikell P. **Princípios de processos de manufatura**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

HIBBELER, Russell C. **Resistência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HOSFORD, William; CADDELL, Robert. **Metal forming: mechanics and metallurgy**. 3. ed. New York: Cambridge University Press, 2007.

KUT, Stanisław; PASOWICZ, Grzegorz; STACHOWICZ, Feliks. **On the springback and load in three-point air bending of the AW-2024 aluminium alloy sheet with**

AW-1050A aluminium cladding. *Materials*, v. 16, n. 8, p. 2945, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16082945>

LANGE, K. **Handbook of metal forming.** New York: McGraw-Hill, 1985.

MADIER, R. **Introdução à análise de elementos finitos: aplicações em engenharia mecânica.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2020.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L.; HU, S. J. **Mechanics of sheet metal forming.** Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical behavior of materials.** 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

PALMEIRA, Alexandre Alvarenga; HABIBE, Alexandre Fernandes; JACOME, Paulo André Dias. **Técnicas de Modelagem de Conformação de Chapas por Elementos Finitos.** Cadernos UniFOA, v. 1, n. 1, p. ..., 2023. DOI: <https://doi.org/10.47385/cadunifoa.v1.n1.839>

REED-HILL, R. E.; ABBASCHIAN, R. **Physical metallurgy principles.** 4. ed. Boston: Cengage Learning, 2010.

RODRIGUES, J. M. C.; MARTINS, P. A. F. **Conformação plástica dos metais.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia mecânica: tecnologia da deformação plástica – fundamentos teóricos.** Lisboa: Escolar Editora, 2010.

SCHAEFFER, L. **Ensaio mecânicos e metalografia: fundamentos e aplicações.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2004.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica.** Porto Alegre: Imprensa Livre Editora, 2004.

SCHAEFFER, L.; NUNES, E. C.; BRITO, K. C. **Processos de conformação mecânica: fundamentos e aplicações.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

SCHULER. **Metal forming handbook.** Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.

SILVA, Jonatan Augusto da. **Processo de dobramento a frio de chapas finas metálicas: análises por elementos finitos, experimentos e uma proposta para a compensação do retorno elástico.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/17388>.

SILVA, R. H. **Estudo do comportamento mecânico em processos de dobramento de chapas metálicas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

TAVEIRA, R. S.; CAMPOS, R. M. **Elementos finitos: teoria e aplicações em engenharia**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

TOTTEN, G. E. **Steel heat treatment: metallurgy and technologies**. Boca Raton: CRC Press, 2006.

USIMINAS. **Tiras a quente**. Belo Horizonte: Usiminas, 2019. Catálogo técnico de produtos laminados a quente. Disponível em: <https://www.usiminas.com/wp-content/uploads/2019/11/TIRASQUENTE-PORT.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2026.

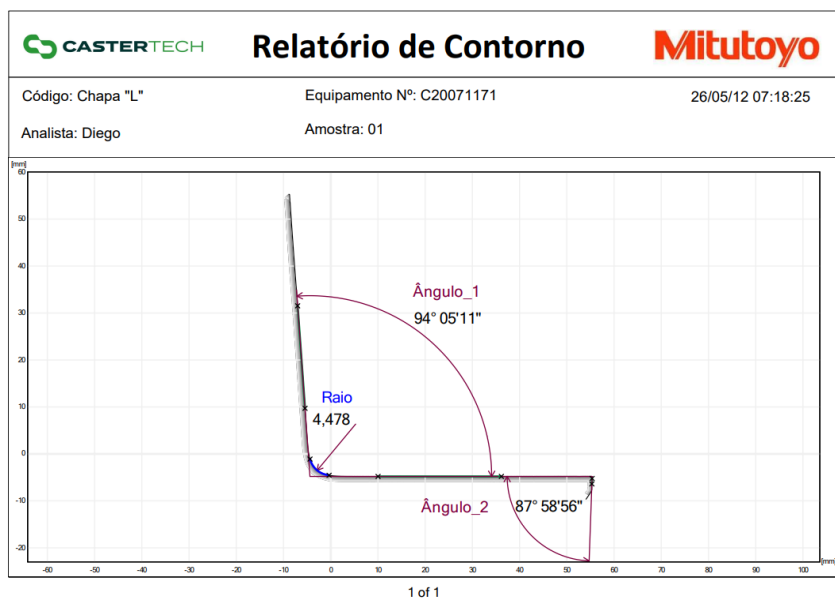
VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

WAGONER, R. H.; CHENOT, J.-L. **Metal Forming Analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

WAGONER, R. H.; CHU, E.; SHI, M. **Forming simulation: the past, present, and future**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 187–188, p. 13–20, 2007.

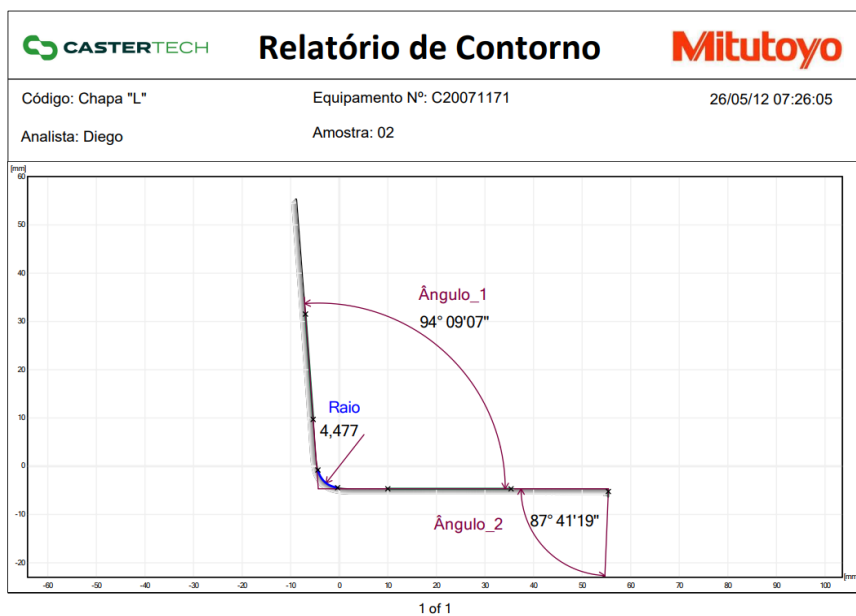
APÊNDICE A - RESULTADOS DA MEDIÇÃO DO TESTE EXPERIMENTAL DE DOBRAMENTO DE CADA ESPESSURA

Figura 17 - LNE250 3,00mm (Amostra 1 - Sentido 0°)



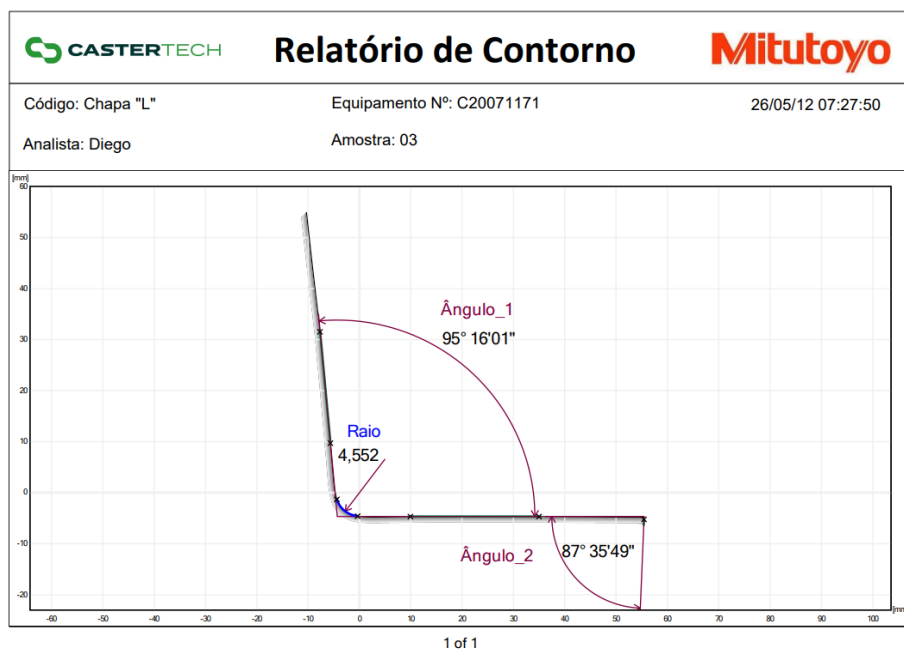
Fonte: O autor (2026)

Figura 18 - LNE250 3,00mm (Amostra 2 - Sentido 0°)



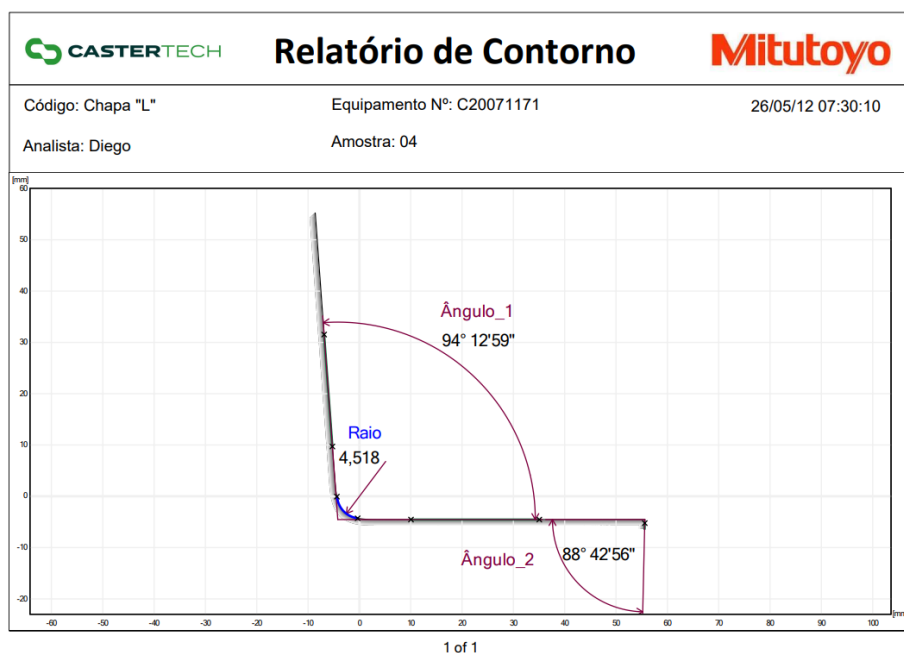
Fonte: O autor (2026)

Figura 19 - LNE250 3,00mm (Amostra 3 - Sentido 0°)



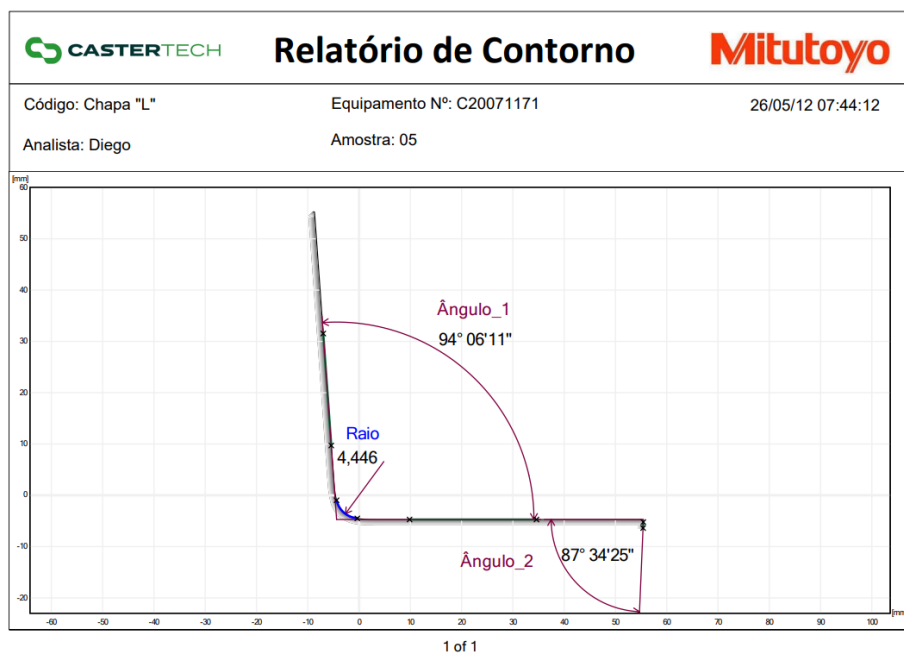
Fonte: O autor (2026)

Figura 20 - LNE250 3,00mm (Amostra 4 - Sentido 45°)



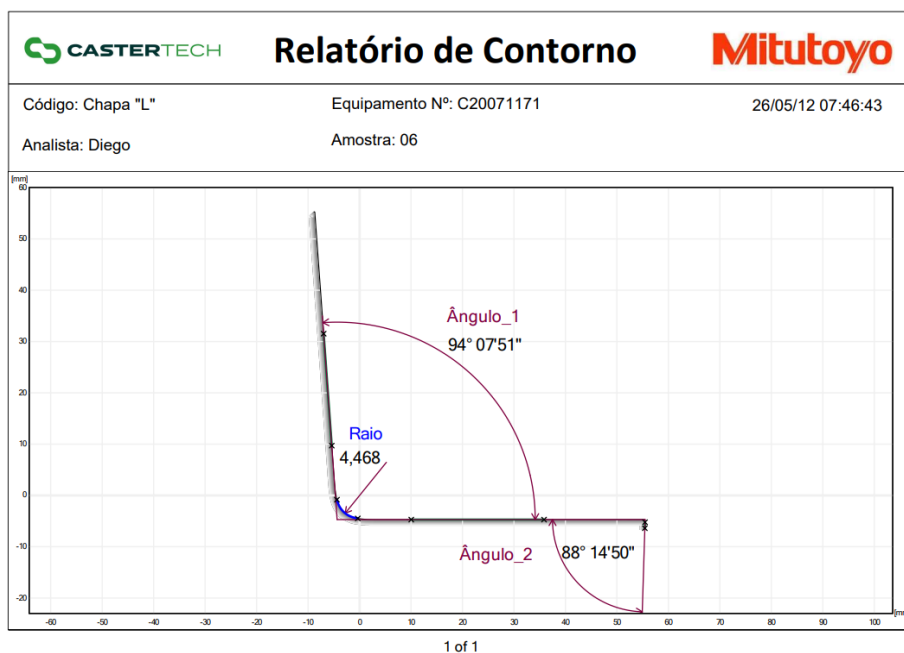
Fonte: O autor (2026)

Figura 21 - LNE250 3,00mm (Amostra 5 - Sentido 45°)



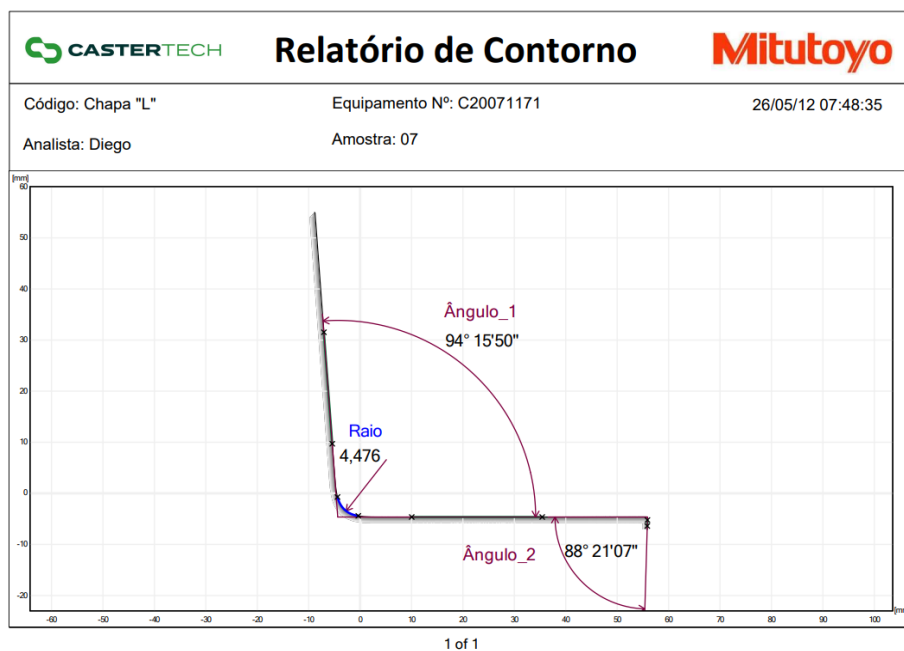
Fonte: O autor (2026)

Figura 22 - LNE250 3,00mm (Amostra 6 - Sentido 45°)



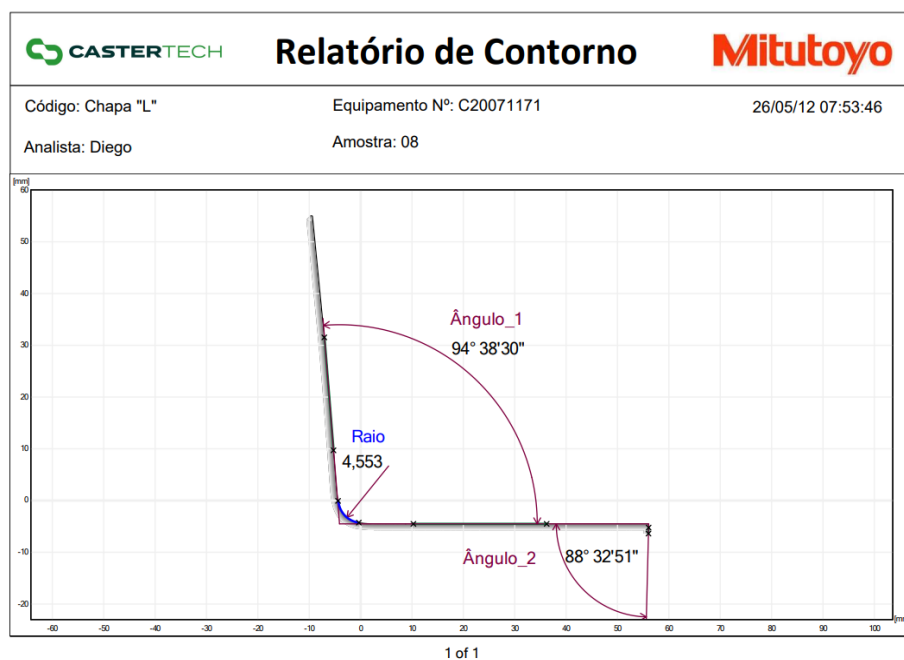
Fonte: O autor (2026)

Figura 23 - LNE250 3,00mm (Amostra 7 - Sentido 90°)



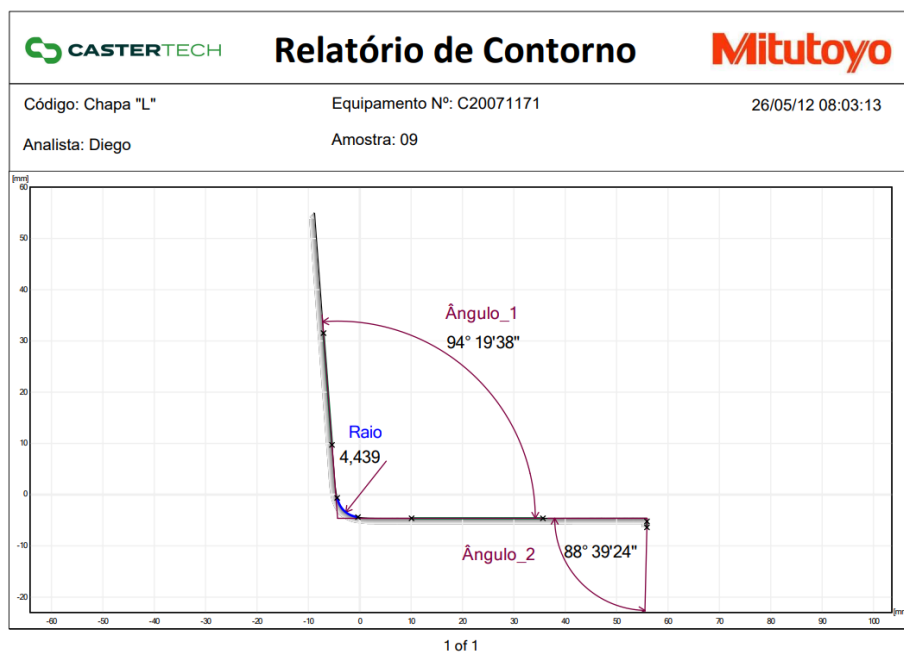
Fonte: O autor (2026)

Figura 24 - LNE250 3,00mm (Amostra 8 - Sentido 90°)



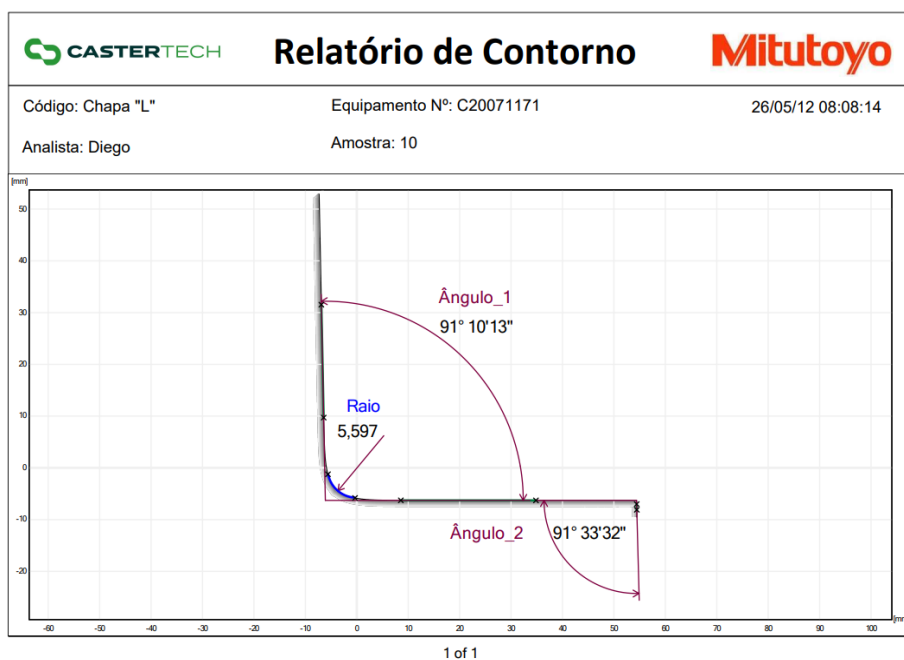
Fonte: O autor (2026)

Figura 25 - LNE250 3,00mm (Amostra 9 - Sentido 90°)



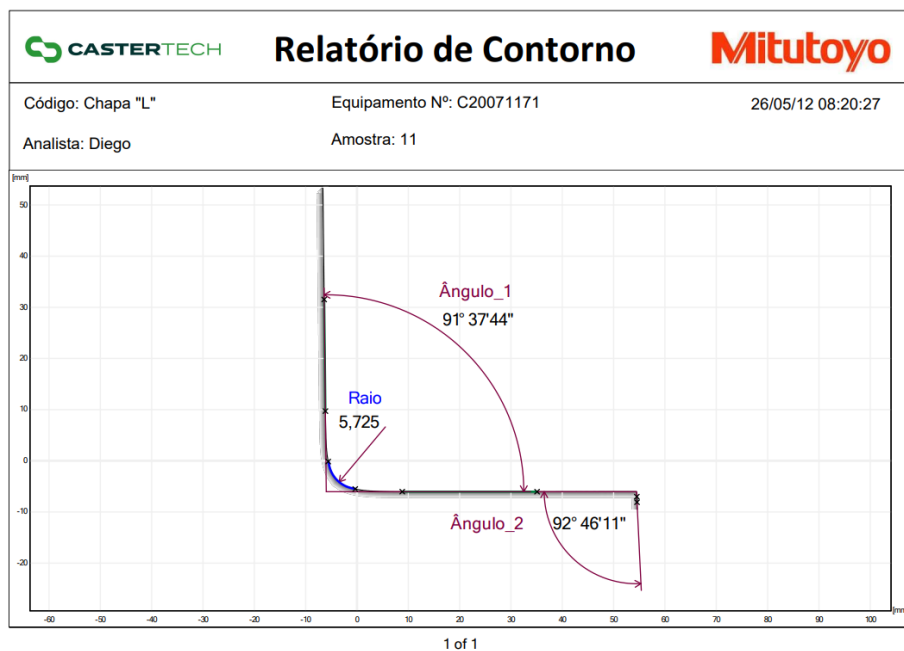
Fonte: O autor (2026)

Figura 26 - LNE250 4,75mm (Amostra 10 - Sentido 0°)



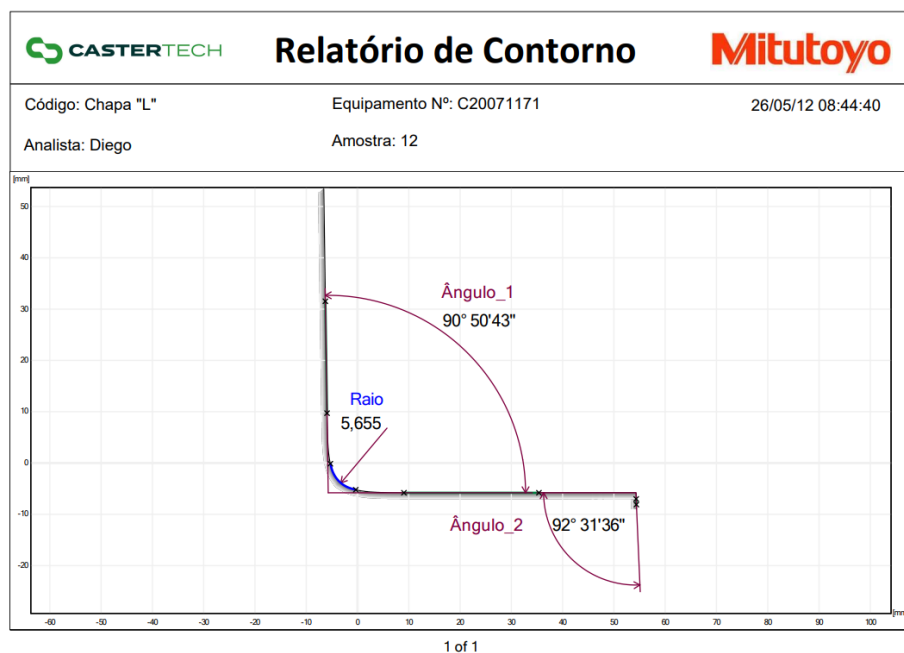
Fonte: O autor (2026)

Figura 27 - LNE250 4,75mm (Amostra 11 - Sentido 0°)



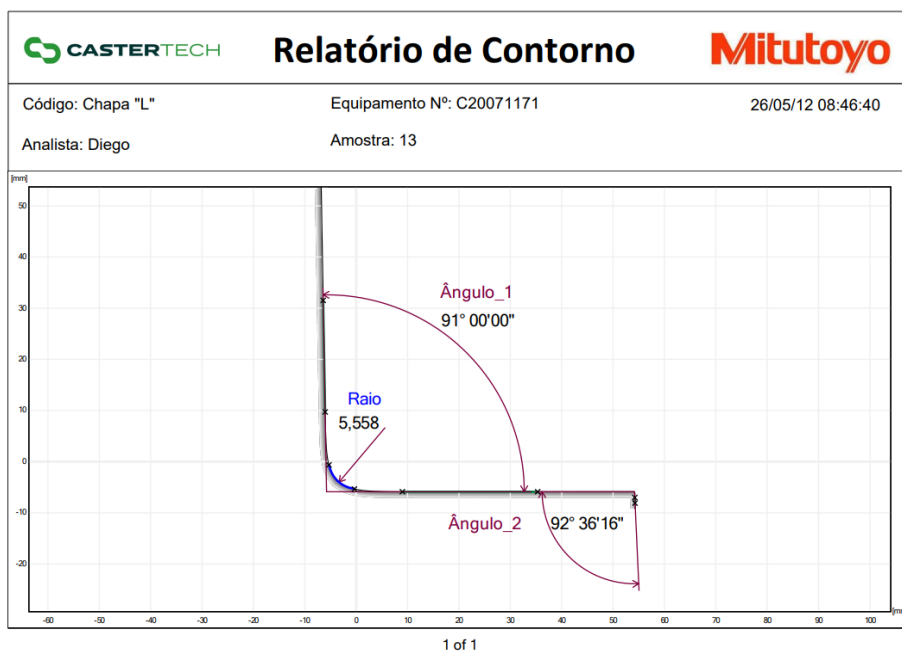
Fonte: O autor (2026)

Figura 28 - LNE250 4,75mm (Amostra 12 - Sentido 0°)



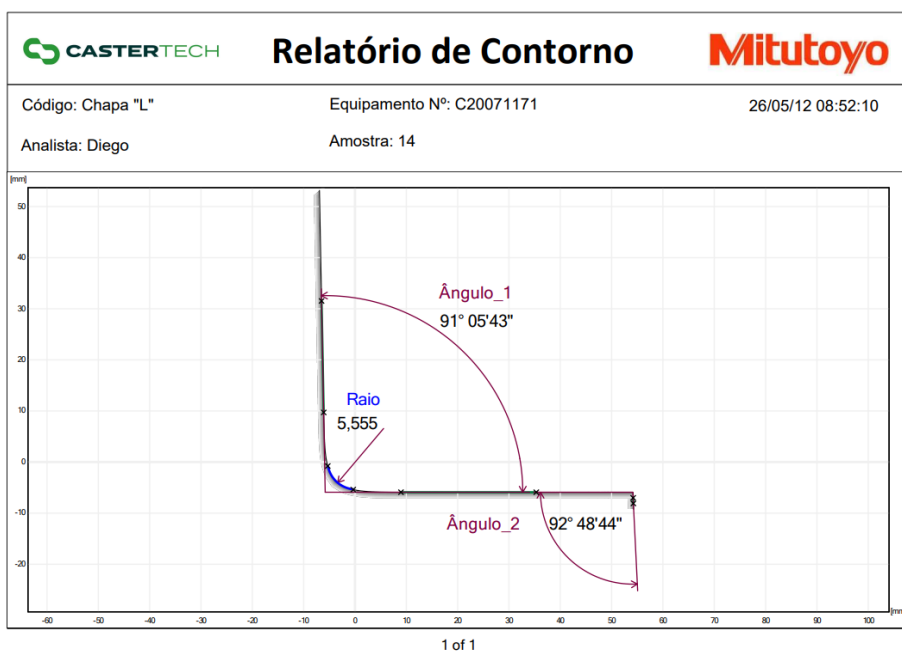
Fonte: O autor (2026)

Figura 29 - LNE250 4,75mm (Amostra 13 - Sentido 45°)



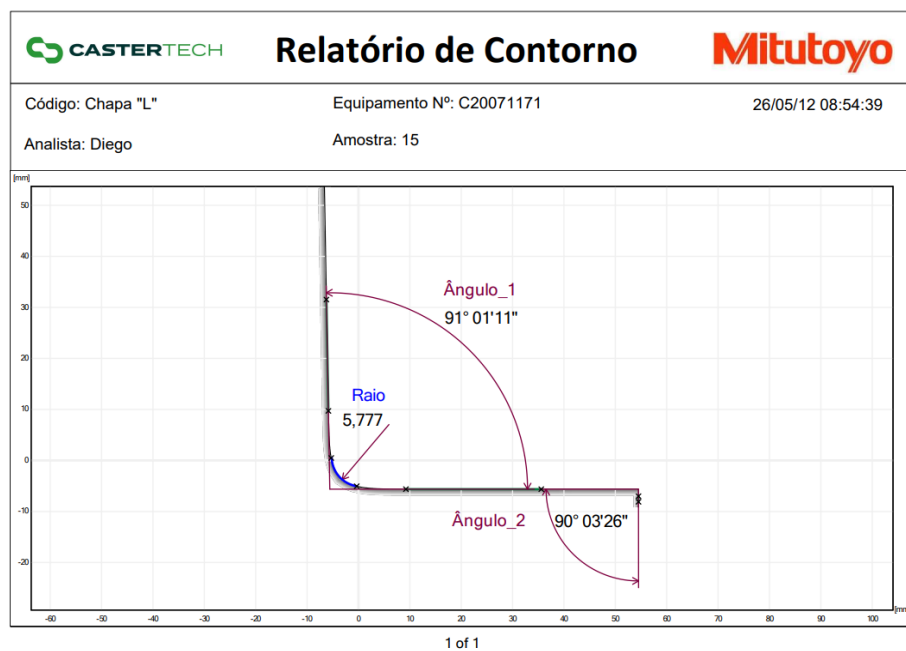
Fonte: O autor (2026)

Figura 30 - LNE250 4,75mm (Amostra 14 - Sentido 45°)



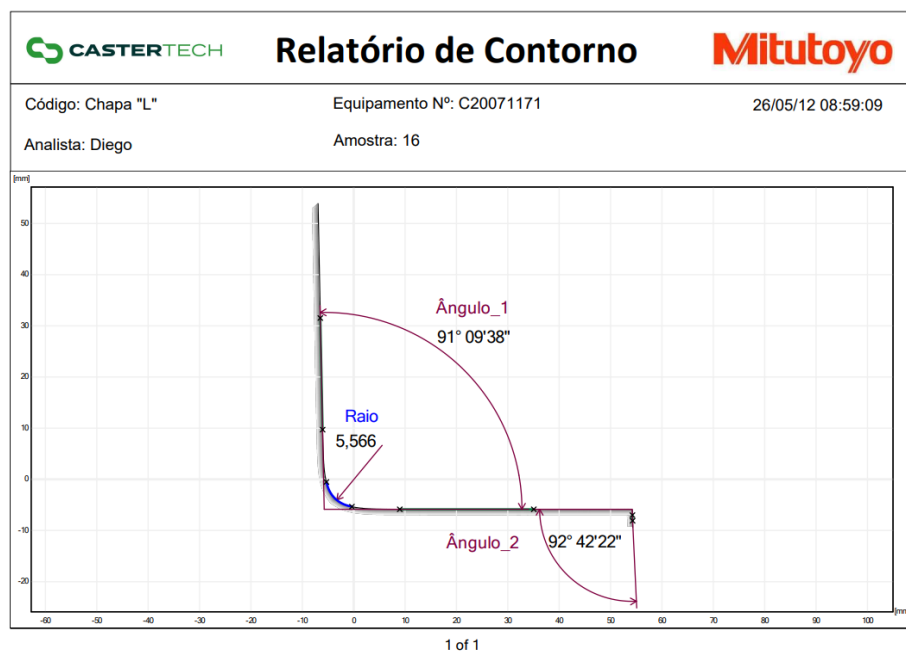
Fonte: O autor (2026)

Figura 31 - LNE250 4,75mm (Amostra 15 - Sentido 45°)



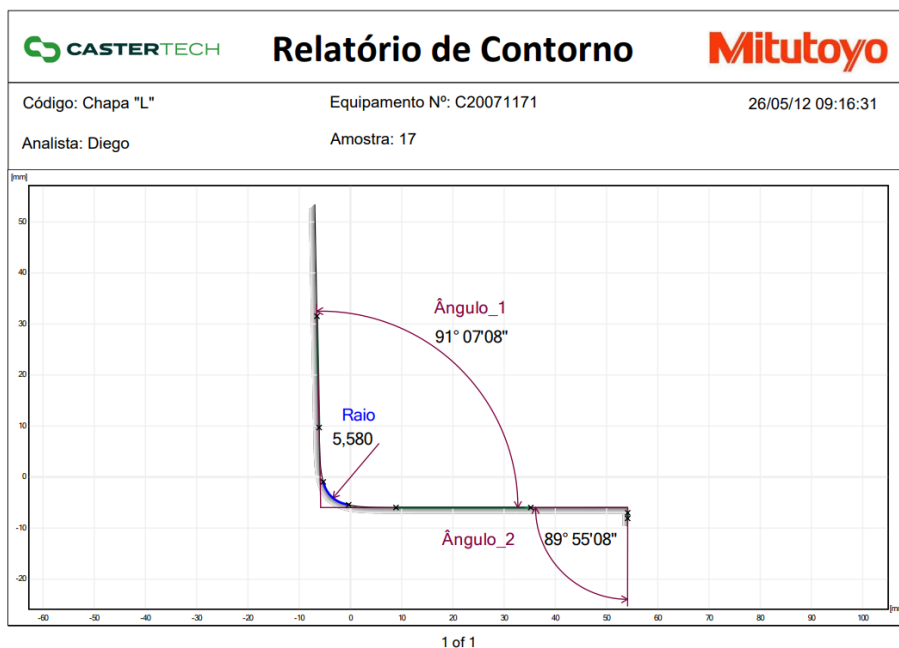
Fonte: O autor (2026)

Figura 32 - LNE250 4,75mm (Amostra 16 - Sentido 90°)



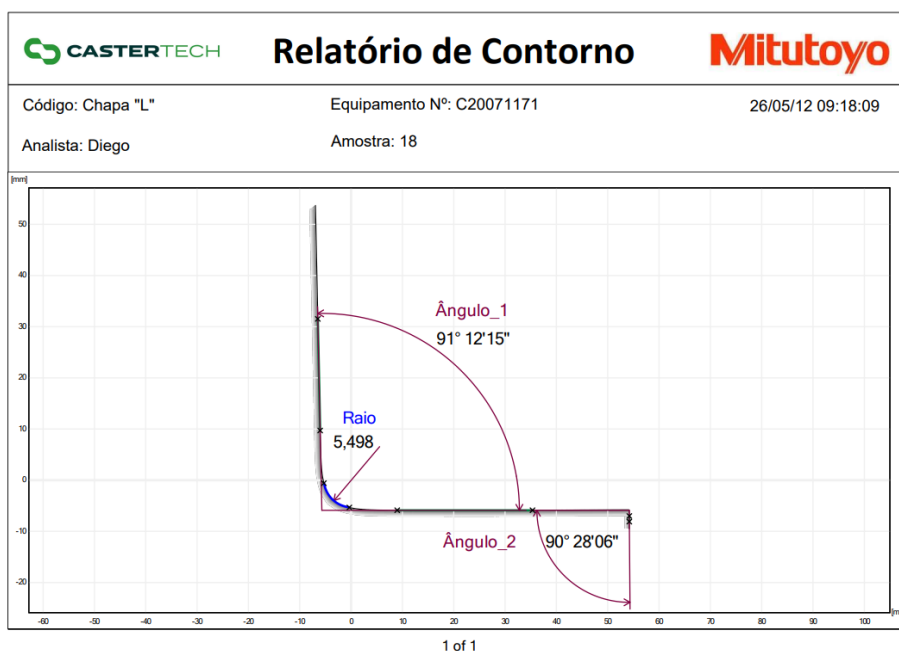
Fonte: O autor (2026)

Figura 33 - LNE250 4,75mm (Amostra 17 - Sentido 90°)



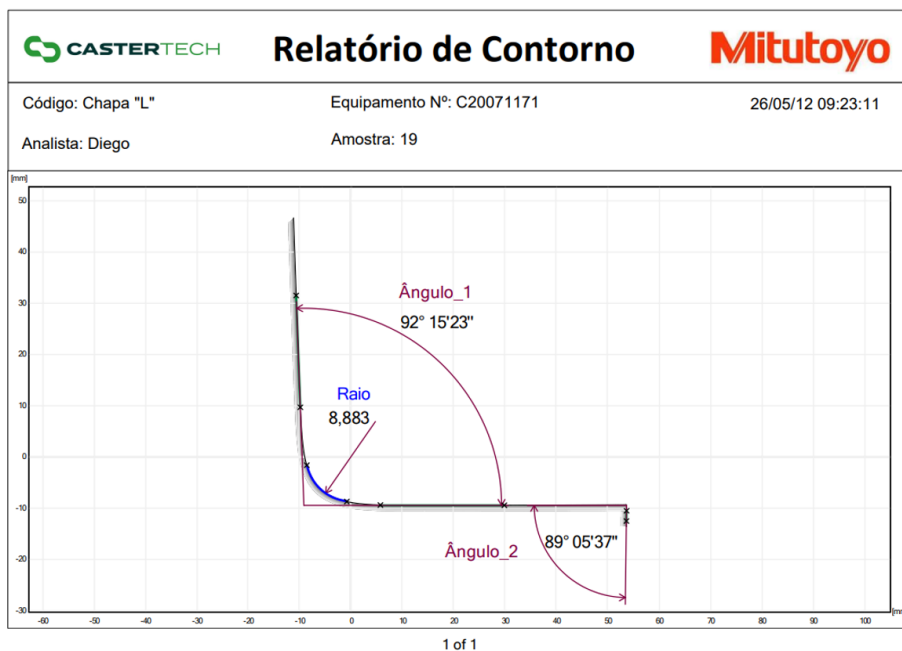
Fonte: O autor (2026)

Figura 34 - LNE250 4,75mm (Amostra 18 - Sentido 90°)



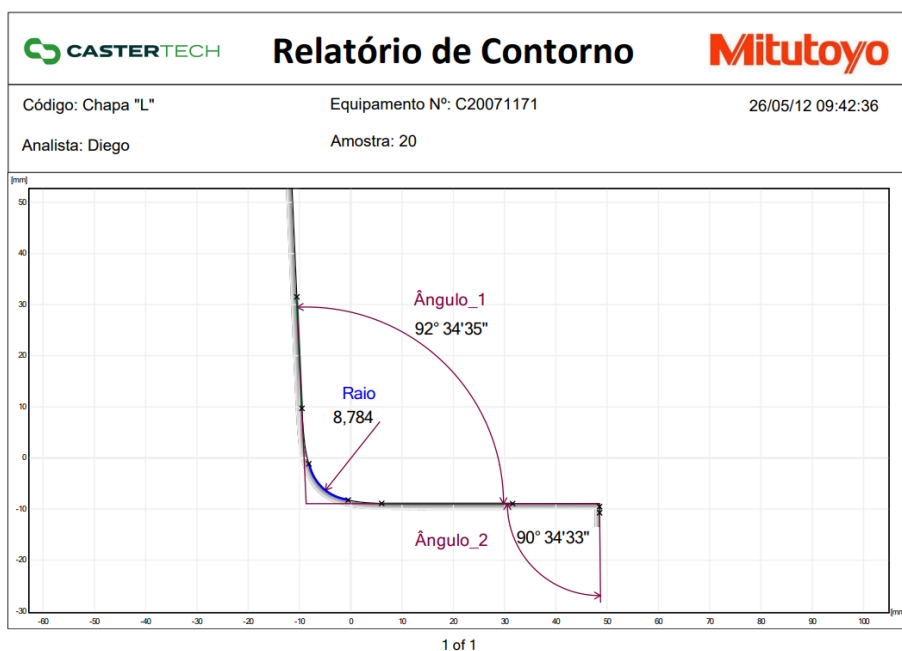
Fonte: O autor (2026)

Figura 35 - LNE250 6,35mm (Amostra 19 - Sentido 0°)



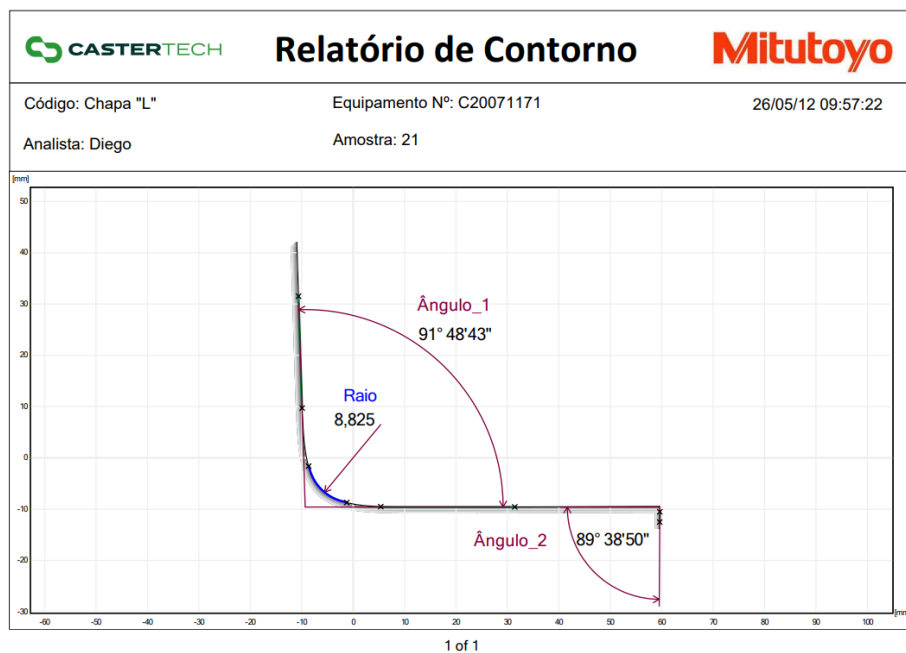
Fonte: O autor (2026)

Figura 36 - LNE250 6,35mm (Amostra 20 - Sentido 0°)



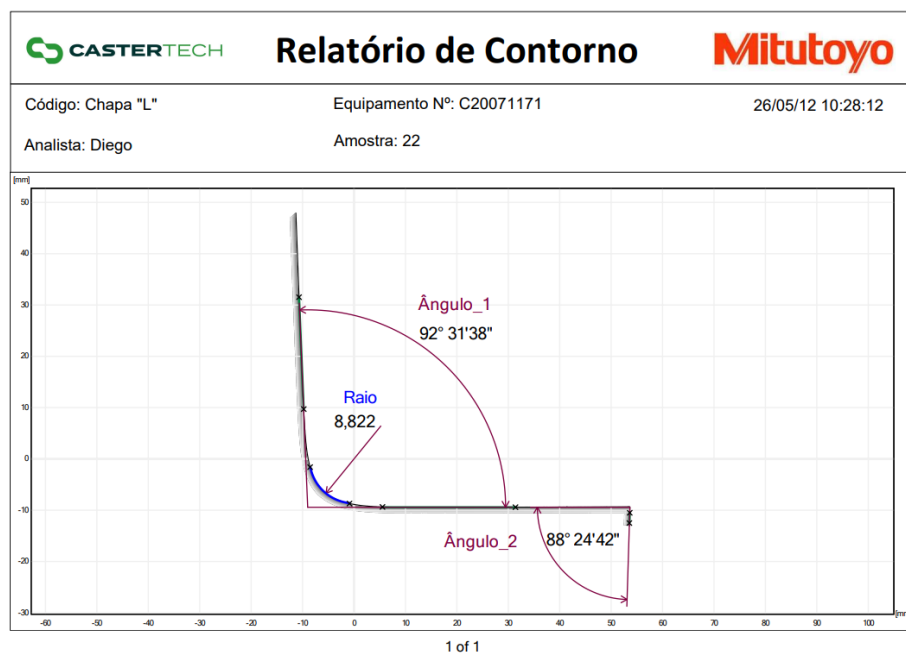
Fonte: O autor (2026)

Figura 37 - LNE250 6,35mm (Amostra 21 - Sentido 0°)



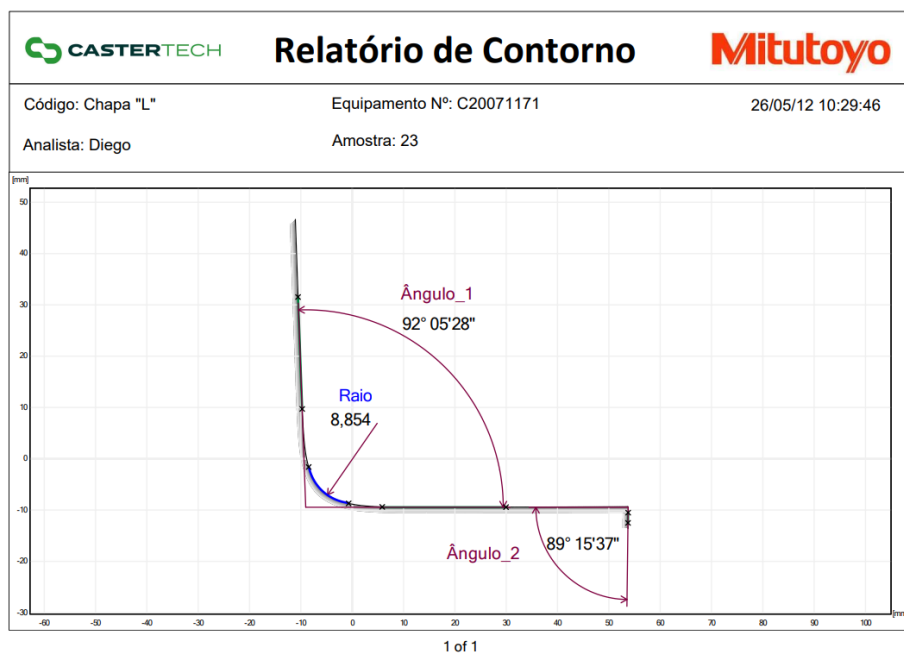
Fonte: O autor (2026)

Figura 38 - LNE250 6,35mm (Amostra 22 - Sentido 45°)



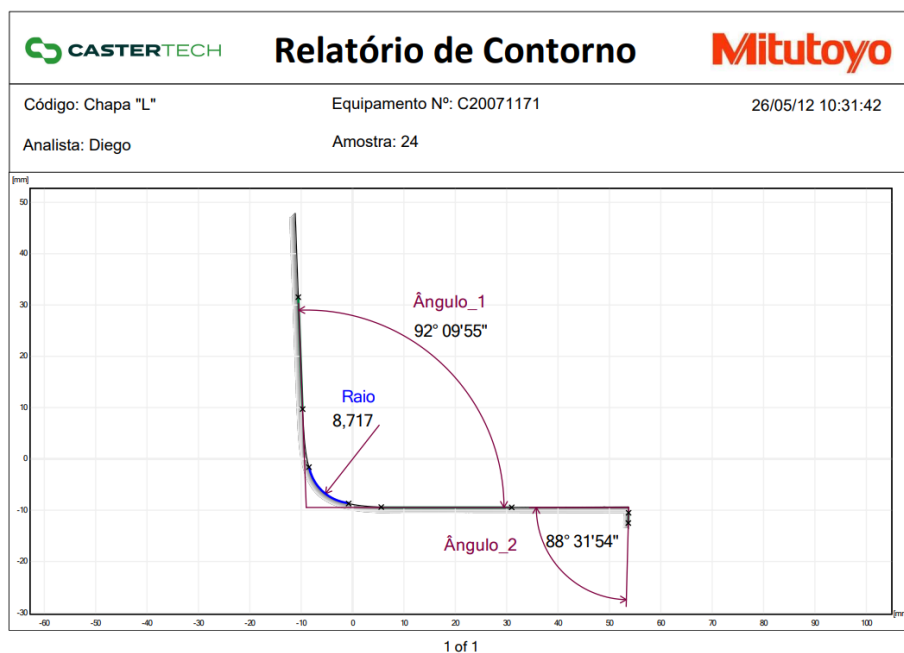
Fonte: O autor (2026)

Figura 39 - LNE250 6,35mm (Amostra 23 - Sentido 45°)



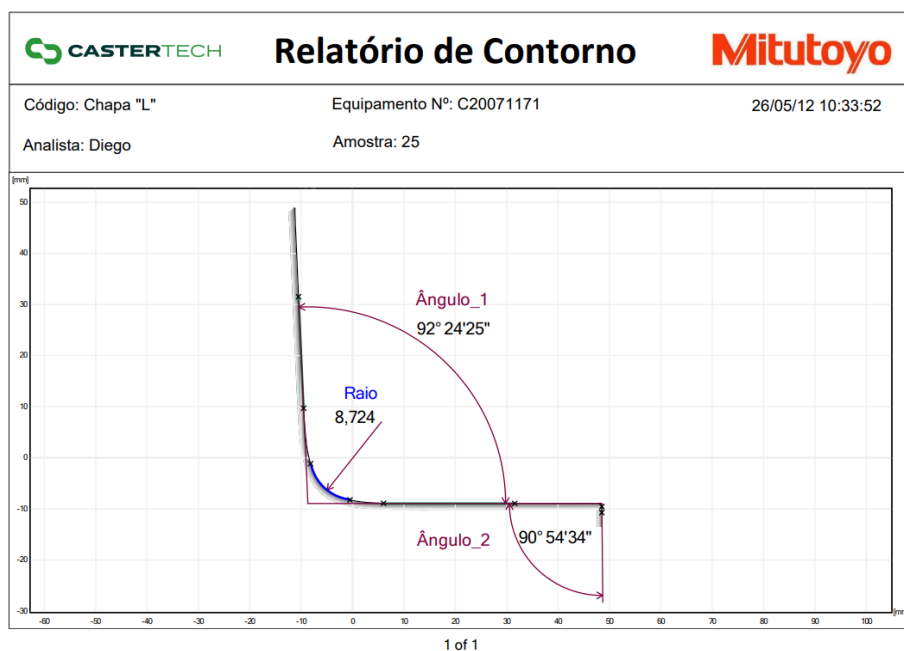
Fonte: O autor (2026)

Figura 40 - LNE250 6,35mm (Amostra 24 - Sentido 45°)



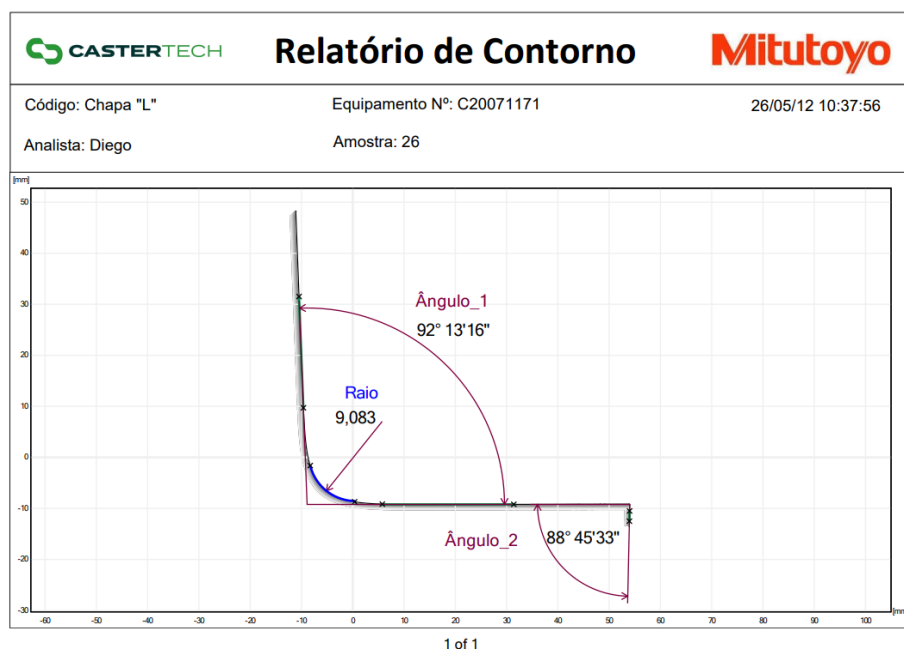
Fonte: O autor (2026)

Figura 41 - LNE250 6,35mm (Amostra 25 - Sentido 90°)



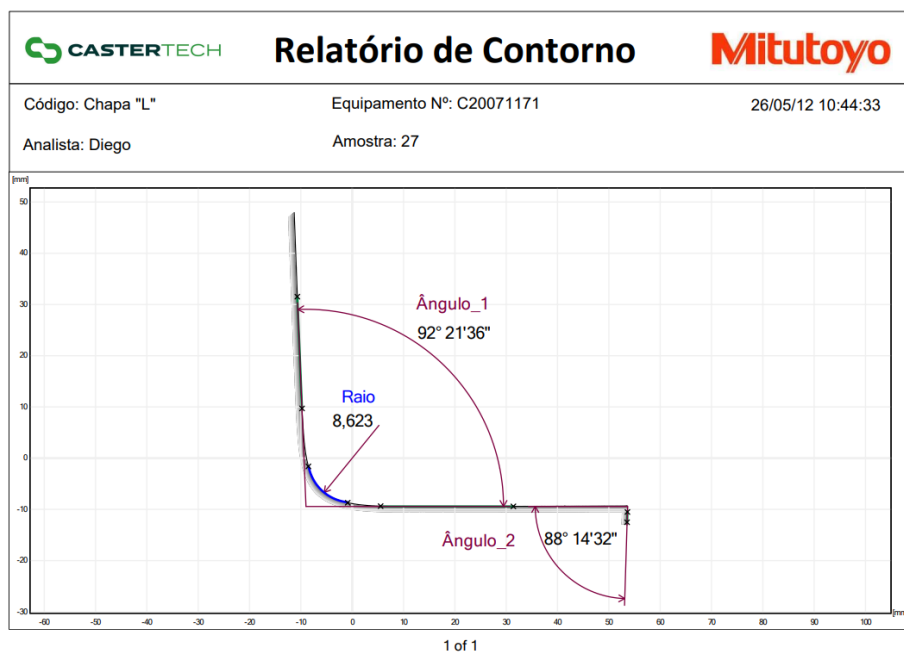
Fonte: O autor (2026)

Figura 42 - LNE250 6,35mm (Amostra 26 - Sentido 90°)



Fonte: O autor (2026)

Figura 43 - LNE250 6,35mm (Amostra 27 - Sentido 90°)



Fonte: O autor (2026)

APÊNDICE B – CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DE RETORNO ELÁSTICO ANALÍTICO DO AÇO LNE250 - ESPESSURA 3,00MM

Método de Dieter (1981), conforme Equação 9:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{R_i \cdot \sigma E}{E \cdot h} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{R_i \cdot \sigma E}{E \cdot h} \right) + 1$$

$$\frac{3}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{3 \cdot \sigma E}{E \cdot h} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{3 \cdot \sigma E}{E \cdot h} \right) + 1$$

A partir desta fórmula, foram utilizados os valores obtidos no ensaio de tração correspondentes a cada orientação, sendo:

Quadro 15 - Retorno Elástico por Dieter (1981) - 3,00mm

Propriedade	Orientação		
	0	45	90
Tensão de Escoamento (σE)	342	342	349
Módulo de Elasticidade (E)	203623	202362	202718
Espessura (h)	2,83	2,83	2,82

Fonte: O autor (2026)

Resultado para 0°: $R_f = 3,016\text{mm}$

Resultado para 45°: $R_f = 3,016\text{mm}$

Resultado para 90°: $R_f = 3,017\text{mm}$

Após, foram utilizados os valores encontrados na Equação 8, seguindo o cálculo da orientação 0°:

$$K_D = \frac{\alpha_i}{\alpha_f} = \frac{R_i + h/2}{R_f + h/2}$$

$$K_D = \frac{\alpha_i}{90} = \frac{3 + 2,83/2}{3,016 + 2,83/2}$$

$$\alpha_i = 89,673$$

$$\alpha_{if} = 180 - \alpha_i = 90,327^\circ$$

Aplicando estas funções as diferentes espessuras, foram obtidos os seguintes resultados:

Quadro 16 - Retorno Elástico por Dieter (1981) - 3,00mm

Propriedade	Orientação		
	0°	45°	90°
Rf Resultante (mm)	3,016	3,016	3,017
Al Resultante (°)	89,673	89,671	89,663
Aproximação por Dieter (1981) [°]	90,327	90,329	90,337

Fonte: O autor (2026)

Observa-se que os valores calculados de Rf são praticamente idênticos para as três orientações, resultando em um valor de ângulo final analítico aproximado nas 3 orientações pelo método de Dieter (1981).

Método de retorno elástico por Hosford e Caddell (2007) conforme as equações 14 e 15:

Foi utilizada a equação 15, aplicando parâmetros da orientação 0°:

$$E' = \frac{E}{(1-\nu^2)}$$

$$E' = \frac{203623}{(1-0,3^2)}$$

$$E' = 223762 \text{ MPa}$$

O valor E' obtido foi aplicado para resolução da equação 14, juntamente com as demais propriedades obtidas anteriormente:

$$\frac{1}{Ri_o} - \frac{1}{Ri_f} = \left(\frac{6}{2+n}\right) \cdot \left(\frac{C}{E'}\right) \cdot \left(\frac{h}{2.Ri_o}\right)^n \cdot \left(\frac{1}{h}\right)$$

$$\frac{1}{3} - \frac{1}{Ri_f} = \left(\frac{6}{2+0,135}\right) \cdot \left(\frac{699}{223762}\right) \cdot \left(\frac{2,83}{2*3}\right)^{0,135} \cdot \left(\frac{1}{2,83}\right)$$

$$\frac{1}{3} - \frac{1}{Ri_f} = 0,002802847$$

$$Ri_f = 3,025 \text{ mm}$$

Realizar conversão conforme Equação 8:

$$\frac{\alpha_i}{90} = \frac{3 + 2,83/2}{3,025 + 2,83/2}$$

$$\alpha_i = 89,484^\circ$$

$$\alpha_{if} = 180 - \alpha_i = 90,516^\circ$$

Seguindo a resolução mencionada, foram obtidos os seguintes resultados para o método de Hosford e Caddell (2007) utilizando as propriedades da espessura de 3,00mm:

Quadro 17 - Retorno Elástico por Hosford e Caddell (2007) - 3,00mm

Propriedade	Orientação		
	0º	45º	90º
n	0,135		
C	699		
Módulo de Elasticidade (E)	203623	202362	202718
Espessura (h)	2,83	2,83	2,82
E' (MPa)	223762	222376	222767
Rif (mm)	3,025	3,026	3,026
Método Hosford e Caddell (2007) [º]	90,516	90,519	90,520

Fonte: O autor (2026)

Para o método de retorno elástico de Schaeffer, Nunes e Brito (2017) foram utilizadas as equações 10 e 11, utilizando os valores de orientação 0º de laminação abaixo:

$$M_b = (F_d \cdot L/2)/4$$

$$M_b = (8514 \cdot 24/2)/4$$

$$M_b = 25530 \text{ N.mm}$$

$$K_S = 1 - \frac{12M_b(R_d + 0,5h)}{E.L.h^3}$$

$$K_S = 1 - \frac{12 \cdot 25530 \cdot (2,83 + 0,5 \cdot 2,83)}{203623 \cdot 40 \cdot 2,83^3}$$

$$K_S = 0,9926$$

Após a realização da conversão, foi obtido:

$$0,9926 = \frac{90}{\alpha_{iF}}$$

$$\alpha_{iF} = 90,66^\circ$$

Seguindo o processo anterior para as demais orientações de laminação foram obtidos os seguintes resultados:

Quadro 18 - Retorno Elástico por Schaeffer, Nunes e Brito (2017) - 3,00mm

Propriedade	Orientação		
	0º	45º	90º
Força de Dobra kN	8,51		
V (mm)	24		
Módulo de Elasticidade (E)	203623	202362	202718
Espessura (h)	2,83	2,83	2,82
Momento de dobramento [N.mm]	25530		
Método Schaeffer, Nunes e Brito (2017)	90,66	90,67	90,67

Fonte: O autor (2026)

APÊNDICE C – CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DE RETORNO ELÁSTICO ANALÍTICO DO AÇO LNE250 - ESPESSURA 4,75MM

Os resultados apresentados a seguir seguem o mesmo formato de resolução apresentada no Apêndice B, apenas diferenciando os dados das propriedades específicas da espessura.

Método de Dieter (1981):

Quadro 19 - Retorno Elástico por Dieter (1981) - 4,75mm

Propriedade	Orientação		
	0º	45º	90º
Tensão de Escoamento (σ_E)	301	293	289
Módulo de Elasticidade (E)	202587	204495	201428
Espessura (h)	4,51	4,51	4,5
Rf Resultante (mm)	4,016	4,015	4,015
Ai Resultante (º)	89,772	89,780	89,779
Aproximação por Dieter (1981) [º]	90,228	90,220	90,221

Fonte: O autor (2026)

Método de Hosford e Caddell (2007):

Quadro 20 - Retorno Elástico por Hosford e Caddell (2007) - 4,75mm

Propriedade	Orientação		
	0º	45º	90º
n	0,139		
C	642,27		
Módulo de Elasticidade (E)	202587	204495	201428
Espessura (h)	4,51	4,51	4,5
E' (MPa)	222623	224720	221349
Rif (mm)	4,027	4,026	4,027
Método Hosford e Caddell (2007) [º]	90,382	90,379	90,386

Fonte: O autor (2026)

Método de Schaeffer, Nunes e Brito (2017):

Quadro 21 - Retorno Elástico por Schaeffer, Nunes e Brito (2017) - 4,75mm

Propriedade	Orientação		
	0º	45º	90º
Força de Dobra	15,53		
V	30		
Módulo de Elasticidade (E)	202587	204495	201428
Espessura (h)	4,51	4,51	4,5
Momento de dobramento [N.mm]	58238		
Método Schaeffer, Nunes e Brito (2017)	90,53	90,53	90,54

Fonte: O autor (2026)

APÊNDICE D – CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DE RETORNO ELÁSTICO ANALÍTICO DO AÇO LNE250 - ESPESSURA 6,35MM

Os resultados apresentados a seguir seguem o mesmo formato de resolução apresentada no Apêndice B, apenas diferenciando os dados das propriedades específicas da espessura.

Método de Dieter (1981):

Quadro 22 - Retorno Elástico por Dieter (1981) - 6,35mm

Propriedade	Orientação		
	0º	45º	90º
Tensão de Escoamento (σ_E)	324	311	298
Módulo de Elasticidade (E)	201206	190097	202496
Espessura (h)	6,21	6,25	6,25
Rf Resultante (mm)	8,050	8,051	8,045
Ai Resultante (º)	89,596	89,593	89,634
Aproximação por Dieter (1981) [º]	90,404	90,407	90,366

Fonte: O autor (2026)

Método de Hosford e Caddell (2007):

Quadro 23 - Retorno Elástico por Hosford e Caddell (2007) - 6,35mm

Propriedade	Orientação		
	0º	45º	90º
n	0,153		
C	679,6		
Módulo de Elasticidade (E)	201206	190097	202496
Espessura (h)	6,21	6,25	6,25
E' (MPa)	221105	208898	222523
Rif (mm)	8,077	8,081	8,076
Método Hosford e Caddell (2007) [º]	90,621	90,652	90,612

Fonte: O autor (2026)

Método de Schaeffer, Nunes e Brito (2017):

Quadro 24 - Retorno Elástico por Schaeffer, Nunes e Brito (2017) - 6,35mm

Propriedade	Orientação		
	0º	45º	90º
Força de Dobra	15,13		
V	60		
Módulo de Elasticidade (E)	201206	190097	202496
Espessura (h)	6,21	6,25	6,25
Momento de dobramento [N.mm]	113475		
Método Schaeffer, Nunes e Brito (2017)	90,71	90,74	90,69

Fonte: O autor (2026)

APÊNDICE E – DADOS INSERIDOS NO SOFTWARE ABAQUS PARA CARACTERIZAÇÃO DE CADA MATERIAL

Parâmetros informados dentro das especificações de material.

Quadro 25 - Parâmetros de Propriedades

Espessura	Elasticidade [MPa]	Poisson [-]	Densidade [Kg/mm³]
3	203623	0.3	7.85E-06
4,75	202587		
6,35	201206		

Fonte: O autor (2026)

Quadro 26 - Tabela *Yield Stress vs. Plastic Strain* - 3,00mm

Tensão Real (<i>kf</i>)	Deformação Verdadeira Plástica (<i>φ</i>)
342	0
343	0.001230
345	0.003170
351	0.005050
359	0.006820
368	0.008690
379	0.010810
391	0.013540
405	0.016700
419	0.020740
434	0.025470
450	0.031360
465	0.038690
478	0.047120
492	0.057790
507	0.070160
521	0.085700
534	0.103500
545	0.123520
558	0.143460
571	0.165300
582	0.188020
595	0.211800
607	0.236670
620	0.262640
633	0.289730
646	0.318000
659	0.347450
673	0.378110
687	0.410020

Fonte: O autor (2026)

Quadro 27 - Tabela *Yield Stress vs. Plastic Strain* - 4,75mm

Tensão Real (<i>kf</i>)	Deformação Verdadeira Plástica (φ)
301	0
302	0.001961
307	0.003270
311	0.004499
316	0.005819
322	0.007035
328	0.008333
332	0.009829
339	0.011487
347	0.013539
354	0.015718
362	0.018384
371	0.021502
378	0.024890
387	0.028981
395	0.033453
405	0.038902
415	0.045173
424	0.052029
433	0.060327
445	0.069817
454	0.080135
464	0.092550
474	0.105344
483	0.118932
491	0.132640
499	0.145827
507	0.159947
514	0.173551
522	0.188192

Fonte: O autor (2026)

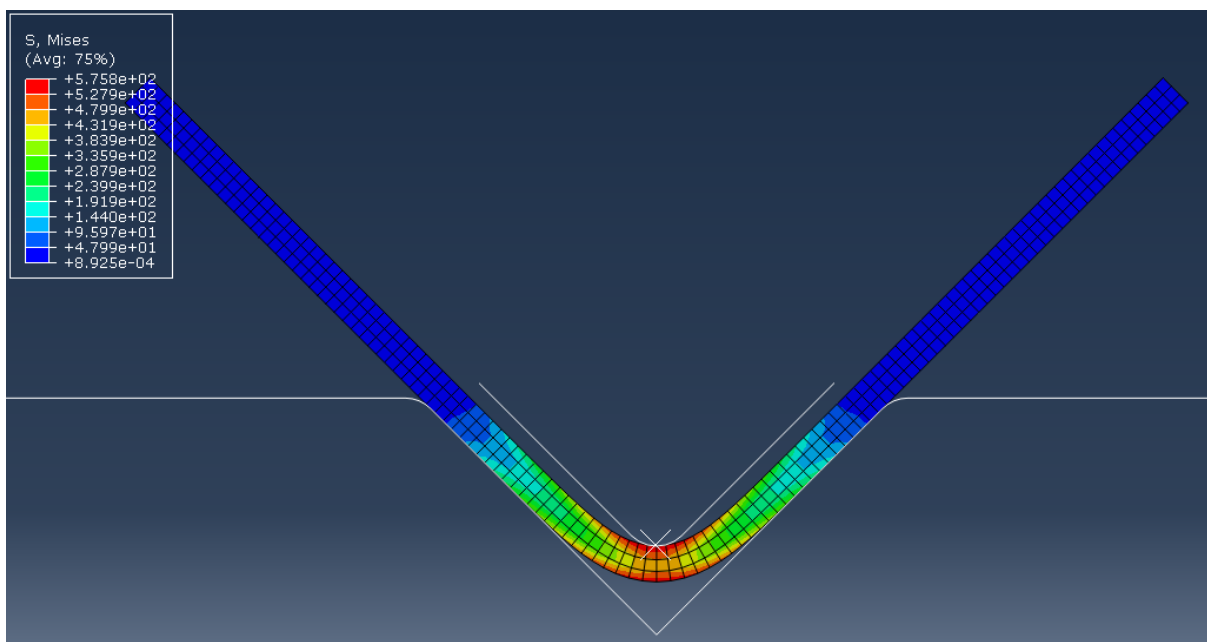
Quadro 28 - Tabela *Yield Stress vs. Plastic Strain* - 6,35mm

Tensão Real (σ)	Deformação Verdadeira Plástica (ϕ)
324	0
325	0.006125
328	0.007223
332	0.008189
337	0.009376
342	0.010558
346	0.012052
352	0.013568
357	0.015337
364	0.017213
369	0.019518
375	0.021945
383	0.024753
389	0.027754
397	0.031334
406	0.035291
413	0.039456
420	0.044449
429	0.049594
437	0.055763
446	0.062288
453	0.069928
462	0.077912
469	0.087287
478	0.096980
486	0.108092
494	0.118703
501	0.130233
508	0.141198
515	0.153238

Fonte: O autor (2026)

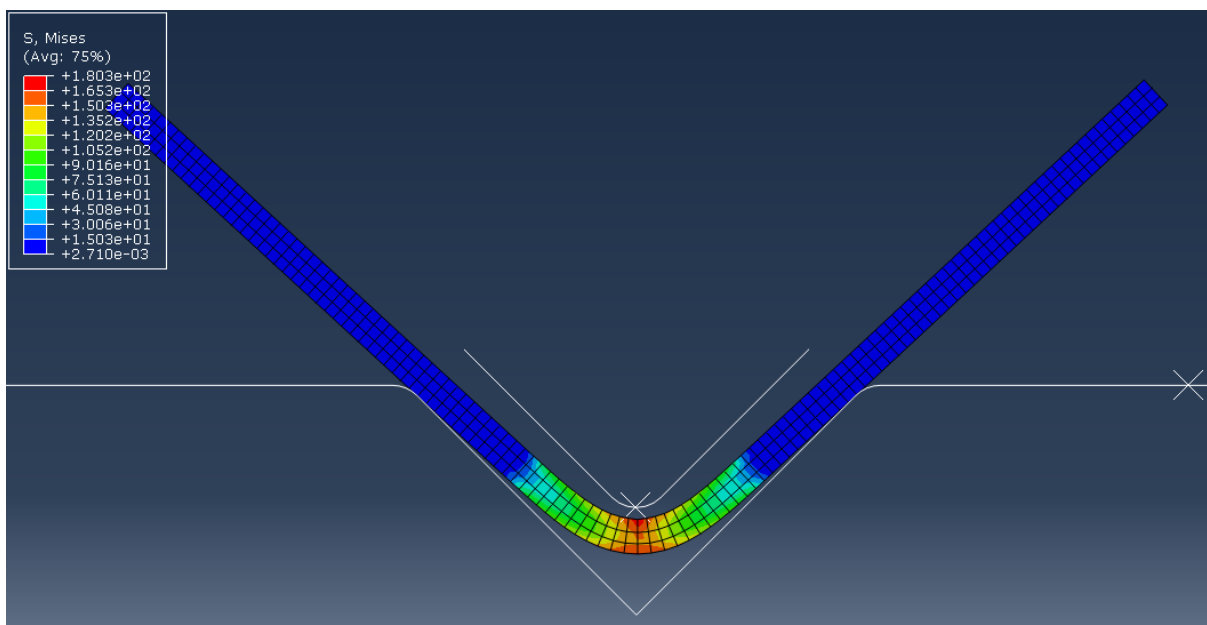
APÊNDICE F – SIMULAÇÕES DE CONFORMAÇÃO NO SOFTWARE ABAQUS

Figura 44 - Simulação 3,00mm (Dobramento)



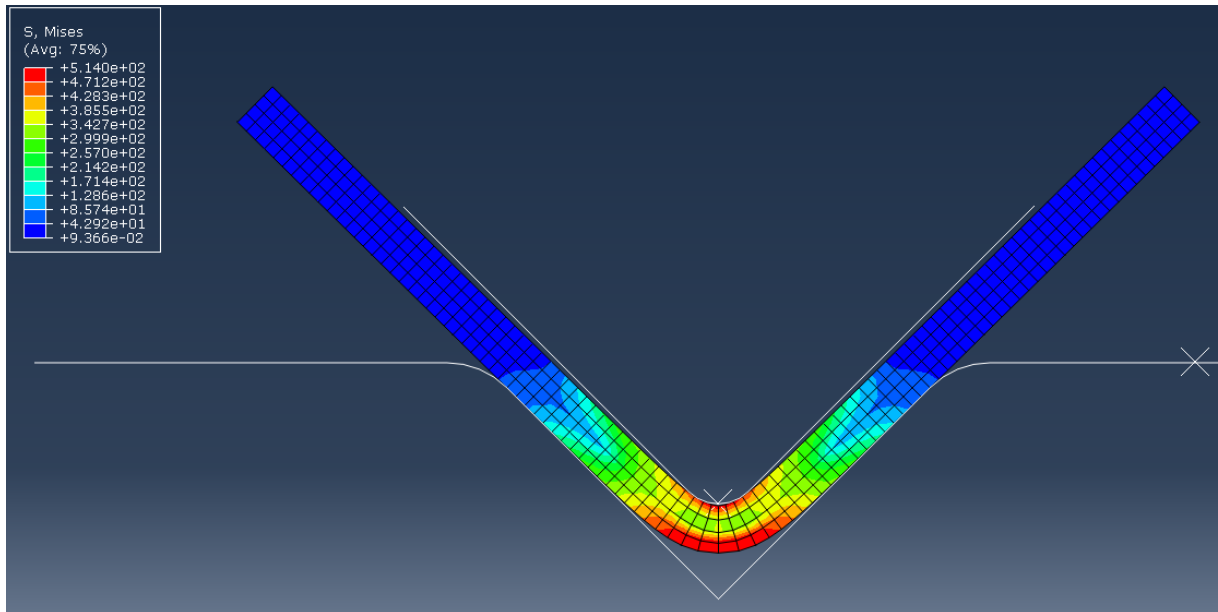
Fonte: O autor (2026)

Figura 45 - Simulação 3,00mm (Springback)



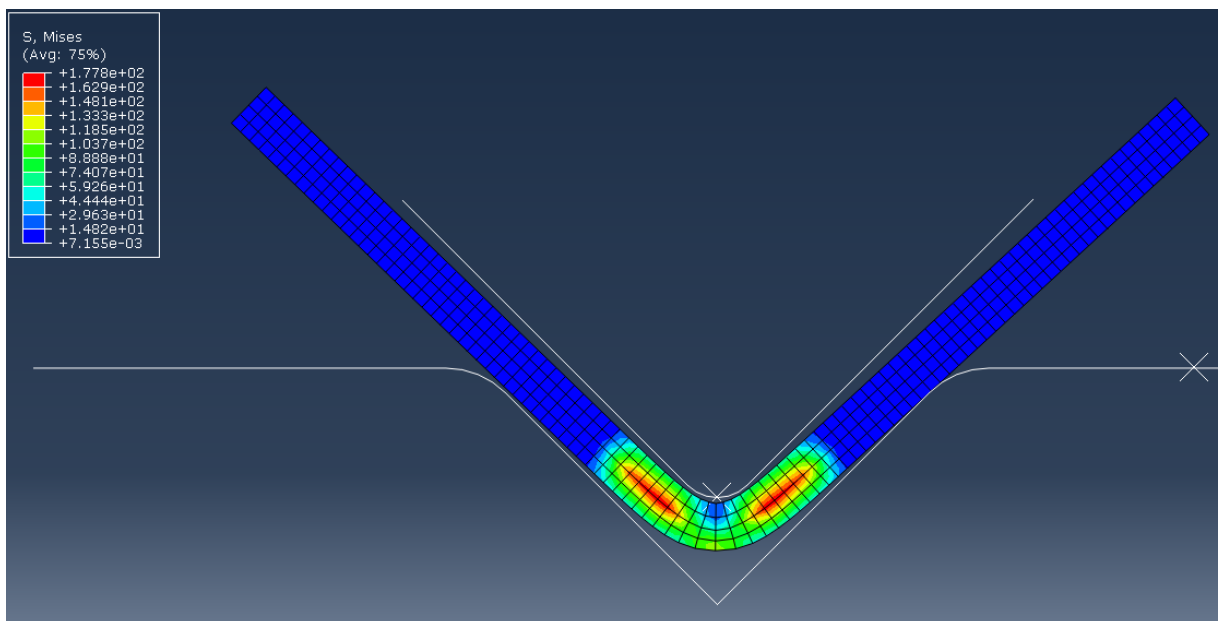
Fonte: O autor (2026)

Figura 46 - Simulação 4,75mm (Dobramento)



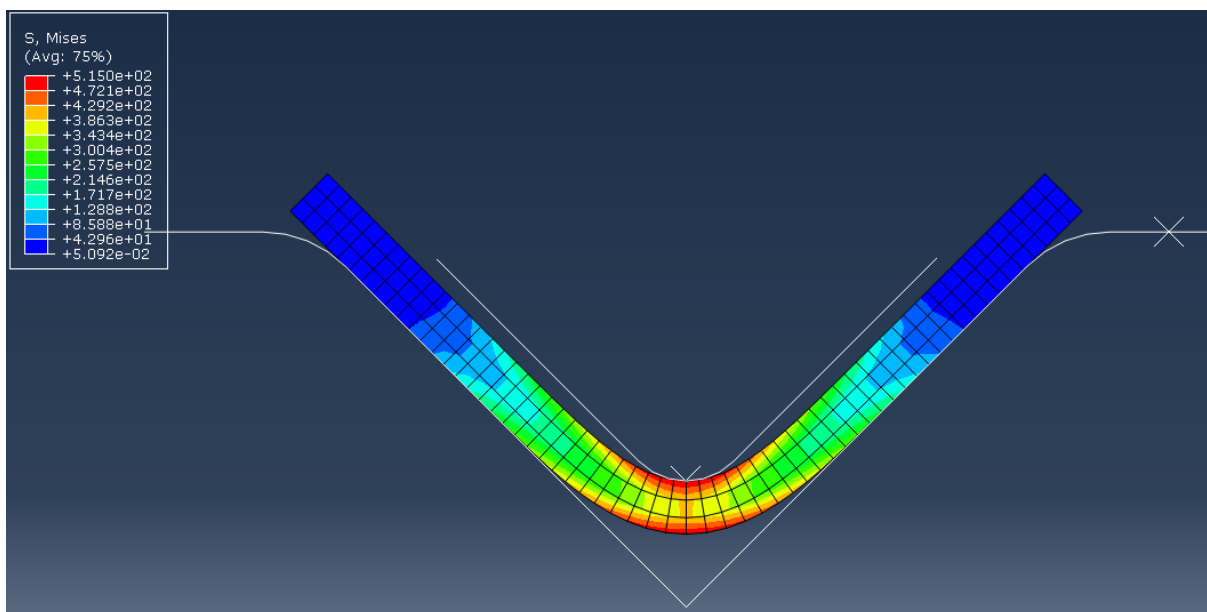
Fonte: O autor (2026)

Figura 47 - Simulação 4,75mm (Springback)



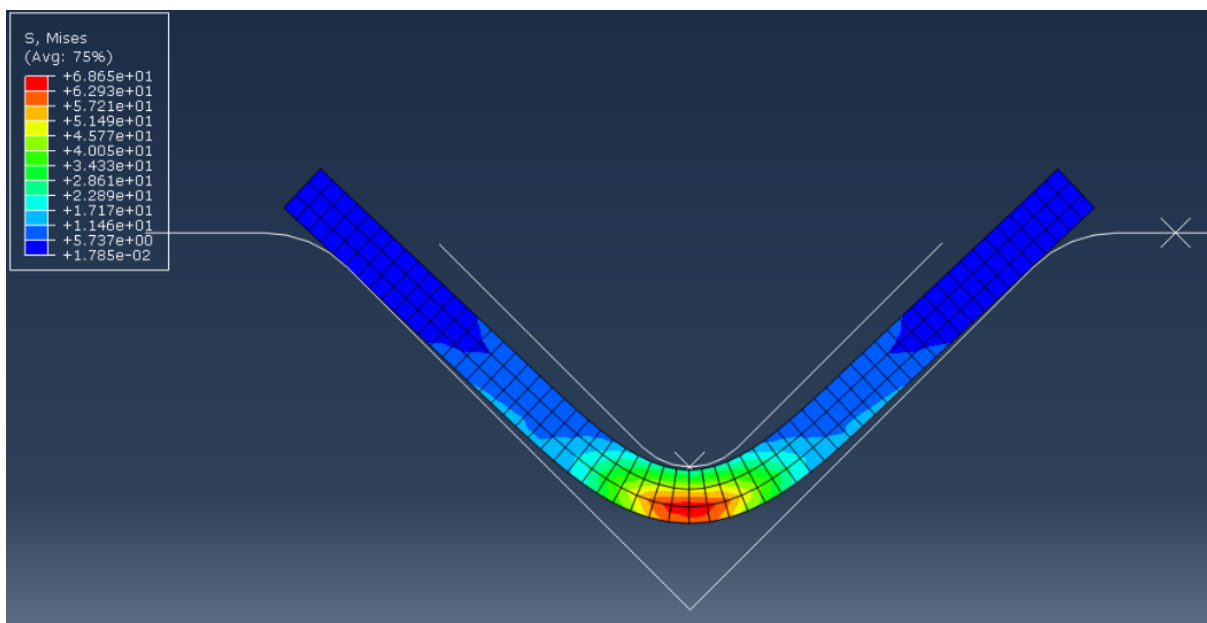
Fonte: O autor (2026)

Figura 48 - Simulação 6,35mm (Dobramento)



Fonte: O autor (2026)

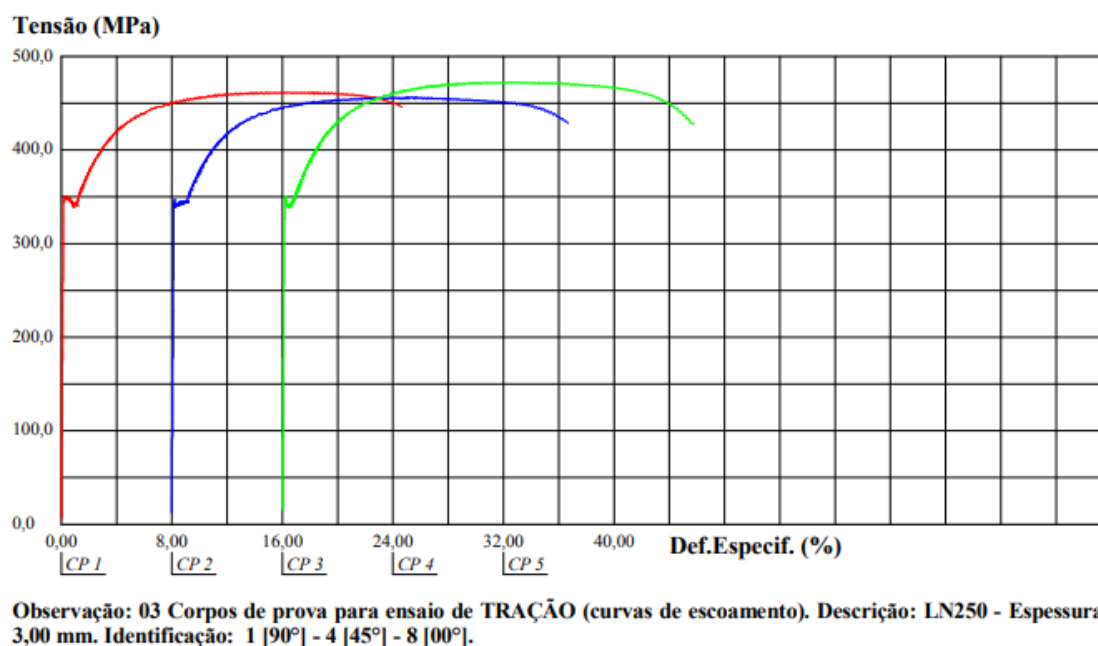
Figura 49 - Simulação 6,35mm (Springback)



Fonte: O autor (2026)

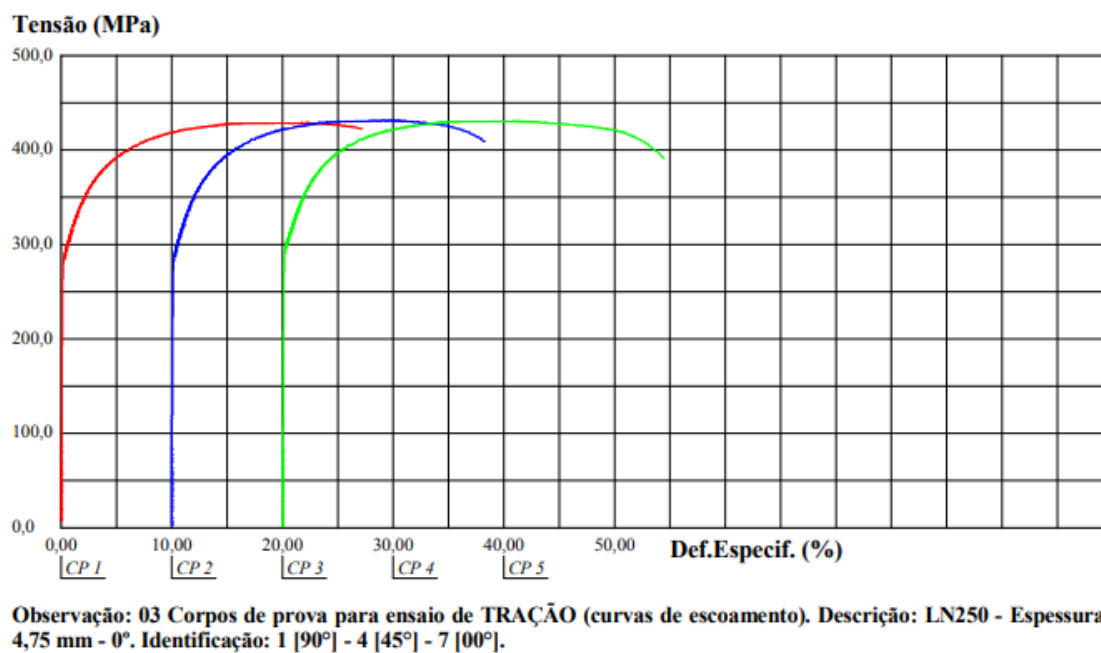
APÊNDICE G – RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Figura 50 - Gráfico de Curva de Engenharia LNE250 (3,00mm)



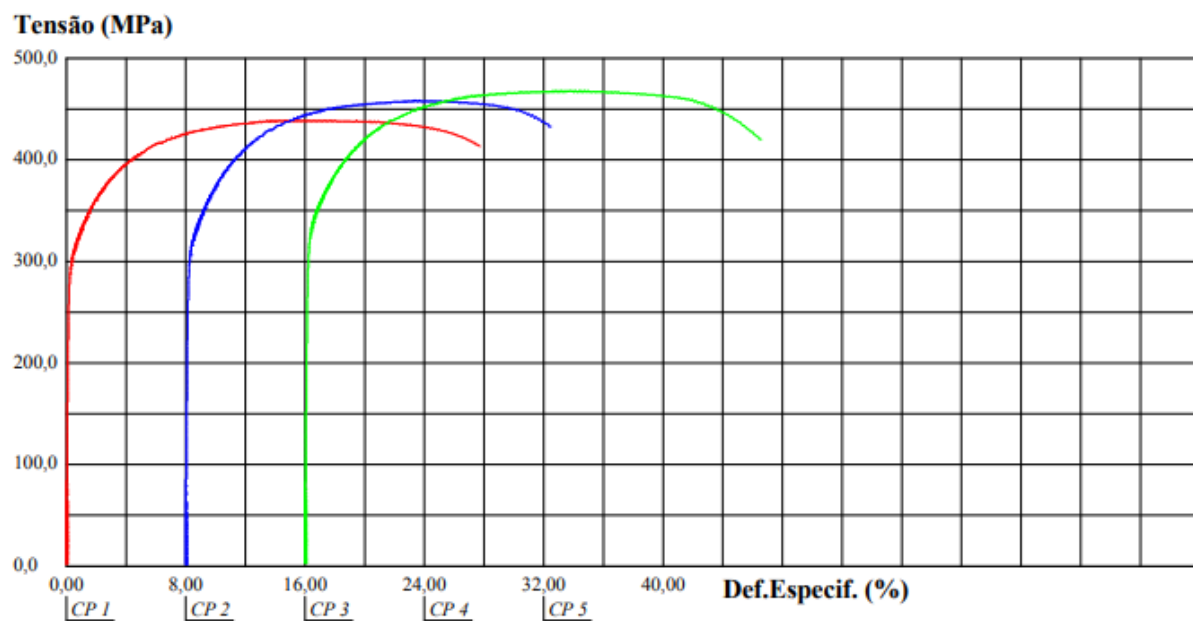
Fonte: O Autor (2026)

Figura 51 - Gráfico de Curva de Engenharia LNE250 (4,75mm)



Fonte: O Autor (2026)

Figura 52 - Gráfico de Curva de Engenharia LNE250 (6,35mm)



Observação: 03 Corpos de prova para ensaio de TRAÇÃO (curvas de escoamento). Descrição: LN250 - Espessura: 6,35 mm. Identificação: 1 [90°] - 4 [45°] - 7 [00°].

Fonte: O Autor (2026)