

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NIKOLAS WOELLNER

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA MAGNITUDE DO RETORNO ELÁSTICO E
NOS LIMITES DE CONFORMAÇÃO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA**

CURITIBA

2016

NIKOLAS WOELLNER

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA MAGNITUDE DO RETORNO ELÁSTICO E
NOS LIMITES DE CONFORMAÇÃO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito para obter o título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração Manufatura.

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes
Coorientadores: Manolo Lutero Gipiela e Sérgio Fernando Lajarin

CURITIBA
2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

W842l Woellner, Nikolas
Influência da temperatura na magnitude do retorno elástico e nos limites de conformação de aços de alta resistência / Nikolas Woellner. – Curitiba, 2016.
154 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes.
Coorientadores: Manolo Lutero Gipela, Sérgio Fernando Lajarin.

1. Retorno elástico. 2. Curvas limites de conformação. 3. Aços de alta resistência. 4. Simulação computacional. I. Universidade Federal do Paraná. II. Marcondes, Paulo Victor Prestes. III. Gipela, Manolo Lutero. IV. Lajarin, Sérgio Fernando. V. Título.

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214

CDD: 620.1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de NIKOLAS WOELLNER, intitulada: "**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA MAGNITUDE DO RETORNO ELÁSTICO E NOS LIMITES DE CONFORMAÇÃO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Nikolas Woellner.

Curitiba, 29 de Agosto de 2016.

Prof PAULO VICTOR PRESTES MARCONDES
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

Prof ADRIANO SCHEID
Avaliador Interno (UFPR)

Prof LIRIO SCHAEFER
Avaliador Externo (UFRGS)

Prof LUIZ MAURICIO VALENTE TIGRINHO
Avaliador Externo (IFPR)

RESUMO

Aços de alta resistência (HSS) surgem como uma boa alternativa aos aços comuns para reduzir o peso dos veículos, diminuindo o consumo de combustível. No entanto, sua aplicação na indústria ainda está limitada. Apesar do excelente comportamento mecânico frente a seu menor peso, tais materiais sofrem limitações de fabricação, principalmente no que diz respeito à conformabilidade. A literatura aponta o retorno elástico como o problema que mais compromete a produção em massa de componentes estruturais com o uso de aços HSS. Dentre os parâmetros que podem ser estudados para minimizar o problema, a temperatura aparece como sendo, segundo a literatura, um dos que mais influencia positivamente, a partir de uma relação entre o aumento das temperaturas utilizadas nas operações e a diminuição do efeito de retorno elástico. Em contrapartida, a consequência do aumento da temperatura nos limites de conformação dos materiais não está completamente entendida. Enquanto para determinados materiais e determinadas faixas de temperatura ocorre aumento dos limites de conformação, em outros casos são encontrados prejuízos no que diz respeito à conformabilidade. O presente estudo se propõe, então, a entender as consequências do uso da técnica de aumento de temperatura em operações de conformação de aços de alta resistência. O intuito é possibilitar a visualização de forma mais direta da relação de perda e ganho entre os dois fatores analisados (retorno elástico e limites de conformação). Foram constituídos modelos matemáticos (método dos elementos finitos) que descrevam os comportamentos. Dois aços diferentes foram estudados (um HSLA e um DP). Para avaliar a conformabilidade, foram utilizados os métodos de Nakazima (prático) e o Critério de Gradiente de Espessura (computacional). Para avaliar o retorno elástico, foram conduzidos ensaios práticos de dobramento simples. Além disso, foi construído um modelo computacional que descreve tal operação. Os resultados práticos e computacionais foram comparados como forma de validar o modelo matemático. Quatro diferentes faixas de temperatura foram analisadas. De maneira geral, foi verificado que a temperatura de 400°C possui impacto negativo nos limites de conformação de ambos os aços. Temperaturas acima de 400°C mostraram comportamento adverso durante os experimentos computacionais. O retorno elástico foi impactado positivamente com o aumento da temperatura.

Palavras-chave: Retorno elástico. Curvas limites de conformação. Aços de alta resistência. Conformação de chapa em altas temperaturas. Simulação computacional.

ABSTRACT

High strength steels (HSS) appear as a good alternative to common steels to reduce the weight of vehicles, thus reducing fuel consumption. However, its application in industry is still limited. Despite the excellent mechanical behavior towards its lower weight, manufacturing such materials suffers from limitations, especially with regard to formability. The literature shows the springback as the problem that most undermines the mass production of structural components with the use of HSS steel. Among the parameters that can be studied to minimize this problem, the temperature appears to be, according to the literature, one that most influences positively from a relationship between the increased temperatures used in the operations and decrease the elastic return effect. However, the consequence of the temperature increase in the forming limits of materials is not completely understood. While for certain materials and certain ranges of temperature increase occurs of the forming limits in other cases damages are found with respect to conformability. This study proposes to understand the consequences of the use of temperature rise technique for high strength steel forming operations. The aim is to enable the visualization of more direct form of loss and gain relationship between the two factors analyzed (springback and forming limits). Mathematical models were made (finite element method) that describe the behavior. Two different steels were studied (HSLA and DP). To evaluate the formability, Nakazima method were used (practical) and the thickness gradient criterion (computational). To evaluate the springback, practical tests of simple bending were conducted. Moreover, it built a computer model that describes this operation. The practical and computational results were compared in order to validate the mathematical model. Four different temperature ranges were analyzed. In general, it was found that 400°C has a negative impact on the forming limits of both steels. Temperatures above 400°C showed adverse behavior during the computational experiments. The springback was positively impacted by increasing the temperature.

Keywords: Springback. Forming limits curves. High strength steel. Forming sheets in high temperatures. Computer simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA DA MICROESTRUTURA DE AÇOS DP. ILHAS DE MARTENSITA DISPERSAS EM UMA MATRIZ FERRÍTICA.....	31
FIGURA 2 – CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA UM AÇO HSLA E UM DP DE MESMA TENSÃO DE ESCOAMENTO	32
FIGURA 3 - ESTIRAMENTO GERADO PELA AÇÃO DE UM PUNÇÃO DE TOPO ESFÉRICO	34
FIGURA 4 - PLANIFICADO CIRCULAR CONFORMADO EM COPO CILÍNDRICO POR MEIO DE EMBUTIMENTO PROFUNDO	35
FIGURA 5 - TÍPICO DOBRAMENTO EM “L” DE UMA TIRA, ONDE O θ° É O ÂNGULO DE DOBRA FINAL APÓS O RETORNO ELÁSTICO E “T” É A ESPESSURA DA CHAPA .	35
FIGURA 6 – DIAGRAMA LIMITE DE CONFORMAÇÃO – MODOS DE DEFORMAÇÃO PARA UMA MALHA CIRCULAR.....	37
FIGURA 7 – ASPECTO TÍPICO DE UMA CLC, COM AS REGIÕES “SEGURO” E “FALHA”.....	38
FIGURA 8 – DEFORMAÇÕES NA CIRCUNFERÊNCIA DA MALHA GRAVADA.....	39
FIGURA 9 – FERRAMENTAL DO ENSAIO DE NAKAZIMA, SENDO “1” A CAMADA DE LUBRIFICAÇÃO	40
FIGURA 10 – TIPOS DE MALHAS PARA O ENSAIO DE NAKAZIMA.....	41
FIGURA 11 – EXEMPLOS DO EFEITO DE ORELHAMENTO EM COPOS EMBUTIDOS DE LIGAS DE ALUMÍNIO	44
FIGURA 12 – CLC PARA DIFERENTES TEMPERATURAS	45
FIGURA 13 – CLC PARA DIFERENTES TEMPERATURAS: (a) TEMPERATURA AMBIENTE, (b) 150°C, (c) 300°C, (d) 450°C	47
FIGURA 14 - CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO NA OPERAÇÃO DE CONFORMAÇÃO ...	49
FIGURA 15 - DIFERENTES TIPOS DE RETORNO ELÁSTICO OBSERVADOS EM PERFIS DE CANAL	50
FIGURA 16 - ORIGEM E MECANISMO DO CURVAMENTO DE PAREDE	51
FIGURA 17 - TORÇÕES CRIADAS POR TENSÕES RESIDUAIS NO FLANGE OU NA PAREDE LATERAL	52

FIGURA 18 – RELAÇÃO ENTRE QUANTIDADE DE RETORNO ELÁSTICO E TEMPERATURA NA ZONA DE DOBRAMENTO	54
FIGURA 19 – CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO OBTIDA A 773K	54
FIGURA 20 – QUANTIDADE DE RETORNO ELÁSTICO RELACIONADA COM A TEMPERATURA DE CONFORMAÇÃO E RAIO DO PUNÇÃO	55
FIGURA 21 – CHAPAS ENSAIADAS EM DIFERENTES TEMPERATURAS PARA AVALIAÇÃO DE RETORNO ELÁSTICO	55
FIGURA 22 - FAMÍLIAS DE ELEMENTOS COMUMENTE USADOS EM SIMULAÇÃO	59
FIGURA 23 – FLUXOGRAMA DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	61
FIGURA 24 – FORNO PARA AQUECIMENTO DAS AMOSTRAS.....	64
FIGURA 25 – CORPO DE PROVA PARA LEVANTAMENTO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.	66
FIGURA 26 – CURVAS DE AQUECIMENTO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO.....	66
FIGURA 27 – FERRAMENTAL UTILIZADO EM TRABALHO DE NIKHARE <i>et al</i> (2008)....	69
FIGURA 28 - FERRAMENTAL DESENVOLVIDO PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE NAKAZIMA: (a) DESENHO E (b) COMO FABRICADO	69
FIGURA 29 – PRENSA HIDRÁULICA PARA OS EXPERIMENTOS PRÁTICOS.....	70
FIGURA 30 – CP`S UTILIZADOS POR CHEMIN (2011) PARA O LEVANTAMENTO DA CLC DO AÇO DP600.....	70
FIGURA 31 – CP`S ADAPTADOS PARA O LEVANTAMENTO DAS CLC`S NO PRESENTE ESTUDO (MEDIDAS REPRESENTADAS EM mm)	71
FIGURA 32 – EXEMPLO DE MALHA RISCADA IMPRESSA EM UMA DAS AMOSTRAS ..	72
FIGURA 33 – CONJUNTO DE CORPOS DE PROVAS GERADOS PARA LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL DAS CLC	74
FIGURA 34 – EXEMPLO DE QUADRILÁTERO COM SEUS EIXOS MAIOR E MENOR, COM OS PONTOS DE MEDIDA ADOTADOS	74
FIGURA 35 – DETALHE DE REGIÃO MEDIDA EM UMA DAS AMOSTRAS.....	75
FIGURA 36 – MODELO DE ESTAMPAGEM CONSTRUÍDO PARA LEVANTAMENTO COMPUTACIONAL DAS CLC	76

FIGURA 37 – REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DA RELAÇÃO ENTRE CADA ELEMENTO DA MALHA COM CADA UM DE SEUS VIZINHOS (PARA ELEMENTO INTERNO)	78
FIGURA 38 – REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DA RELAÇÃO ENTRE CADA ELEMENTO DA MALHA COM CADA UM DE SEUS VIZINHOS (PARA ELEMENTO EXTERNO)	79
FIGURA 39 – EXEMPLO DE PLANILHA DINÂMICA UTILIZADA PARA CÁLCULO DE GRADIENTE DE ESPESSURA (PRIMEIROS ELEMENTOS).....	80
FIGURA 40 – EXEMPLO DE PLANILHA DINÂMICA UTILIZADA PARA CÁLCULO DE GRADIENTE DE ESPESSURA (ALGUNS ELEMENTOS EM QUE HOUVE ESTRICÇÃO, SEGUNDO O CRITÉRIO).....	80
FIGURA 41 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO DE DOBRAMENTO E DIMENSÕES DA FERRAMENTA	83
FIGURA 42 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO VERDADEIRA DO AÇO HSLA 350/450 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS	85
FIGURA 43 – COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO (n) DO AÇO HSLA 350/450 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS	86
FIGURA 44 – COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA (k) DO AÇO HSLA 350/450 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS	86
FIGURA 45 – CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO VERDADEIRA DO AÇO DP 350/600 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS	87
FIGURA 46 – COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO (n) DO AÇO DP 350/600 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS	87
FIGURA 47 – COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA (k) DO AÇO DP 350/600 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS	88
FIGURA 48 – CLC EXPERIMENTAL PARA O AÇO HSLA 350/450, ENSAIADO EM TEMPERATURA AMBIENTE.....	90
FIGURA 49 – CLC EXPERIMENTAL PARA O AÇO HSLA 350/450, PARA AS TEMPERATURAS EM TORNO DE 400°C.....	91
FIGURA 50 – COMPARAÇÃO DAS CLC LEVANTADAS EXPERIMENTALMENTE NAS DUAS DIFERENTES TEMPERATURAS ESTUDADAS (AÇO HSLA 350/450).....	91

FIGURA 51 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO HSLA 350/450, PARA A TEMPERATURA DE 30°C	94
FIGURA 52 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO HSLA 350/450, PARA A TEMPERATURA DE 400°C (EXPERIMENTO E14).....	94
FIGURA 53 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO HSLA 350/450, PARA A TEMPERATURA DE 600°C (EXPERIMENTO E15).....	95
FIGURA 54 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO HSLA 350/450, PARA A TEMPERATURA DE 800°C (EXPERIMENTO E16).....	95
FIGURA 55 – COMPARAÇÃO DAS CLC COMPUTACIONAIS PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450).....	96
FIGURA 56 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO EXPERIMENTAL VERSUS O COMPUTACIONAL PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)	98
FIGURA 57 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO EXPERIMENTAL VERSUS O COMPUTACIONAL PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)	99
FIGURA 58 – CLC EXPERIMENTAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA A TEMPERATURA DE 30°C	101
FIGURA 59 – CLC EXPERIMENTAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA AS TEMPERATURAS EM	101
FIGURA 60 – COMPARAÇÃO DAS CLC NAS DUAS DIFERENTES TEMPERATURAS ESTUDADAS (AÇO DP 350/600)	102
FIGURA 61 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA A TEMPERATURA DE 30°C	103
FIGURA 62 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA A TEMPERATURA DE 400°C	104
FIGURA 63 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA A TEMPERATURA DE 600°C	104
FIGURA 64 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA A TEMPERATURA DE 800°C	105
FIGURA 65 – COMPARAÇÃO DAS CLC COMPUTACIONAIS PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600).....	106
FIGURA 66 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO EXPERIMENTAL VERSUS O COMPUTACIONAL PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)	107

FIGURA 67 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO EXPERIMENTAL VERSUS O COMPUTACIONAL PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600)	108
FIGURA 68 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E21	111
FIGURA 69 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E22	111
FIGURA 70 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E25	112
FIGURA 71 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E26	112
FIGURA 72 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO HSLA 350/450 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 10 mm	113
FIGURA 73 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO HSLA 350/450 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 20 mm	113
FIGURA 74 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E29 (30°C, RAIO DE DOBRA 10 mm)	114
FIGURA 75 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E30 (30°C, RAIO DE DOBRA 20 mm)	114
FIGURA 76 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E33 (400°C, RAIO DE DOBRA 10 mm)	114
FIGURA 77 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E34 (400°C, RAIO DE DOBRA 20 mm)	115
FIGURA 78 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E37 (600°C, RAIO DE DOBRA 10 mm)	115
FIGURA 79 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E38 (600°C, RAIO DE DOBRA 20 mm)	115
FIGURA 80 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E41 (800°C, RAIO DE DOBRA 10 mm)	116
FIGURA 81 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E42 (800°C, RAIO DE DOBRA 20 mm)	116

FIGURA 82 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO HSLA 350/450 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 10 mm (SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL)	117
FIGURA 83 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO HSLA 350/450 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 20 mm (SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL)	117
FIGURA 84 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E23	118
FIGURA 85 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E24	118
FIGURA 86 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E27	118
FIGURA 87 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E28	119
FIGURA 88 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO DP 350/600 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 10 mm	119
FIGURA 89 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO DP 350/600 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 20 mm	120
FIGURA 90 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E31	120
FIGURA 91 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E32	121
FIGURA 92 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E35	121
FIGURA 93 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E36	121
FIGURA 94 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E39	122
FIGURA 95 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E40	122

FIGURA 96 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E43	122
FIGURA 97 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E44	123
FIGURA 98 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO DP 350/600 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 10 mm (SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL)	123
FIGURA 99 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO HSLA DP 350/600 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 20 mm (SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL)	124
FIGURA 100 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)	132
FIGURA 101 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)	132
FIGURA 102 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)	133
FIGURA 103 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)	133
FIGURA 104 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)	134
FIGURA 105 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)	134
FIGURA 106 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)	135

FIGURA 107 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)	135
FIGURA 108 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)	136
FIGURA 109 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)	136
FIGURA 110 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)	137
FIGURA 111 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)	137
FIGURA 112 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 5 (200 mm X 100 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)	138
FIGURA 113 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 5 (200 MM X 100 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)	138
FIGURA 114 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 5 (200 MM X 100 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)	139
FIGURA 115 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)	139
FIGURA 116 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)	140
FIGURA 117 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)	140

FIGURA 118 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 7 (200 MM X 50 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)	141
FIGURA 119 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 7 (200 MM X 50 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)	141
FIGURA 120 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 7 (200 MM X 50 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)	142
FIGURA 121 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)	142
FIGURA 122 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)	143
FIGURA 123 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)	143
FIGURA 124 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)	144
FIGURA 125 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600)	144
FIGURA 126 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)	145
FIGURA 127 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)	145
FIGURA 128 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600)	146

FIGURA 129 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)	146
FIGURA 130 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)	147
FIGURA 131 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600).....	147
FIGURA 132 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)	148
FIGURA 133 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)	148
FIGURA 134 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600).....	149
FIGURA 135 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)	149
FIGURA 136 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 5 (200 MM X 100 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)	150
FIGURA 137 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 5 (200 MM X 100 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600).....	150
FIGURA 138 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 5 (200 MM X 100 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)	151
FIGURA 139 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)	151

FIGURA 140 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600).....	152
FIGURA 141 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)	152
FIGURA 142 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL	153
FIGURA 143 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 7 (200 MM X 50 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600).....	153
FIGURA 144 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 7 (200 MM X 50 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)	154
FIGURA 145 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)	154
FIGURA 146 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600).....	155
FIGURA 147 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)	155

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO PARA EMBUTIMENTO UTILIZADO NO EXPERIMENTO DE GOUD <i>et al</i> (2014)	45
TABELA 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS ENSAIADOS EM QUATRO TEMPERATURAS DIFERENTES NO EXPERIMENTO DE GOUD <i>et al</i> (2014)..	46
TABELA 3 – ENSAIOS REALIZADOS NO PRESENTE ESTUDO	62
TABELA 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS HSLA350/450 E DP350/600	63
TABELA 5 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS HSLA350/450 E DP350/600	63
TABELA 6 – COEFICIENTES DE ENCRUAMENTO E COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA DOS AÇOS HSLA350/450 E DP350/600	64
TABELA 7 – TEMPERATURAS DOS ENSAIOS.....	65
TABELA 8 – TABELA DE PARÂMETROS PARA TESTE DE TRAÇÃO DO MATERIAL HSLA350/450 (ESPESSURA DE 1,4 MM).....	67
TABELA 9 – TABELA DE PARÂMETROS PARA TESTE DE TRAÇÃO DO MATERIAL DP350/600 (ESPESSURA DE 1,5 MM)	67
TABELA 10 – ARRANJO EXPERIMENTAL PARA OS ENSAIOS DE ANÁLISE DE LIMITES DE CONFORMAÇÃO.....	68
TABELA 11 – PARÂMETROS UTILIZADOS DURANTE OS ENSAIOS NAKAZIMA.....	73
TABELA 12 – NÚMERO DE ELEMENTOS PARA CADA GEOMETRIA DO CONJUNTO NAKAZIMA REDUZIDO	78
TABELA 13 – ARRANJO EXPERIMENTAL PARA OS ENSAIOS DE RETORNO ELÁSTICO.....	82
TABELA 14 – RESUMO DOS EXPERIMENTOS DE LIMITES DE CONFORMAÇÃO	88
TABELA 15 – DETALHAMENTO DAS TEMPERATURAS ATINGIDAS NOS ENSAIOS E9 E E10.....	90
TABELA 16 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E9 E E10 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X	92
TABELA 17 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E13, E14, E15 E E16 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X	97

TABELA 18 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E9 E E13 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X	98
TABELA 19 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E10 E E14 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X.....	99
TABELA 20 – DETALHAMENTO DAS TEMPERATURAS ATINGIDAS NOS ENSAIOS E9 E E10.....	100
TABELA 21 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E11 E E12 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X.....	102
TABELA 22 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E17, E18, E19 E E20 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X107	
TABELA 23 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E11 E E17 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X.....	108
TABELA 24 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E12 E E18 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X.....	109
TABELA 25 – RESUMO DOS EXPERIMENTOS DE DOBRAMENTO SIMPLES	110

LISTA DE SÍMBOLOS

c	-	Folga entre Punção e Matriz
$^{\circ}C$	-	Grau Celsius
ε	-	Deformação Verdadeira
ε_1	-	Deformação Verdadeira Maior
ε_2	-	Deformação Verdadeira Menor
GPa	-	Giga Pascal
θ_1	-	Mudança Angular na Parede
θ_2	-	Mudança Angular no Flange
K	-	Coeficiente de Resistência
m	-	Coeficiente de Sensibilidade à Taxa de Deformação
mm	-	Milímetro
MPa	-	Mega Pascal
n	-	Coeficiente de Encruamento
ρ	-	Curvamento de Parede
σ	-	Tensão Verdadeira
r	-	Coeficiente de Anisotropia
Δr	-	Coeficiente de Anisotropia Planar
r_m	-	Coeficiente de Anisotropia Normal

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	24
1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	24
1.2. JUSTIFICATIVA	25
1.3. HIPÓTESE	26
1.4. OBJETIVO	27
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
1.6. ESCOPO E ESTRUTURA DO TRABALHO	27
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS AUTOMOTIVOS	29
2.1.1. Aços convencionais de alta resistência	29
2.1.1.1. <i>Aço de alta resistência e baixa liga</i>	29
2.1.2. Aços de alta resistência avançados	30
2.1.2.1. <i>Aço bifásico</i>	31
2.2. CONFORMAÇÃO DE CHAPAS	32
2.2.1. Modos de deformação de chapas na estampagem	33
2.2.1.1. <i>Estiramento</i>	34
2.2.1.2. <i>Embutimento</i>	34
2.2.1.3. <i>Dobramento</i>	35
2.2.2. Conformabilidade	36
2.3. CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO	37
2.3.1. Método Nakazima	39
2.3.2. Parâmetros que afetam a CLC	41
2.3.2.1. <i>Coeficiente de encruamento (n)</i>	42
2.3.2.2. <i>Coeficiente de anisotropia normal (rm)</i>	43
2.3.3. Influência da temperatura na CLC	44
2.4. RETORNO ELÁSTICO EM CONFORMAÇÃO DE CHAPAS	48
2.4.1. Tipos de retorno elástico	49
2.4.1.1. <i>Mudança angular</i>	49
2.4.1.2. <i>Curvamento de parede</i>	50
2.4.1.3. <i>Empenamento</i>	51
2.4.2. Previsão e minimização do retorno elástico	52
2.4.3. Influência da temperatura no retorno elástico	53
2.5. MODELAMENTO NUMÉRICO	56

2.5.1.	Comportamento do material	57
2.5.2.	Tipo e tamanho de elemento	58
2.5.3.	Descrição de contato	59
3.	METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	60
3.1.	INTRODUÇÃO	60
3.2.	MATERIAIS ENSAIADOS	63
3.3.	TEMPERATURAS ENSAIADAS	64
3.4.	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS NAS DIFERENTES TEMPERATURAS ENSAIADAS	65
3.5.	ANÁLISE DOS LIMITES DE CONFORMAÇÃO	67
3.5.1.	Experimentos práticos (método de Nakazima)	68
3.5.2.	Modelo computacional	76
3.5.2.1.	<i>Critério de gradiente de espessura (CGE)</i>	77
3.6.	ANÁLISE DE RETORNO ELÁSTICO	81
3.6.1.	Experimentos práticos	82
3.6.1.1.	<i>Procedimento para medição do retorno elástico</i>	83
3.6.2.	Modelo computacional	83
3.6.2.1.	<i>Procedimento para medição do retorno elástico</i>	84
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4.1.	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS NAS DIFERENTES TEMPERATURAS ENSAIADAS	85
4.1.1.	Aço HSLA 350/450	85
4.1.2.	Aço DP 350/600	87
4.2.	RESULTADOS DA ANÁLISE DOS LIMITES DE CONFORMAÇÃO	88
4.2.1.	Aço HSLA 350/450	89
4.2.1.1.	<i>Resultados Experimentais</i>	89
4.2.1.2.	<i>Resultados Computacionais</i>	93
4.2.1.3.	<i>Comparação dos resultados computacionais com os experimentais</i>	97
4.2.2.	Aço DP 350/600	100
4.2.2.1.	<i>Resultados Experimentais</i>	100
4.2.2.2.	<i>Resultados Computacionais</i>	103
4.2.2.3.	<i>Comparação dos resultados computacionais com os experimentais</i>	107
4.3.	RESULTADOS DA ANÁLISE DE RETORNO ELÁSTICO	110
4.3.1.	Aço HSLA 350/450	111
4.3.1.1.	<i>Resultados Experimentais</i>	111
4.3.1.2.	<i>Resultados Computacionais</i>	114

4.3.2.	Aço DP 350/600	117
4.3.2.1.	<i>Resultados Experimentais</i>	117
4.3.2.2.	<i>Resultados Computacionais</i>	120
5. CONCLUSÕES		125
REFERÊNCIAS		127
APÊNDICE A		127
APÊNDICE B		139

1. INTRODUÇÃO

A conformação plástica de metais é um processo de fabricação utilizado em diversas áreas industriais, tais como eletrodomésticos, embalagens e automotiva. Na fabricação de veículos, a principal aplicação está na conformação de componentes feitos de chapas metálicas. Devido à alta competitividade no setor, e a busca por veículos mais seguros, mais confortáveis, e com design inovador, a indústria automotiva foi incentivada a desenvolver novos materiais. Além disso, a crescente preocupação ambiental força os mercados a produzirem componentes automotivos mais leves, com o objetivo de reduzir a emissão de gases poluentes gerados pela queima dos combustíveis. Neste contexto, surge a demanda de materiais mais resistentes que possibilitem a utilização de chapas mais finas na produção de automóveis, como os aços de alta resistência. Esses aços possuem resistência mecânica mais elevada aliada a boa ductilidade. Porém, sofrem limitações de fabricação, principalmente no que diz respeito ao retorno elástico após a estampagem.

1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Os desafios na aplicação industrial dos aços de alta resistência dizem respeito principalmente à conformabilidade, união de chapas, vida de ferramenta e retorno elástico. Em relação a este último, é apontado na literatura como o problema que mais compromete a produção em massa de componentes estruturais com o uso destes materiais. A dificuldade na previsão e no controle do retorno elástico pode implicar na necessidade de ajustes de projeto na geometria da ferramenta, ajuste dos parâmetros de processo e no controle da temperatura de conformação durante a produção. (MAKINOUCHI *et al.*, 1993; KEELER, 2008).

Em relação à influência da temperatura no retorno elástico de metais submetidos a operações de conformação, a literatura aponta que a relação entre os fatores é que, quanto maior a temperatura utilizada nos ensaios, menores são os problemas decorrentes do efeito de retorno elástico (YANAGIMOTO *et al.*, 2007; GORNI, 2011; LEE *et al.*, 2014; ZHENG *et al.*, 2014).

Em contrapartida, o efeito do aumento da temperatura nos limites de conformação dos materiais não está completamente entendido. Enquanto para determinados materiais e determinadas faixas de temperatura ocorre aumentos dos limites de conformação, em outros casos são encontrados prejuízos no que diz respeito à conformabilidade (KIM *et al*, 2008; SINGH *et al*, 2010; GOUD *et al*, 2014; ZHANG *et al*, 2014; HUSSAINI *et al*, 2015).

Em processos de fabricação, a simulação numérica representa uma importante ferramenta a ser utilizada no desenvolvimento de estratégias de processamentos, no dimensionamento de ferramentas, otimização de processos e oferece previsões de tempos e resultados de maneira muito próxima à realidade. Na conformação plástica dos metais é de fundamental importância avaliar se as propriedades metalúrgicas do material a ser transformado correspondem de forma adequada aos esforços mecânicos aplicados, evitando desta forma, perda dos tarugos iniciais e quebras não previstas de matrizes e ferramentas. Importante também é avaliar se os conceitos geométricos envolvidos no processo, como trajetórias de ferramentas, variam de forma adequada para a obtenção dos resultados pretendidos. Além disso, a influência do correto controle da temperatura aparece como fator essencial a ser investigado. Diversas pesquisas foram desenvolvidas, a partir de 1991, com o objetivo de aprimorar a capacidade de previsão computacional de problemas enfrentados pela indústria automotiva.

1.2. JUSTIFICATIVA

Compreender a influência da temperatura no retorno elástico e nos limites de conformação de aços de alta resistência, e obter um modelo matemático que auxilie na previsão destes fatores, pode melhorar a implementação de novos métodos, tecnologias e ferramentas que auxiliem na resolução do problema. Como consequência, a utilização dos aços de alta resistência pode ser ampliada, substituindo gradativamente os aços convencionais.

1.3. HIPÓTESE

Entender as consequências do aumento de temperatura em operações de conformação de aços de alta resistência possibilitará visualizar de maneira mais direta a relação de perda e ganho entre os dois fatores analisados (retorno elástico e limites de conformação), principalmente através da constituição de modelos matemáticos que descrevam os comportamentos. Além disso, a definição da variação das propriedades mecânicas nas diversas temperaturas estudadas possibilitará analisar também o impacto da influência do fator temperatura de maneira mais restritiva em cada propriedade mecânica. Particularmente, em algumas propriedades (coeficiente de encruamento e coeficiente de anisotropia, por exemplo), torna-se também possível verificar o impacto em diferentes estados de deformação a que as chapas metálicas serão submetidas (análise do espectro entre as regiões de estiramento e embutimento profundo, em um Diagrama Limite de Conformação).

É possível que exista uma relação de perda e ganho entre os dois fatores analisados (limites de conformação e retorno elástico), em operações de estampagem a quente. Estudar experimentalmente e matematicamente o comportamento de dois aços de alta resistência submetidos a operações de conformação com variações de temperatura possibilitará um relacionamento entre os parâmetros, simplificando a análise de viabilidade de operações de estampagem.

Kim et al (2008), Singh et al (2010), Goud et al (2014), Hussaini et al (2014) e Zhang et al (2014) analisaram o efeito da temperatura nos limites de conformação de diferentes materiais. Resultados diferentes foram obtidos, conforme se variava a composição química e as propriedades mecânicas dos metais analisados. A complexa relação entre esses parâmetros torna maior a especificidade de cada estudo, sendo que, de acordo com a conclusão das pesquisas apontadas, existe a possibilidade de haver ganhou ou perda de conformabilidade no caso dos materiais que serão investigados no presente estudo.

1.4. OBJETIVO

Analisar a influência da temperatura no retorno elástico e nos limites de conformação de aços de alta resistência.

1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar as propriedades mecânicas de dois aços de alta resistência em diferentes temperaturas.
- Construir um modelo computacional que seja capaz de prever os limites de conformação de chapas metálicas.
- Levantar Curvas Limites de Conformação dos materiais estudados, com variação da temperatura.
- Construir um modelo computacional que seja capaz de prever o efeito do retorno elástico em dobramento simples de chapas metálicas.
- Realizar ensaios práticos de dobramento simples com os materiais estudados, em diferentes temperaturas, com o objetivo de analisar a interação entre o efeito do retorno elástico e o fator temperatura.
- Validar os modelos computacionais com a utilização dos resultados dos experimentos práticos.
- Comparar os efeitos da temperatura nos limites de conformação e no retorno elástico dos dois aços de alta resistência analisados.

1.6. ESCOPO E ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho se destina a estudar o efeito da temperatura no retorno elástico e nos limites de conformação de dois aços de alta resistência, a partir de experimentos práticos e computacionais.

Na seção 2 é realizada uma revisão sobre os principais conceitos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa, como a definição e delimitação dos aços classificados como HSS, a definição e descrição dos fenômenos estudados, bem como a interação entre os parâmetros de controle e os parâmetros de saída

definidos para o estudo. Na seção 3 é apresentada a metodologia de trabalho e o planejamento experimental da forma como foram realizados. Na seção 4 são mostrados os resultados encontrados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS AUTOMOTIVOS

2.1.1. Aços convencionais de alta resistência

A constante evolução no design e diminuição do peso impulsionou a ciência metalúrgica a desenvolver aços mais resistentes que permitissem a fabricação de componentes com os mesmos níveis de resistência mecânica, mas com menor volume de material. Um exemplo é o aço de alta resistência e baixa liga (HSLA, de *High Strength Low Alloy*), contendo micro-adições de Nb, Ti e V, sua estrutura ferrítica-perlítica mais refinada e capacidade de endurecimento por precipitação lhe proporcionavam maior resistência mecânica.

2.1.1.1. Aço de alta resistência e baixa liga

Aços de alta resistência e baixa liga (ou aços microligados) foram desenvolvidos com o intuito de providenciar melhores propriedades mecânicas, assim como maior resistência à corrosão atmosférica, principalmente quando comparados aos aços ao carbono convencionais. Diferenciam-se dos aços-liga por serem projetados para atenderem propriedades mecânicas específicas ante a uma composição química determinada (aços HSLA possuem tensões de escoamento superiores a 275 MPa). A composição química de um aço HSLA pode variar para diferentes espessuras de chapa para atender a requisitos específicos de propriedades mecânicas. Nestes casos (em forma de chapas) possuem baixos níveis de carbono (entre 0,05% e 0,25% em peso), de forma a aumentar a conformabilidade e soldabilidade. Além disso, possuem níveis de manganês acima de 2% em peso. Pequenas quantidades de cromo, níquel, molibdênio, vanádio, cobre, nitrogênio, nióbio, titânio e zircônio podem ser usadas em combinações diversas (ASM International, 2001).

2.1.2. Aços avançados de alta resistência

Em busca de aços com resistência ainda maior, foram desenvolvidos os aços bifásicos (DP, de *Dual Phase*), que devido a sua microestrutura peculiar, combinam alta resistência com boa conformabilidade. O contexto histórico a que a indústria metalúrgica estava inserida, a partir dos anos 1980, continuava demandando avanços nos materiais, principalmente devido à situação econômica e às novas exigências de conforto por parte dos consumidores. Tais demandas acabaram por reverter a tendência de diminuição de peso nos automóveis, devido à instalação de novos componentes como ar condicionado, direção hidráulica e vidros elétricos. Finalmente, o ambiente industrial extremamente competitivo encontrado nos anos 1990, aliado aos desafios ambientais, impuseram desafios ainda maiores ao setor (GORNI, 2008).

A partir da recorrente pressão sofrida pela indústria, que clamava por produtos cada vez mais adequados às novas situações, o mercado que até então era dominado pelo aço, passou a ser ameaçado pela atratividade de novos materiais mais leves, como ligas de alumínio, magnésio e plásticos. Como não é possível alterar a densidade do aço, a solução encontrada surgiu no sentido de reduzir a espessura das chapas, o que levou ao desenvolvimento de aços com maior resistência mecânica, para que os componentes pudessem manter suas aplicações originais (GORNI, 2011).

De acordo com a WorldAutoSteel (2009), um consórcio de trinta e cinco empresas conduziu uma pesquisa chamada ULSAB (de *UltraLight Steel Auto Body*), com o objetivo de desenvolver materiais que diminuíssem o peso de componentes estruturais de automóveis. Além disso, tais materiais deveriam ser estruturalmente sólidos, seguros, aplicáveis e acessíveis. A partir desta pesquisa, originou-se um grupo de aços denominado AHSS (*Advanced High Strength Steels*), que se destacou como um dos maiores contribuintes para o sucesso do estudo. A principal justificativa para a utilização desses aços é em relação à maior capacidade que tais materiais possuem em obter melhores desempenhos no gerenciamento da energia gerada em colisões. Além disso, seu desenvolvimento vai de encontro aos interesses da indústria automobilística, que clamam por aços com maior resistência mecânica e ao mesmo tempo boa conformabilidade.

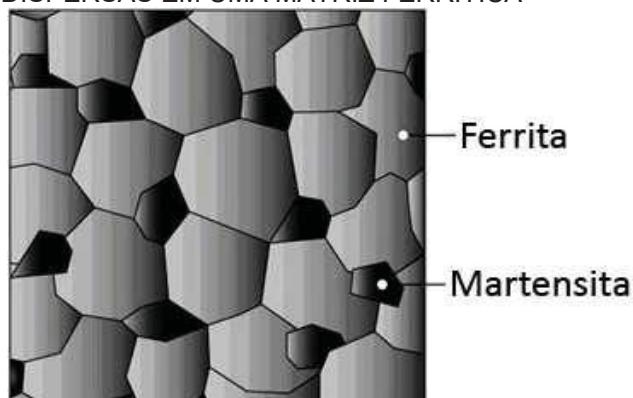
O item seguinte procura demonstrar como o desenvolvimento de aços com microestruturas mais complexas maximizam simultaneamente a ductilidade e a resistência mecânica, a partir da apresentação dos aços utilizados nos ensaios propostos por esta pesquisa.

2.1.2.1. Aço bifásico

O aço DP (*dual phase*) surgiu baseado na ideia de que as interações mais complexas que ocorrem entre diferentes microconstituintes presentes na microestrutura pudessem apresentar variações significativas de dureza entre si (GORNI, 2008). Esse aço consiste basicamente de uma matriz ferrítica contendo uma segunda fase dura de martensita disposta em ilhas (FIGURA 1).

O aço DP é produzido a partir de um controle rigoroso da temperatura durante a formação da austenita ou de uma estrutura bifásica austenita mais ferrita, de forma a transformar parte da austenita em ferrita antes de um resfriamento rápido para transformar a austenita remanescente em martensita (WORLDAUTOSTEEL, 2009). A transformação atrasada da martensita induz tensões residuais de compressão na matriz ferrítica, o que reduz o valor do limite de escoamento e suprime a ocorrência de patamar. Durante a deformação plástica, o escoamento da matriz ferrítica macia através das ilhas de martensita dura acabam por encruar o material, conferindo-lhe maior resistência mecânica (GORNI, 2008).

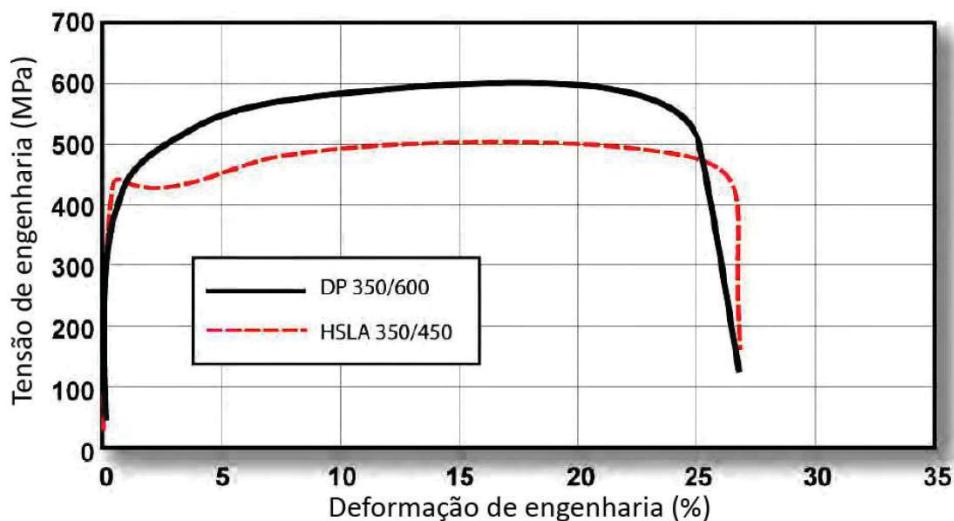
FIGURA 1 – ESQUEMA DA MICROESTRUTURA DE AÇOS DP. ILHAS DE MARTENSITA DISPERSAS EM UMA MATRIZ FERRÍTICA



FONTE: WORLDAUTOSTEEL (2009).

A combinação entre o alto coeficiente de encruamento e o excelente alongamento confere ao aço DP maior limite de resistência, quando comparados com aços convencionais de mesma resistência. Na FIGURA 2 pode ser visualizada uma comparação entre a curva tensão-deformação de um aço HSLA e um DP (WORLDAUTOSTEEL, 2009).

FIGURA 2 – CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA UM AÇO HSLA E UM DP DE MESMA TENSÃO DE ESCOAMENTO



FONTE: WORLDAUTOSTEEL (2009).

Devido à alta capacidade de absorção de energia e resistência à fadiga, os aços DP são utilizados em estruturas automotivas e em peças de segurança como vigas longitudinais e reforços. Além disso, podem ser aproveitados para compor ferramentas convencionais. Pressões em operações de conformação podem ser aumentadas em 20% com o uso de aços bifásicos, quando comparados com ferramentas fabricadas em aços microligados de mesma espessura (ARCELORMITTAL, 2012).

2.2. CONFORMAÇÃO DE CHAPAS

Os processos de conformação se dividem primariamente em conformação volumétrica e em conformação de chapas. Enquanto na conformação volumétrica as tensões de deformação possuem componentes nas três direções de coordenadas, na conformação de chapas, geralmente estão presentes no plano da chapa.

Entretanto, a distinção entre as duas classificações pode apresentar algumas contradições. O dobramento de uma chapa larga é considerado um processo de conformação plana, enquanto que o dobramento de uma barra estreita, embora suas tensões de deformação ocorram muito próximas de um plano, é considerado um processo de conformação volumétrica. E isso ocorre mesmo que ambos os tratamentos mecânicos estejam altamente relacionados. No entanto, mesmo que mecanicamente a divisão clássica não seja totalmente satisfatória, na prática industrial é muito incomum encontrar outra classificação (WANHEIM, 2004).

Abaixo serão descritos os modos de conformação de chapas metálicas estudados neste trabalho.

2.2.1. Modos de deformação de chapas na estampagem

A estampagem é um dos principais processos de conformação de chapas metálicas, sendo amplamente utilizada na indústria metal-mecânica devido a elevada produtividade, possibilidade de geração de formas irregulares, alto índice de capacidade do processo e baixo custo de produção para grandes volumes. Os princípios básicos do processo são caracterizados pela aplicação de tensões externas a uma chapa de metal, desenvolvidas pela ação de um punção contra uma matriz. A ação conjunta do punção e matriz proporciona a modificação da geometria plana da chapa para uma forma tridimensional definida. A mudança de geometria da chapa ocorre através do controle do escoamento do material, no estado plástico de tensões e deformações, para o interior de uma matriz de estampagem (CALDIN, 2006).

Combinações de diferentes processos como a conformação de chapas têm sido empregadas com muito sucesso na indústria mecânica. O estiramento e o embutimento são condições de estados de tensão importantes presentes no processamento industrial das chapas metálicas (SCHULER, 1998).

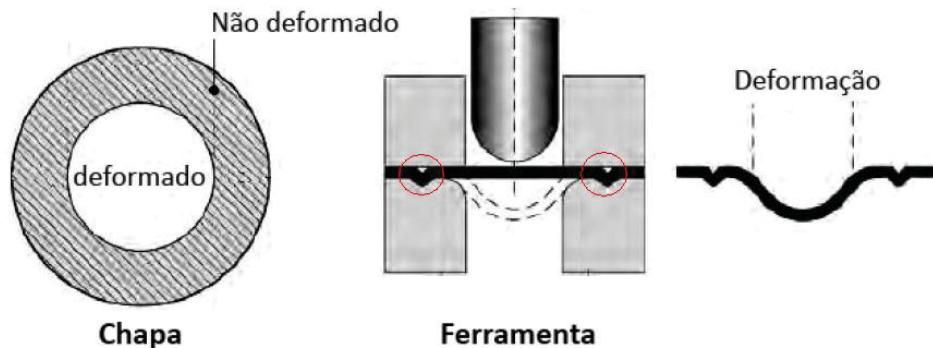
Os subitens seguintes tratam fundamentalmente de diferenciar os processos de estiramento e embutimento.

2.2.1.1. Estiramento

Pode ser definido como uma operação que consiste em esticar um material, restringido pelas bordas, para dentro de uma matriz, por meio da ação de um punção. A profundidade obtida por estiramento está, em geral, diretamente relacionada com o valor do coeficiente de encruamento do material. Um alto valor do coeficiente de encruamento garante maior capacidade em distribuir a deformação de forma mais uniforme ao decorrer do gradiente de tensão.

Importante observar a ação do cordão estirador na FIGURA 3 (circulado em vermelho). Essa estrutura é responsável por restringir as bordas e imprimir maior deformação no centro da chapa, ou seja, uma deformação biaxial ao fundo do copo estampado, diferenciando-se nesse sentido em relação ao embutimento.

FIGURA 3 - ESTIRAMENTO GERADO PELA AÇÃO DE UM PUNÇÃO DE TOPO ESFÉRICO

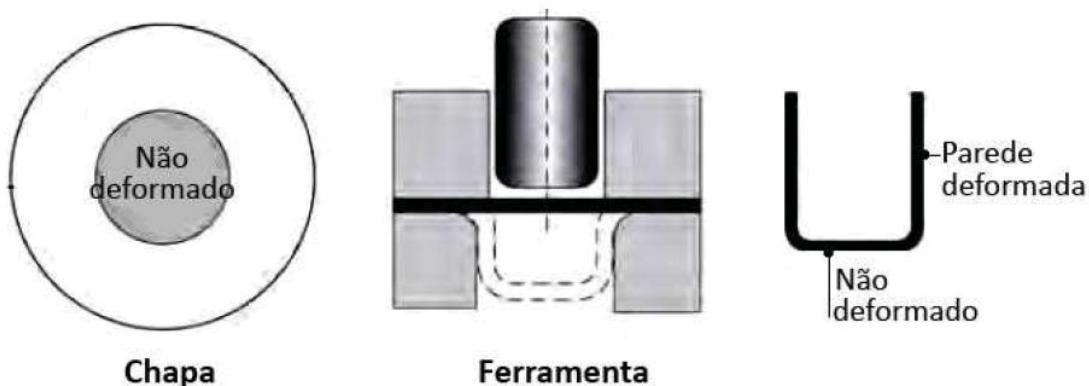


FONTE: LAJARIN (2012).

2.2.1.2. Embutimento

Neste processo, o flange do planificado circular é submetido a um tensionamento radial e a uma compressão circumferencial. Na FIGURA 4, pode-se observar a deformação causada pela estampagem sem o uso de cordão estirador, caracterizada pela deformação na parede do copo embutido, e não ao fundo como ocorre no estiramento.

FIGURA 4 - PLANIFICADO CIRCULAR CONFORMADO EM COPO CILÍNDRICO POR MEIO DE EMBUTIMENTO PROFUNDO

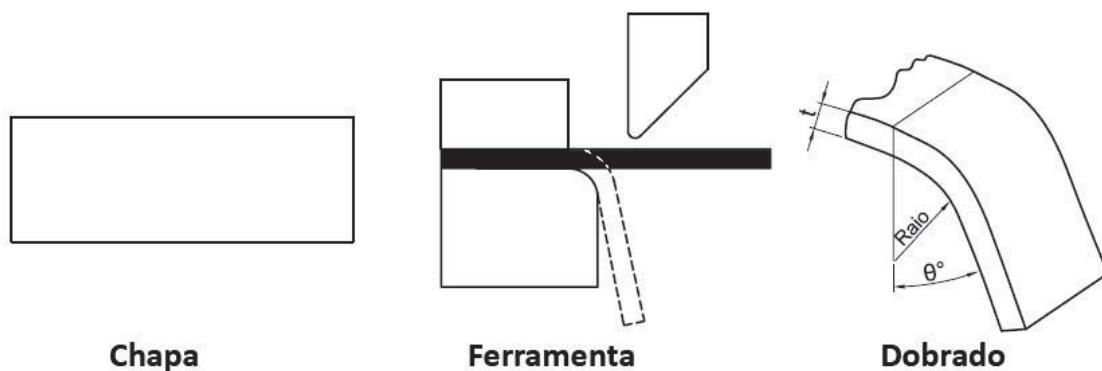


FONTE: LAJARIN (2012).

2.2.1.3. Dobramento

O dobramento sobre uma linha reta é o mais comum entre todos os processos de conformação de chapas (FIGURA 5). Um exemplo muito comum de operação de dobramento é perfilamento de chapas por meio de dobramentos progressivos sobre rolos perfilados. O dobramento de chapas pode apresentar problemas como fraturas, causadas pela alta resistência e baixa ductilidade do material, assim como definição errada da relação raio de dobra/espessura da chapa (R/t). Mas a causa mais comum de problemas em dobramento é a falta de controle dimensional em termos de retorno elástico e afinamento (LAJARIN, 2012).

FIGURA 5 - TÍPICO DOBRAMENTO EM "L" DE UMA TIRA, ONDE O θ° É O ÂNGULO DE DOBRA FINAL APÓS O RETORNO ELÁSTICO E "T" É A ESPESSURA DA CHAPA



FONTE: LAJARIN (2012).

2.2.2. Conformabilidade

O conceito de conformabilidade plástica está intimamente relacionado à capacidade de promover-se a modificação da forma de um material metálico sem acarretar defeitos que inviabilizem seu uso. Assim, geralmente, associa-se o termo conformabilidade a condições limites de deformação nas quais o material mantém-se íntegro. Especificamente no caso de conformação de chapas metálicas, o termo estampabilidade pode ser utilizado (DIETER, 1984).

As propriedades físicas de chapas metálicas empregadas em processos de conformação variam consideravelmente, dependendo de alguns fatores, como material e ligas empregadas, processamento, tratamentos térmicos e grau de encruamento. A seleção do material visa, não só o atendimento de requisitos funcionais do componente, como também propriedades de conformação que viabilizem o projeto de fabricação. Para a análise da conformabilidade, portanto, são alguns dos fatores que influenciam a capacidade de o material submeter-se ao processo de conformação escolhido: distribuição uniforme de deformações; alcance de elevados níveis de deformação sem estrições excessivas; fixação das tensões de compressão no plano das deformações (a fim de evitar o defeito enrugamento); fixação das tensões de cisalhamento no plano de deformações; manutenção da forma após a remoção da matriz; apresentação de superfície com textura suavizada (sem danificações) (EVANGELISTA, 2000).

Há um grande número de ensaios especificados, alguns normalizados, que têm por objetivo avaliar a conformabilidade plástica. Tais ensaios buscam avaliar quantitativamente as características dos materiais metálicos sob condições específicas de solicitação. A análise dos resultados obtidos fornece informações aproximadas do comportamento plástico (DIETER, 1984).

Os ensaios podem ser classificados quanto ao tipo de processo que se deseja avaliar (conformação de chapas ou conformação volumétrica), e quanto ao tipo de ensaio realizado (ensaços de laboratório e ensaços de fabricação). Os ensaios de laboratório são os mais simples de serem realizados, e apresentam como característica importante o fato de que o estado de tensão presente é conhecido e pode ser adequadamente controlado, bem como outros parâmetros importantes como temperatura e taxa de deformação. Ensaços de tração, compressão, torção e

dobramento se enquadram nesta categoria. Já os ensaios de fabricação apresentam uma maior complexidade de execução e buscam reproduzir condições verificadas nos processos de conformação, exigindo equipamentos e dispositivos mais elaborados. Para avaliação de estampabilidade, os ensaios mais utilizados são os desenvolvidos por Erichsen, Olsen, Swift, Fukui e Nakazima (BRESCIANI, 2011).

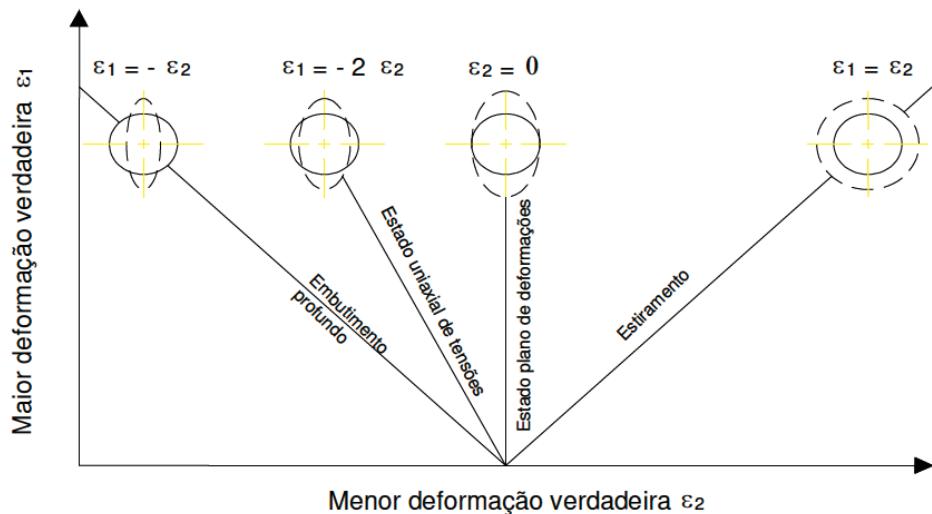
As principais respostas das análises de conformabilidade realizadas neste estudo serão definidas a partir do estudo das curvas limite de conformação (CLC), conceito este que será introduzido no próximo capítulo.

2.3. CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

A necessidade de prever falhas foi identificada por Keeler (1968) em aplicações de estampagens críticas. Com o objetivo de verificar os limites de conformação de materiais, o pesquisador introduziu o conceito de Diagrama Limite de Conformação (DLC), definido nos eixos das menores e maiores deformações principais no plano da chapa (FIGURA 6).

O limite de conformação de uma chapa metálica é definido como o estado no qual um afinamento localizado (estrição) na chapa inicia durante a conformação, basicamente levando a uma ruptura (STOUGHTON, 2000).

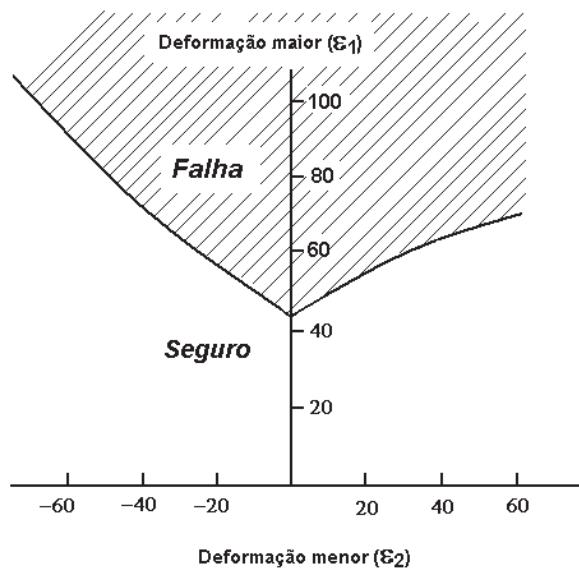
FIGURA 6 – DIAGRAMA LIMITE DE CONFORMAÇÃO – MODOS DE DEFORMAÇÃO PARA UMA MALHA CIRCULAR



FONTE: LANGE (1993).

As duas deformações principais (ε_1 e ε_2) medidas em diversos pontos do componente na iminência da falha, a partir de ensaios experimentais, resultam em uma curva (Curva Limite de Conformação – CLC) que separam as condições de falha e não falha (FIGURA 7) (KEELER, 1968).

FIGURA 7 – ASPECTO TÍPICO DE UMA CLC, COM AS REGIÕES “SEGURO” E “FALHA”

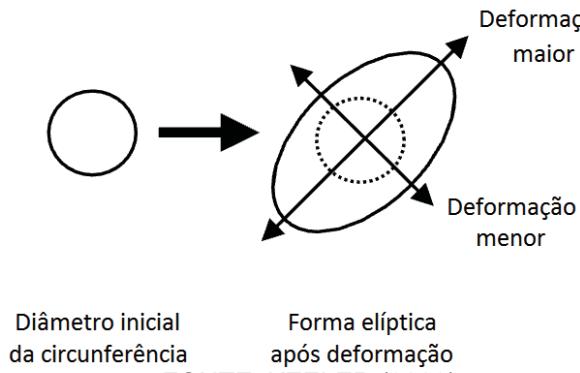


FONTE: TEPEDINO (2014).

O conceito de CLC foi estendido por Goodwin (1968) e Woodthorpe *et al* (1969) ao domínio de deformações compreendidos entre os estados de embutimento profundo e estiramento biaxial, ainda conforme a FIGURA 6.

A CLC pode ser obtida a partir da estampagem de peças submetidas à impressão de malhas de circunferências de pequenos diâmetros, entre 2,5 mm e 5 mm. Essa malha é impressa na chapa com o propósito de determinar a quantidade de deformação imposta durante o processo de estampagem. À medida que a chapa é estampada, as circunferências são alongadas nas regiões deformadas resultando em uma geometria elíptica que evidencia as direções de deformações máximas e mínimas no material (FIGURA 8). A geometria elíptica desenvolvida na malha permite a realização da medição das deformações verdadeiras ε_1 e ε_2 , respectivamente (KEELER, 2002).

FIGURA 8 – DEFORMAÇÕES NA CIRCUNFERÊNCIA DA MALHA GRAVADA



A maior deformação verdadeira é positiva, sendo esta obtida a partir do maior eixo da elipse. A menor deformação verdadeira é perpendicular em relação à maior deformação e pode ser positiva, nula ou negativa (KEELER, 2002).

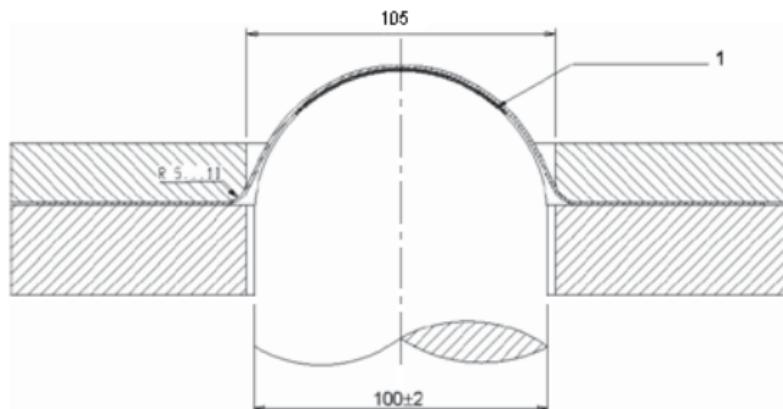
Uma CLC mais elevada indica que o material possui maior conformabilidade. A principal análise da conformabilidade é determinar se a quantidade de deformação excede o limite de conformação em algum ponto na peça conformada. Desse modo, quando uma chapa metálica falha por estrição localizada ou fratura durante a conformação, uma solução comum é redesenhar a peça ou mudar os parâmetros do processo de estampagem (KEELER, 2002).

2.3.1. Método Nakazima

Sendo classificado, segundo Bresciani (2011), como um ensaio de fabricação para análise conformabilidade, o Método Nakazima se propõe a fornecer como parâmetro de saída a Curva Limite de Conformação.

Nakazima (1968) propôs determinar, através de um único método de ensaio, tanto as deformações de embutimento quanto as de estiramento, comparando seus resultados com os obtidos através de outros métodos de ensaios simulativos conhecidos, como Bulge e Erichsen. Com um único ferramental (FIGURA 9) é possível reproduzir estados de deformações uniaxiais e biaxiais, através da deformação imposta por um punção semi-esférico em chapas metálicas retangulares que variam de largura e são fixas por uma matriz e um prensa-chapas.

FIGURA 9 – FERRAMENTAL DO ENSAIO DE NAKAZIMA, SENDO “1” A CAMADA DE LUBRIFICAÇÃO



FONTE: NAKAZIMA (1968).

O método de Nakazima é atualmente o mais utilizado para determinar a CLC, consistindo na marcação de uma rede de circunferências sobre a superfície plana da chapa, seguida por um embutimento até a fratura ou início da estrição (OZTURK *et al.*, 2005).

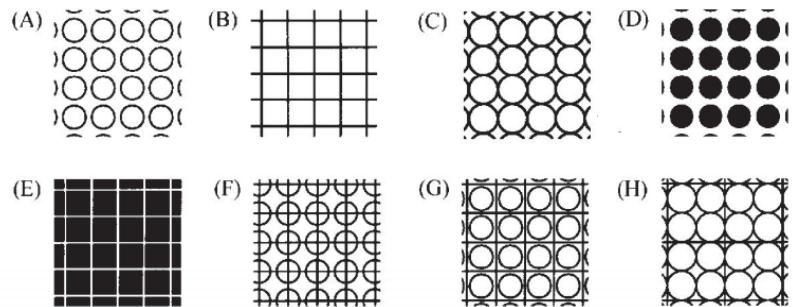
Gronostjski e Dolny (1980) descreveram uma variação do Método de Nakazima, em que era utilizado o ferramental Marciniak (1967) (descrito em Marciniak, 1992), com a intenção de eliminar os efeitos do atrito entre a chapa e o ferramental.

Atualmente o processo para determinação da CLC segue a norma ISO/WD 12004, a qual descreve os métodos de ensaios de Nakazima e Marciniak (BASTOS, 2009).

Segundo a norma, o método consiste dos seguintes passos:

1. Confecção de um conjunto de 18 corpos de prova com geometrias variadas. O objetivo da variação de forma é compreender os mais diversos tipos de estados de tensão que cobrem a área do DLC entre o estado de embutimento profundo e o de estiramento biaxial.
2. Aplicação de uma malha na superfície das chapas, conforme os exemplos da FIGURA 10.

FIGURA 10 – TIPOS DE MALHAS PARA O ENSAIO DE NAKAZIMA



FONTE: MARCONDES (2009).

3. Com o ferramental apropriado (FIGURA 9), reproduzir estados de deformações uniaxiais e biaxiais, através da deformação imposta pelo punção semi-esférico. As chapas metálicas retangulares são fixadas por uma matriz e um prensa-chapas. O punção atua até o início da estrição (falha) da chapa.
4. Medição dos círculos ou quadrados.
5. Cálculo das deformações.
6. Comparação com os limites dos materiais.

2.3.2. Parâmetros que afetam a CLC

Os limites de conformação estudados a partir do DLC podem ser influenciados por diferentes parâmetros, como: propriedades mecânicas; espessura do material ensaiado; o atrito entre os corpos de prova e o ferramental utilizado no ensaio; o formato e a geometria dos ferramentais de estampagem utilizados; o formato e as dimensões da malha impressa sobre a superfície dos corpos de prova.

De modo geral, maiores valores de deformação limites são obtidos quando se aumenta a espessura, o coeficiente de encruamento (n) e coeficiente de anisotropia (r).

2.3.2.1. Coeficiente de encruamento (n)

O encruamento do material é o endurecimento por deformação a frio, ou seja, quanto mais a força vai agindo sobre o corpo-de-prova, mais resistente ele vai se tornando. Este fato pode ser observado pelo aumento contínuo da tensão, à medida que o ensaio de tração se processa após o escoamento. Isto ocorre devido às interações entre as discordâncias que impedem o escorregamento dos planos cristalográficos, formando barreiras para a deformação (SOUZA, 1982).

Um método de observação do valor de encruamento é a partir da curva tradicional tensão-deformação convencional obtida do teste uniaxial de tensão (KEELER, 1968).

As curvas tensão-deformação verdadeira para metais podem ser aproximadas pela equação da conservação de energia (equação de Holloman):

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

Da equação da conservação de energia, n (denominado coeficiente de encruamento) é definido como o expoente da relação entre a tensão e a deformação, que determina o aumento de tensão para cada incremento de deformação.

De acordo com Marcondes (2009), a base para a maioria dos métodos para medir o valor de n é reescrever a equação da lei de conservação de energia como:

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (2)$$

Tal equação sugere uma linha reta quando plotado em um gráfico log-log. Como n é uma constante, é obtido medindo-se o ângulo da reta. O valor de K (coeficiente de resistência) é a tensão obtida pela intersecção da reta na deformação igual à unidade.

Ghosh (1977) estudou a influência do coeficiente de encruamento na conformação de chapas metálicas, concluindo que este parâmetro é o mais importante fator na distribuição de deformação anterior ao início da estrição difusa. Especificamente no que dizem respeito às deformações biaxiais, seus estudos

comprovaram que o fator n , juntamente com o fator m (coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação) em menor escala, é o principal influenciador em operações de estiramento. Isso significa que, em termos de curvas limites de conformação, é o coeficiente de encruamento que exerce a maior influência no primeiro quadrante do diagrama limite de conformação.

2.3.2.2. Coeficiente de anisotropia normal (r_m)

As propriedades mecânicas de um material trabalhado mecanicamente podem variar conforme a direção em que se retira o corpo de prova para ensaio. Esse fenômeno, chamado de anisotropia, aparece por causa da orientação preferencial dos planos e direções cristalinas do metal após uma grande deformação por trabalho mecânico, ou devido ao alinhamento de inclusões, vazios, segregação ou alinhamento de uma segunda fase precipitada, também devido ao trabalho mecânico (OTOMAR, 2010).

O índice de anisotropia plástica (r) é definido como a razão da deformação verdadeira na largura e a deformação verdadeira na espessura, no teste de um corpo de prova padrão (KEELER, 1968).

A componente planar da anisotropia (Δr) é uma diferença entre os r em diferentes direções, enquanto que a componente normal (r_m) é relacionada através da média dos diferentes r obtidos em diferentes direções. Um material completamente isotrópico é aquele que não apresenta variações de propriedades mecânicas de acordo com a variação das direções medidas, e, para estes, serão encontrados valores de r igual a um em todas as direções (WHITELEY, 1959).

O coeficiente de anisotropia normal (r_m) define a habilidade do metal se deformar na direção da espessura, relacionando com a deformação plana da chapa. Valor de r_m maior que 1, indica que o material tem maior resistência ao afinamento. Valores maiores que 1, melhoram a capacidade de embutimento, expansão de furo, e outros modos de conformação onde a espessura da chapa é comprometida.

Whiteley (1959) realizou ensaios experimentais com o propósito de avaliar a capacidade de diversos materiais serem embutidos a partir de ampla variação de parâmetros de anisotropia, a fim de entender como influenciam na qualidade final da peça estampada. Segundo o autor, as consequências da variação de propriedades

conforme se varia a direção em que são medidas no plano da chapa, são facilmente identificadas em produtos estampados através da visualização do efeito chamado de orelhamento (FIGURA 11). Os estudos de Whiteley (1959) concluíram que operações de embutimento são fortemente determinadas pela anisotropia normal do material.

FIGURA 11 – EXEMPLOS DO EFEITO DE ORELHAMENTO EM COPOS EMBUTIDOS DE LIGAS DE ALUMÍNIO

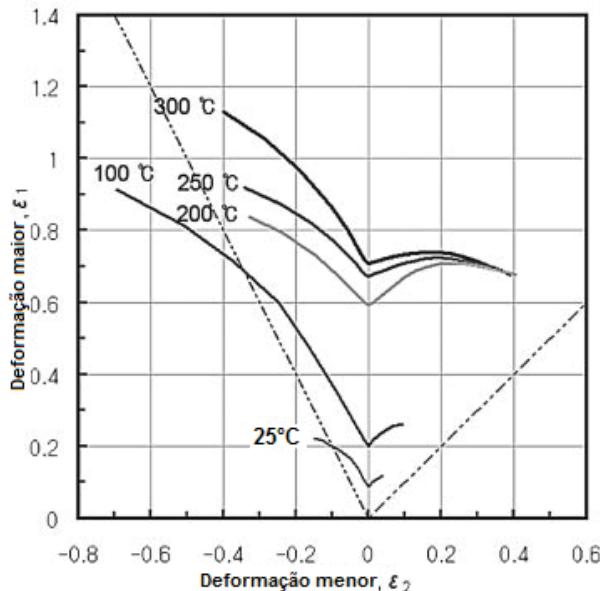


FONTE: ALUMATTER (2010).

2.3.3. Influência da temperatura na CLC

Kim *et al* (2008) levantaram Curvas Limites de Conformação de liga de magnésio (AZ31B), em diferentes temperaturas até o máximo de 300°C. O método utilizado foi o de Marcinak (1992). Os limites de conformação aumentaram de forma acentuada na temperatura de 200°C, sendo, a partir de então, observada uma tendência de aumento dos limites mais branda. Nas temperaturas comumente usadas na conformação deste tipo de liga (próximo a 300°C) os limites se mostraram de seis a sete vezes maiores em relação à temperatura ambiente (FIGURA 12).

FIGURA 12 – CLC PARA DIFERENTES TEMPERATURAS



FONTE: Adaptado de KIM *et al* (2008).

Singh *et al* (2010) estudaram, com o uso do método de elementos finitos, a conformabilidade de aço para embutimento a temperatura de 200°C. Apesar de os níveis de resistência mecânica, bem como o coeficiente de encruamento, terem se mostrado menores quando medidos nesta temperatura (quando comparados com a temperatura ambiente), os limites de conformação se mostraram superiores quando elevada a temperatura. Segundo os autores, esse comportamento é devido ao alívio da tensão residual e diminuição da tensão de fluxo do material.

Goud *et al* (2014) investigaram a influência da temperatura nas CLC's de aços para embutimento (TABELA 1), utilizando o método de Marcinia (1992) para encontrar os limites de conformação. As curvas foram relacionadas com algumas propriedades mecânicas do material extraídas nas mesmas temperaturas ensaiadas, conforme

TABELA 2, como o coeficiente de encruamento (n), o coeficiente de resistência (K) e a tensão de escoamento.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO PARA EMBUTIMENTO UTILIZADO NO EXPERIMENTO DE GOUD *et al* (2014)

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Sn	Cu	Ni	Mb	Fe
% em peso	0,048	0,83	0,39	0,024	0,019	0,027	0,004	0,019	0,054	0,028	Em balanço

FONTE: GOUD *et al* (2014).

TABELA 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS ENSAIADOS EM QUATRO TEMPERATURAS DIFERENTES NO EXPERIMENTO DE GOUD *et al* (2014)

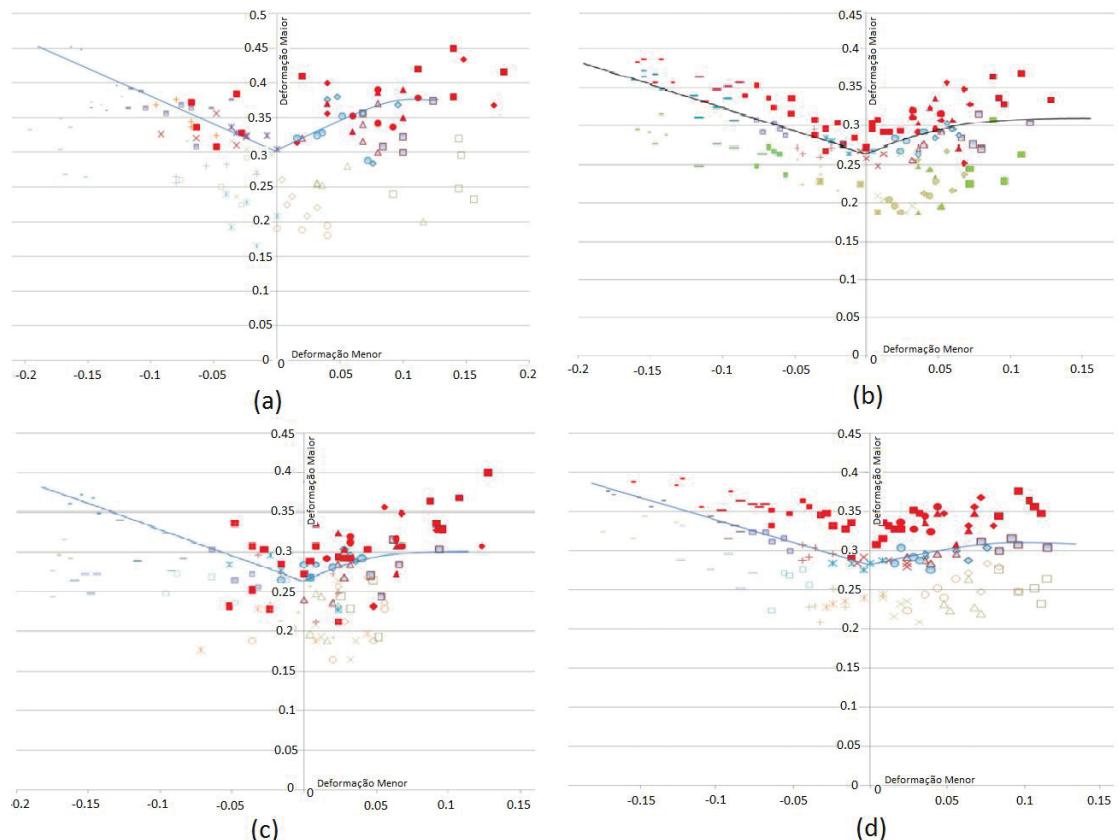
	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência máxima (MPa)	Deformação na tensão de escoamento	Alongamento total (%)	Coeficiente de encruamento (n)	Coeficiente de resistência (K) (MPa)
25°C (temperatura ambiente)	202	337	0,0222	44	0,304	677
150°C	188	304	0,0291	35	0,274	577
300°C	184	294	0,0314	29	0,289	548
450°C	216	329	0,0582	39	0,261	684

FONTE: GOUD *et al* (2014).

As propriedades mecânicas dos materiais levantadas durante o ensaio de tração uniaxial apresentaram uma determinada tendência enquanto a temperatura foi elevada até 300°C (no sentido de diminuir a resistência mecânica), enquanto que na temperatura de 450°C essa tendência se inverteu. Analisar o coeficiente de resistência (K) também é uma alternativa para avaliar este comportamento. A explicação para esse fenômeno, para este caso específico, segundo os autores, é que a presença de silício e outros elementos aumentaram o deslocamento de densidade devido ao fenômeno de regime de deformação dinâmica a partir de temperaturas próximas a 450°C, o que resultou no aumento da resistência mecânica.

A conformabilidade dos materiais analisados no estudo de Goud *et al* (2014) seguiu a tendência prevista no ensaio de tração uniaxial, para cada faixa de temperatura estudada. Observando particularmente o estado plano de deformações, o limite de deformação decresce com o aumento da temperatura até determinado nível, aumentando para a temperatura de 450°C. Além da razão apontada nas observações do ensaio de tração, outro motivo que, segundo os autores, explica esse comportamento, diz respeito à variação do coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação (m), conforme estudado por Gosh (1977). Tal parâmetro estaria associado diretamente ao coeficiente de encruamento.

FIGURA 13 – CLC PARA DIFERENTES TEMPERATURAS: (a) TEMPERATURA AMBIENTE, (b) 150°C, (c) 300°C, (d) 450°C



FONTE: Adaptado de GOUD *et al* (2014).

Hussaini *et al* (2014), desenvolveram pesquisa prática sobre a variação de temperatura durante operação de embutimento de aço inoxidável austenítico 316. Dentre as temperaturas estudadas (150°C e 300°C), somente na temperatura de 300°C o aço apresentou melhorias nos limites de conformação. Em pesquisa mais recente (HUSSAINI *et al*, 2015), a mesma tendência foi confirmada, dessa vez também através de método analítico para previsão dos limites de conformação.

Zhang *et al* (2014), ao estudarem os efeitos da temperatura nos limites de conformação de liga de alumínio, concluíram que a taxa de deformação impacta significativamente na obtenção das CLC. A taxas baixas (10 mm/s), os limites de conformação aumentam com o aumento da temperatura. Entretanto, sob condições dinâmicas de conformação (750 e 1000 mm/s), resulta em limites de conformação a 200°C mais baixos que a temperatura ambiente, sendo que a 300°C os limites voltam a se aproximar da condição natural.

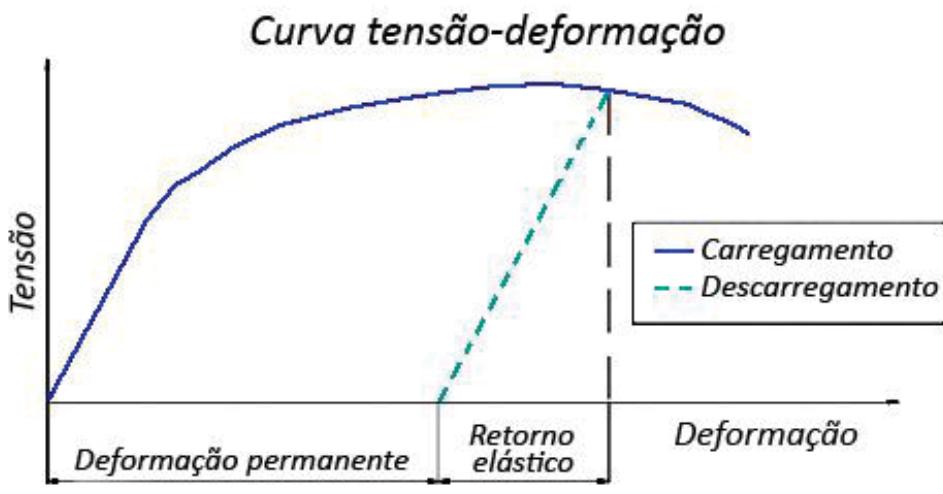
2.4. RETORNO ELÁSTICO EM CONFORMAÇÃO DE CHAPAS

Existe uma ênfase cada vez maior na manutenção da precisão das dimensões dos produtos. Os problemas dimensionais em peças conformadas decorrem normalmente das tensões elásticas criadas durante a sua deformação e do alívio das tensões após a descarga do punção ou remoção da matriz, em cada operação de conformação. O retorno elástico está presente em todas as peças estampadas, sendo que sua magnitude aumenta, de modo geral, com a elevação da resistência dos aços (HAUS, 2011).

Segundo Luna (2005), quando se trata do problema do retorno elástico, existem claramente dois estados. Durante o estado em carga, o punção exerce uma força sobre o material a ser conformado. O estado de descarga começa a ocorrer desde o momento que a prensa deixa de exercer pressão sobre a peça, e é nesta etapa que ocorre o fenômeno do retorno elástico.

Uma boa forma de entender o efeito do retorno elástico é a partir da observação da curva tensão-deformação do material a ser processado. Quando o material está se deformando plasticamente, o material é tensionado além de sua tensão de escoamento, de forma a induzir uma deformação permanente. Quando a carga é removida, a tensão volta a ser zero, seguindo na FIGURA 14, uma trajetória paralela ao módulo de elasticidade. Portanto, salvo algumas exceções, a deformação permanente será menor que a deformação inicialmente projetada (RAMALHEIRA, 2008). Importante observar que a tensão máxima ocorre nas superfícies inferior e superior da chapa metálica, caindo pra zero na região do material que se situa em volta da linha neutra da seção transversal. Na prática, isso significa que enquanto a maior parte da tensão no interior da chapa é elástica e atua com mais intensidade na tendência de retornar às dimensões originais, a parte do material que se encontra nas superfícies tendem a se comportar no sentido contrário.

FIGURA 14 - CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO NA OPERAÇÃO DE CONFORMAÇÃO



FONTE: RAMALHEIRA (2008).

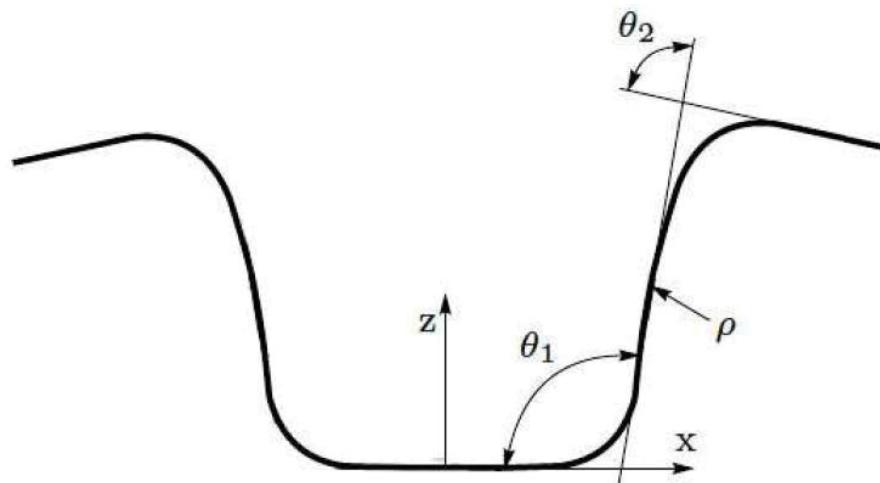
2.4.1. Tipos de retorno elástico

Por se tratar de um perfil recorrente em componentes estruturais de carrocerias automotivas, o perfil de canal é o mais comumente utilizado para o estudo do retorno elástico. Este tipo de geometria apresenta os três tipos clássicos de retorno elástico que são apresentados a seguir: mudança angular, curvamento de parede e empenamento. Por tais razões, o perfil de canal é amplamente utilizado em estudos de retorno elástico, e segue modelo proposto por Makinouchi *et al* (1993), considerado um “*benchmark problem*”.

2.4.1.1. Mudança angular

A mudança angular é a deformação produzida quando o perfil de uma parede dobrada ou embutida se desvia do perfil original da ferramenta (WORLDAUTOSTEEL, 2009). Esse tipo de retorno elástico aparece duas vezes no perfil estudado. Na FIGURA 15 pode ser visualizada a mudança angular na parede (θ_1), e também a mudança angular no flange (θ_2).

FIGURA 15 - DIFERENTES TIPOS DE RETORNO ELÁSTICO OBSERVADOS EM PERFIS DE CANAL



FONTE: LAJARIN (2012).

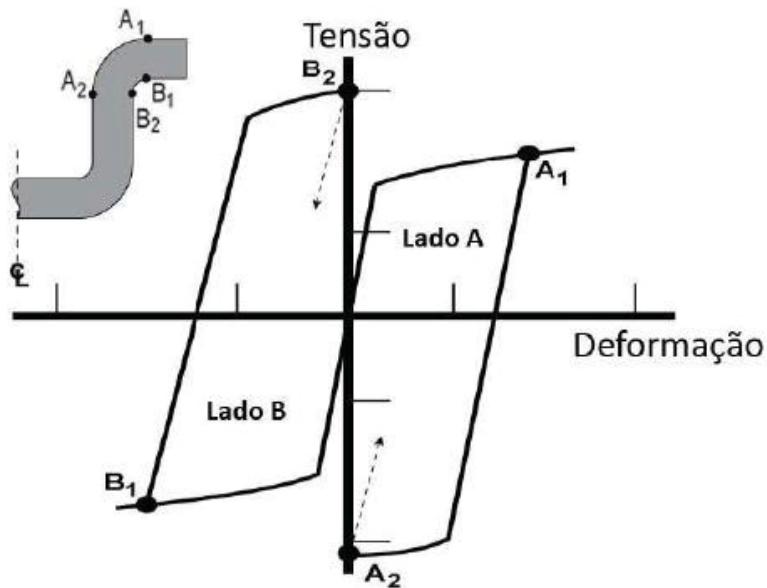
As mudanças angulares sofridas na seção transversal do perfil conformado são decorrentes exatamente das diferenças de tensões encontradas ao longo da espessura da chapa.

2.4.1.2. Curvamento de parede

Curvamento de parede (ρ) é a curvatura criada na parede lateral de um canal. Ocorre quando o material é forçado a fluir sobre o raio do punção ou da matriz, ou por sobre o cordão estirador (WORLDAUTOSTEEL, 2009). As diferenças de tensões (tração/compressão) que ocorrem entre a superfície interna e externa da chapa, geram a distribuição irregular de tensões ao longo da espessura da chapa, e são responsáveis pelo aparecimento do fenômeno.

Na FIGURA 16 é ilustrado em detalhes o que ocorre quando a chapa metálica é embutida sobre o raio da ferramenta. A deformação impressa ao lado “A” muda de tração (A1), durante o dobramento, para compressão, durante o desdobramento. O oposto ocorre com o lado “B”, que muda de compressão, durante o dobramento, para tração, durante o desdobramento. Após a remoção do punção do interior da cavidade da matriz (estado de descarregamento), o lado “A” apresenta tendência a alongar, enquanto o “B” de contrair, devido à recuperação elástica, causando o curvamento (LAJARIN, 2012).

FIGURA 16 - ORIGEM E MECANISMO DO CURVAMENTO DE PAREDE

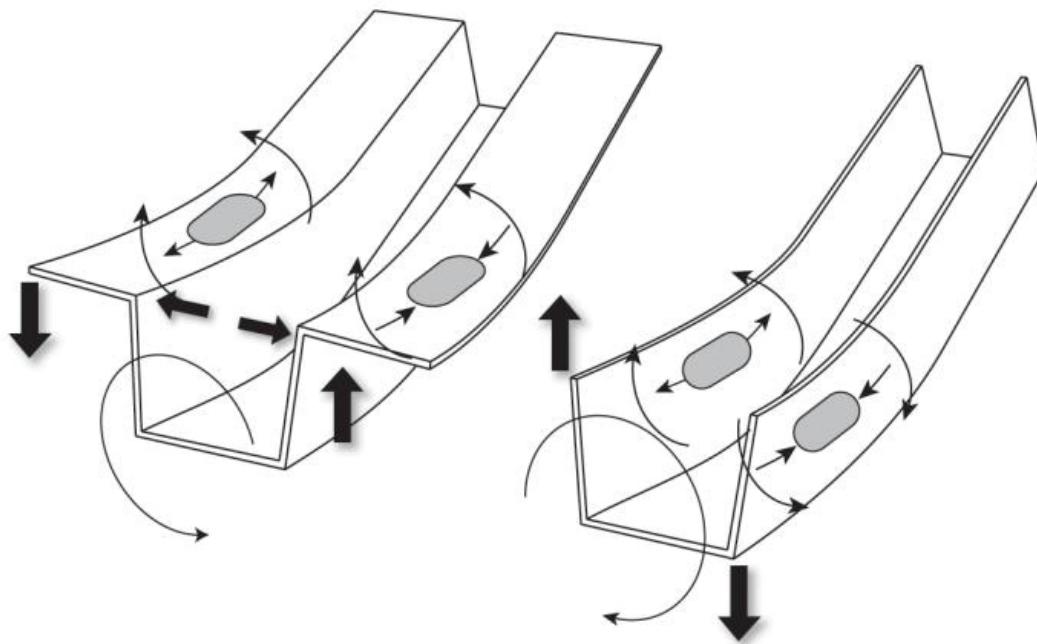


FONTE: LAJARIN (2012).

2.4.1.3. Empenamento

O tipo de retorno elástico chamado empenamento é definido como a rotação de duas ou mais seções transversais, de maneira diferente ao longo do eixo longitudinal do componente. O fenômeno é causado devido a um retorno elástico desbalanceado e tensões residuais atuantes na peça criando um par de forças que tendem a rotacionar uma parte do material em relação a outro (WORLDAUTOSTEEL, 2009), conforme pode ser visualizado na FIGURA 17.

FIGURA 17 - TORÇÕES CRIADAS POR TENSÕES RESIDUAIS NO FLANGE OU NA PAREDE LATERAL



FONTE: WORLDAUTOSTEEL (2009).

2.4.2. Previsão e minimização do retorno elástico

O retorno elástico é influenciado pelo módulo de elasticidade, resistência ao escoamento dos materiais e relação do raio de dobra pela espessura da chapa (R/t). Além disso, o retorno elástico é largamente dependente do momento de flexão através da chapa, antes do descarregamento das forças de conformação (HAUS, 2011). Como resultado, a precisão do cálculo de retorno elástico depende dos pressupostos utilizados para a obtenção do momento de flexão.

De acordo com Lajarin (2012), a geometria do componente e da ferramenta também são parâmetros que atuam sobre o fenômeno do retorno elástico. Se as relações geométricas envolvidas impedem o relaxamento completo das tensões elásticas durante o descarregamento, as tensões mantidas no componente são chamadas de tensões residuais. Para se opor a essas tensões, o componente altera sua forma. Por isso, padrões geométricos podem ser criados para ajudar a distribuir uniformemente as tensões através da espessura da chapa.

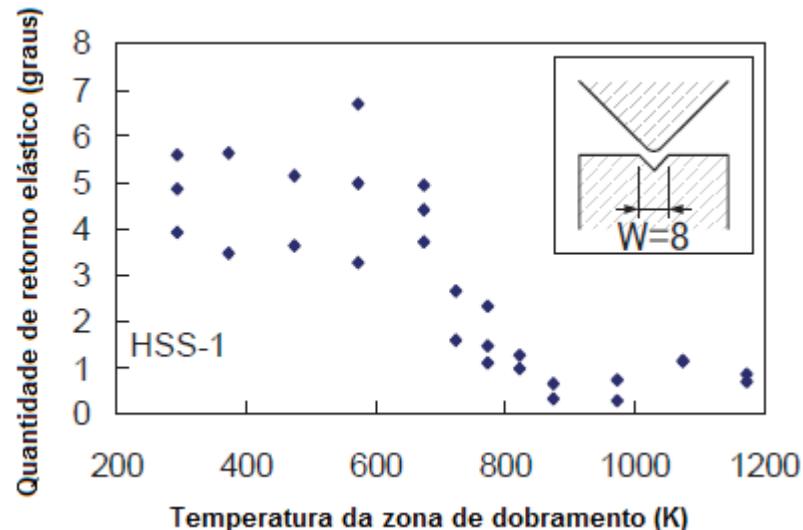
Keeler (2008) cita três categorias de técnicas que são usualmente aplicadas para compensar o retorno elástico:

1. Aplicar uma etapa adicional que modifica as tensões indesejáveis na chapa, aliviando-as. Um exemplo disso é uma operação após a estampagem que reduz a mudança angular e o curvamento da parede lateral, a partir da transformação da tensão normal de tração-compressão ou gradiente de tensão residual, através da espessura da chapa, em uma tensão única de tração, a partir do emprego de cordões estiradores removíveis.
2. Modificar o processo de estampagem ou o ferramental, a fim de diminuir os níveis de tensão do material deformado plasticamente. Um exemplo deste é a variação da temperatura de operação, objeto de estudo deste trabalho.
3. Modificar a geometria do produto de forma a fazê-lo ter mais resistência às tensões elásticas. Exemplos incluem cordões estiradores e outros reforços mecânicos e geométricos.

2.4.3. Influência da temperatura no retorno elástico

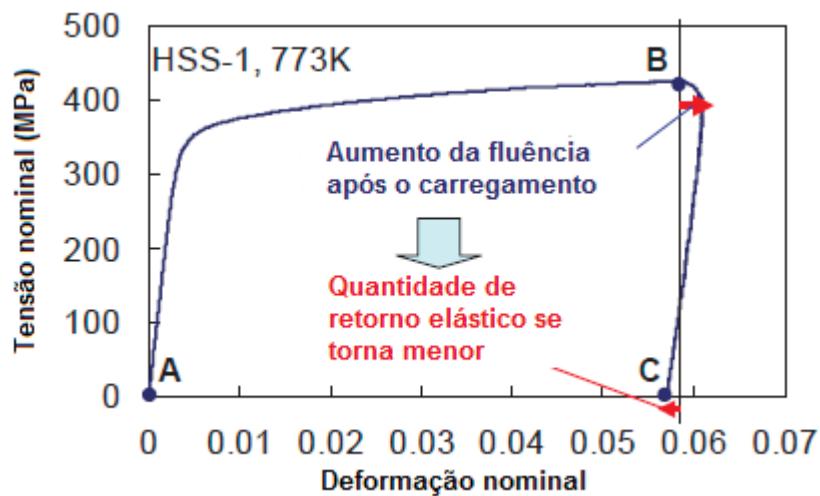
Yanagimoto *et al* (2007) observaram o comportamento de chapas de aços de alta resistência durante teste de dobramento em temperaturas até cerca de 500°C, a fim de avaliar o fenômeno do retorno elástico. Como resultado de seus experimentos, concluíram que para valores acima de 477°C (750K) na zona de dobramento, a quantidade de retorno elástico diminui drasticamente, não apresentando resultados significativamente melhores após essa faixa de temperatura (FIGURA 18). Segundo os autores, a principal razão que explica esse fenômeno se deve ao fenômeno de recristalização, que impacta na diminuição do retorno elástico, conforme curva tensão-deformação obtida a 773K (FIGURA 19).

FIGURA 18 – RELAÇÃO ENTRE QUANTIDADE DE RETORNO ELÁSTICO E TEMPERATURA NA ZONA DE DOBRAMENTO



FONTE: Adaptado de YANAGIMOTO *et al* (2007).

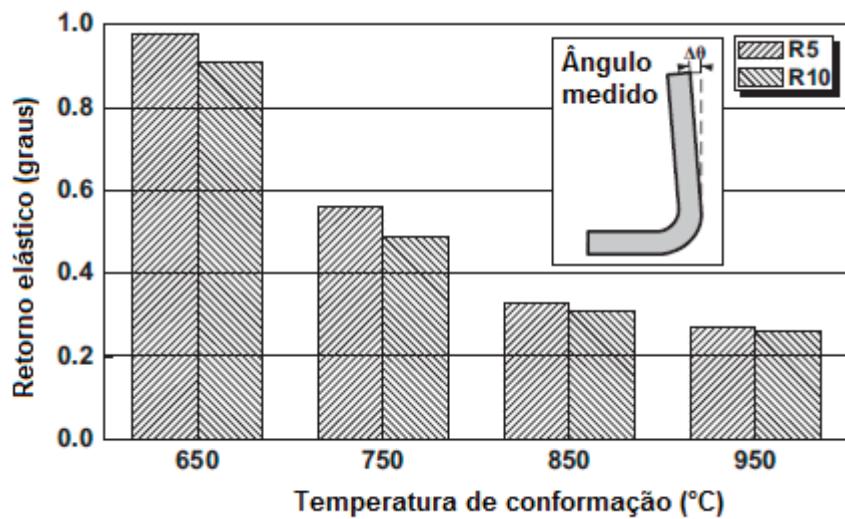
FIGURA 19 – CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO OBTIDA A 773K



FONTE: Adaptado de YANAGIMOTO *et al* (2007).

Lee *et al* (2014), ao estudarem o fenômeno do retorno elástico a partir da imposição de altas temperaturas a um modelo de dobramento em U de aço de alta resistência, observaram a diminuição do retorno elástico a partir de temperaturas próximas as 750°C (com continuação da tendência em 850°C e 950°C) (FIGURA 20).

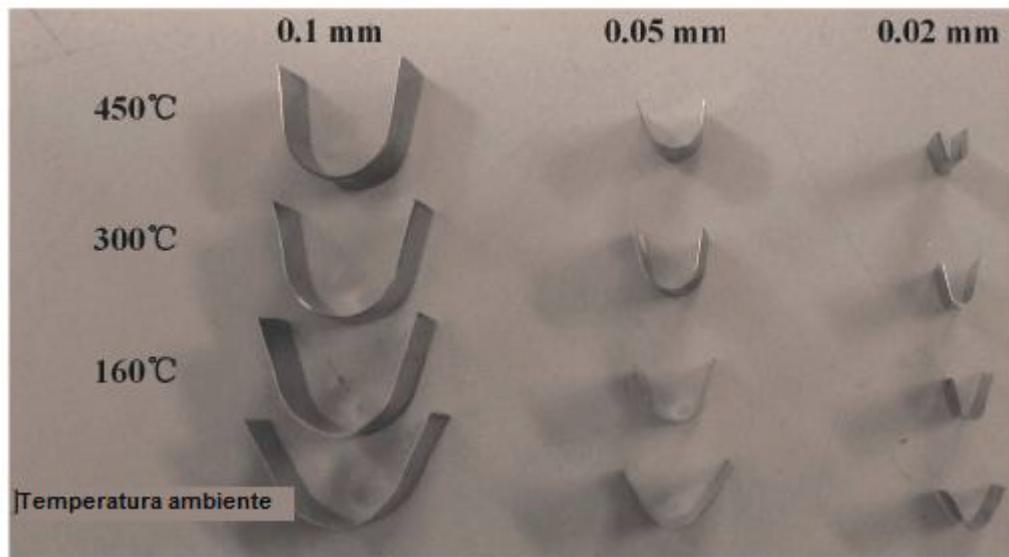
FIGURA 20 – QUANTIDADE DE RETORNO ELÁSTICO RELACIONADA COM A TEMPERATURA DE CONFORMAÇÃO E RAIO DO PUNÇÃO



FONTE: Adaptado de LEE *et al* (2014).

Também em 2014, Zheng *et al* desenvolveram ensaios de micro dobramentos com a utilização de chapas de titânio puro em espessuras diferentes. Conforme pode ser visualizado na FIGURA 21, os resultados também tendem à diminuição do retorno elástico com o aumento da temperatura.

FIGURA 21 – CHAPAS ENSAIADAS EM DIFERENTES TEMPERATURAS PARA AVALIAÇÃO DE RETORNO ELÁSTICO



FONTE: Adaptado de ZHENG *et al* (2014).

2.5. MODELAMENTO NUMÉRICO

Os primeiros trabalhos de simulação da conformação plástica de chapas metálicas remontam aos anos 30 (SACHS, 1935). Entretanto, foi nas últimas décadas, através da simulação com base no método dos elementos finitos, que a simulação numérica ganhou espaço como uma ferramenta de grande utilidade nos projetos de componentes obtidos por conformação (PIAO, 2010). Na estampagem de chapas, a análise numérica tem contribuído muito para a redução de tempo e custo de desenvolvimento de ferramentas (ANDERSSON, 2005).

Makinouchi (2001) cita as seguintes vantagens da simulação numérica por elementos finitos na conformação de chapas:

- a) Permite simulação de todos os processos de conformação de chapa, incluindo a estampagem, corte e dobragem.
- b) Proporciona precisão e confiabilidade dos resultados da simulação e previsão de defeitos de estampagem, como retorno elástico, “orelhamento”, enrugamentos e fraturas.
- c) É aplicável a uma grande variedade de produtos obtidos pelo processo de conformação plástica dos metais, não existindo nenhuma restrição quanto à forma e o tamanho dos produtos embutidos.
- d) Utilização e modelamento do comportamento de diferentes materiais, como aços macios, aços de alta resistência, ligas de alumínio, etc.
- e) Realização do modelamento e simulação em um tempo aceitável.

Nos subitens seguintes serão apresentados alguns parâmetros computacionais essenciais para uma análise de conformação de chapas. Como o software utilizado no presente estudo foi o ABAQUS, tais aspectos serão discutidos sob o ponto de vista de seu funcionamento.

2.5.1. Comportamento do material

A deformação plástica é um fenômeno que, por essência, apresenta diversas não-linearidades. Segundo Gomes (2001), é possível distinguir três tipos de não-linearidades:

1. Não-linearidade geométrica: ocorre sempre que os deslocamentos ou deformações sejam suficientemente significativos para que a configuração inicial não possa mais ser utilizada para exprimir as condições de equilíbrio de compatibilidade.
2. Não-linearidade física ou do material: ocorre quando as leis constitutivas (como diagramas tensão-deformação) dos materiais não são lineares. Aqui ocorrem algumas sub-divisões quanto às teorias que podem ser adotadas, como por exemplo:
 - Teoria da plasticidade, na qual as leis constitutivas não-lineares são levadas em conta.
 - Teoria da viscoplasticidade, na qual, além das leis constitutivas não-lineares, as propriedades mecânicas do material dependem do tempo.
 - Teoria dos materiais hiperelásticos, como no caso de borrachas, por exemplo.
 - E ainda teorias que representam a baixa resistência por tração dos materiais frágeis por meios de rupturas localizadas no corpo.
3. Não-linearidade de contato: quando as alterações das condições de contorno ou de aplicação de cargas são suficientes para mudar significativamente o estado de tensões no corpo.

Em relação a não-linearidade física, a modelagem do material pode ser dividida em duas partes: uma que descreve o estado de tensão no escoamento inicial do material (função de escoamento plástico), e uma que descreve o material quanto a função do escoamento que se desenvolve durante a deformação plástica (lei de encruamento). De acordo com Laurent *et al.* (2008) e Burchitz (2008), a função de escoamento plástica usada em análise numérica é um dos fatores que mais

influenciam no estado interno final de tensões de um componente deformado plasticamente.

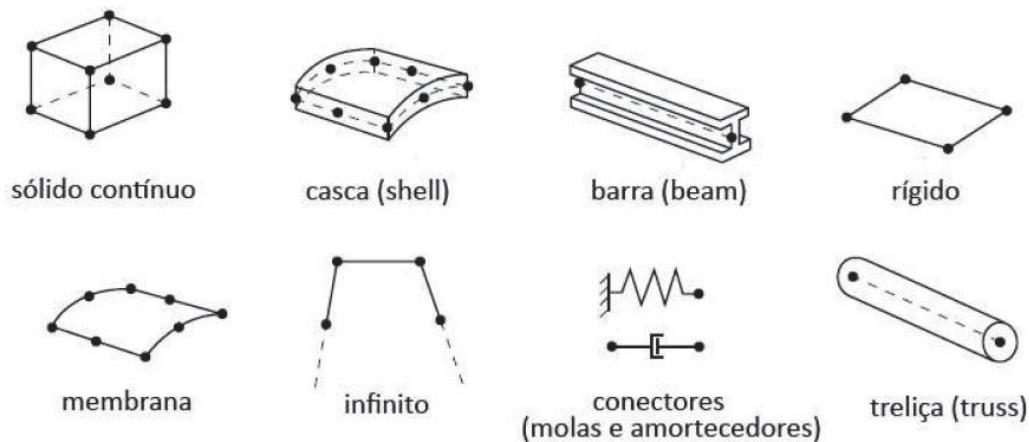
2.5.2. Tipo e tamanho de elemento

Nos métodos dos elementos finitos, os volumes analisados são descritos a partir de uma aproximação do modelo real, a partir de sua divisão em uma malha de elementos finitos. O erro dessa aproximação depende da interpolação natural do elemento, assim como de alguns detalhes da sua formulação. De modo geral, o erro pode ser reduzido usando mais elementos, desde que isto aumente o número de graus de liberdade do modelo. Quanto mais complexa a geometria, mais se faz necessário um número grande de elementos. Entretanto, é necessário observar que uma simulação baseada em um número demasiadamente grande de elementos pode ocasionar em um processamento dispendioso do ponto de vista do tempo. Burford *et al.* (1991) afirmam que os resultados simulados, tanto de medidas de deformação quanto de força, são bastante sensíveis ao refinamento da malha e a disposição dos elementos na mesma. Mattiason (1992) *et al.* relacionou o tamanho do elemento ao tamanho do menor raio presente em um processo de estampagem. Ele concluiu que o tamanho ideal do elemento deve ser igual à metade do menor raio presente na geometria do modelo, e que o nível de oscilação de forças presentes nos resultados simulados aumenta com o tamanho do elemento. Em relação ao fenômeno do retorno elástico, Li *et al.* (2002) e Burchitz (2008) concluíram que para que a análise tenha um nível bom de precisão, é recomendado um nó a cada 5 graus de ângulo de rotação sobre o raio da ferramenta.

Em relação ao tipo de elemento, o ABAQUS oferece algumas possibilidades, como elementos de casca e membranas, elementos de vigas e treliças, corpos rígidos, e outros casos para aplicações em propósitos especiais (FIGURA 22). A adequada seleção do tipo de elemento é fundamental para a correta análise. Segundo Burchitz (2008), elementos do tipo casca são comumente usados em conformação de chapas devido à maior rapidez computacional que ele garante. Cada elemento no ABAQUS tem um nome único, relacionado à sua família e forma. Para a maioria dos processos que sofrem grandes tensões, são exemplos de elementos apropriados:

- S4R: Elemento quadrilateral de propósito genérico. Seu nome representa, além da designação de casca (S, do inglês, *shell*), o fato de possuir quatro nós por elemento, e também aponta o modo de integração (reduzida).
- S3R: Pode apresentar trava de cisalhamento, mas não é muito preciso em curvas.
- SAX1: Elemento de casca assimétrica com dois nós e três graus de liberdade por nó.

FIGURA 22 - FAMÍLIAS DE ELEMENTOS COMUMENTE USADOS EM SIMULAÇÃO



FONTE: ABAQUS (2009).

2.5.3. Descrição de contato

No ABAQUS, as descrições de contato entre superfícies são idealizadas a partir do modelo mestre-escravo para a criação de condições de contorno. Nele, os nós definidos como escravos são restringidos a não penetrar na superfície mestra. Em simulação de conformação de chapas, segundo Atzema (1994), isso significa que o material não pode penetrar na ferramenta, e havendo contato, a folga entre material e a ferramenta deve ser zero. Em caso de não contato, não deve haver forças de contato atuando entre a chapa e a ferramenta.

3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

A metodologia apresentada a seguir tem o objetivo de investigar experimentalmente e computacionalmente a influência da temperatura no retorno elástico e nos limites de conformação de dois diferentes aços. O fluxograma ilustrado na

FIGURA 23 representa esquematicamente as principais etapas do trabalho.

A primeira parte (seção 3.2) se propõe a apresentar e definir os materiais selecionados para o estudo.

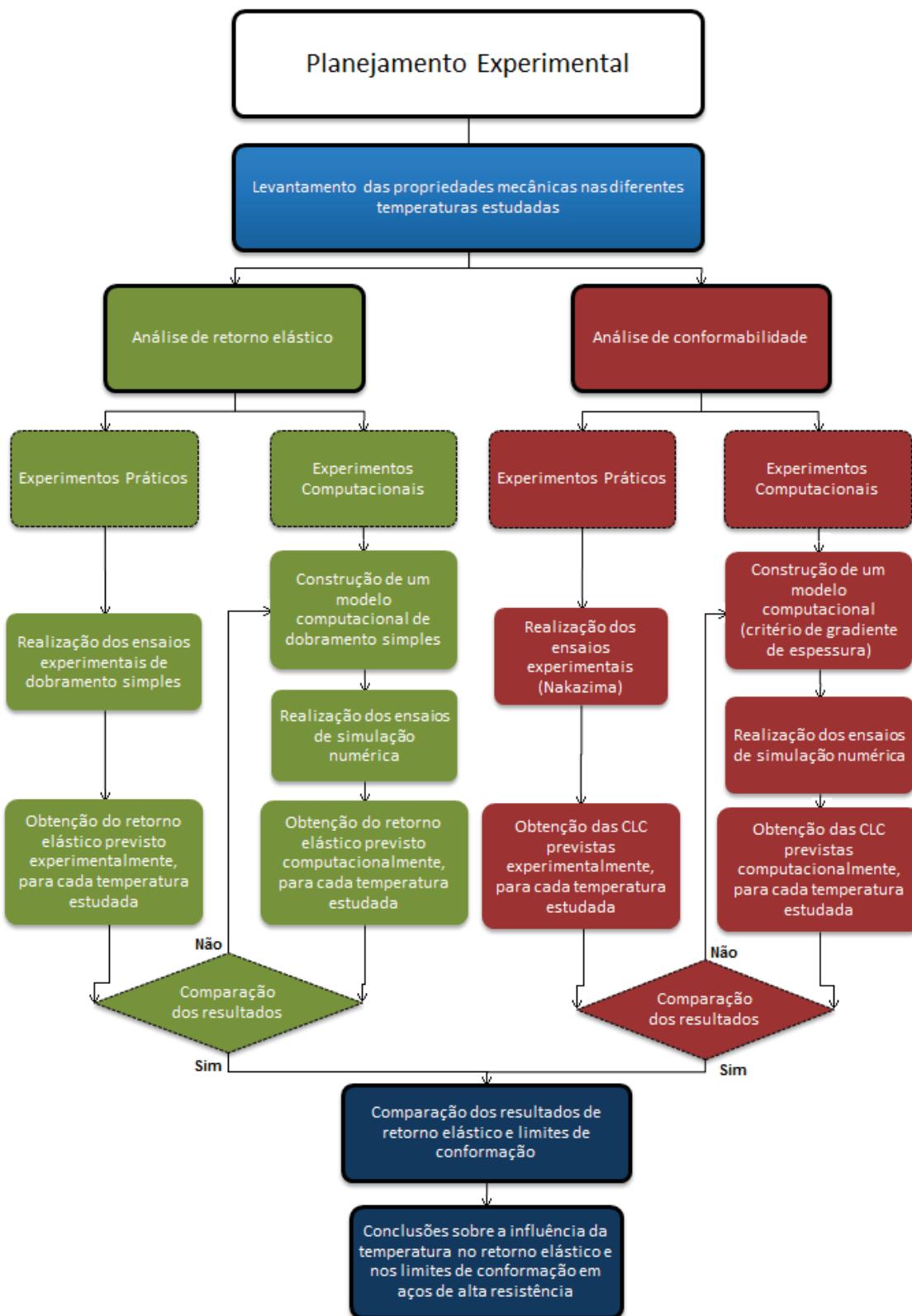
Na seção 3.3 são apresentadas as temperaturas definidas para os ensaios, e também é indicado o modo de aquecimento das chapas metálicas utilizadas nos ensaios práticos.

A seção seguinte (3.4) apresenta a estratégia para levantamento das propriedades mecânicas dos materiais nas diferentes temperaturas estudadas.

Os procedimentos para análise dos limites de conformação são descritos na seção 3.5, enquanto que os procedimentos para análise de retorno elástico estão representados na seção seguinte.

No total, foram realizados 44 ensaios, conforme TABELA 3. Considerando o número de amostras para cada ensaio de limite de conformação (8 para cada caso estudado), e a repetibilidade adotada nos ensaios práticos de dobramento simples, foram gerados e analisados 136 resultados.

FIGURA 23 – FLUXOGRAMA DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2015).

TABELA 3 – ENSAIOS REALIZADOS NO PRESENTE ESTUDO

Ensaio	Temperatura (°C)	Material	Método	Raio de Dobra ((mm))	Repetibilidade
E1	30	HSLA 350/450	Ensaio de tração uniaxial	-	-
E2	400	HSLA 350/450	Ensaio de tração uniaxial	-	-
E3	600	HSLA 350/450	Ensaio de tração uniaxial	-	-
E4	800	HSLA 350/450	Ensaio de tração uniaxial	-	-
E5	30	DP 350/600	Ensaio de tração uniaxial	-	-
E6	400	DP 350/600	Ensaio de tração uniaxial	-	-
E7	600	DP 350/600	Ensaio de tração uniaxial	-	-
E8	800	DP 350/600	Ensaio de tração uniaxial	-	-
E9	Ambiente	HSLA 350/450	Nakazima (prático)	-	-
E10	Em torno de 400	HSLA 350/450	Nakazima (prático)	-	-
E11	Ambiente	DP 350/600	Nakazima (prático)	-	-
E12	Em torno de 400	DP 350/600	Nakazima (prático)	-	-
E13	30	HSLA 350/450	CGE* (computacional)	-	-
E14	400	HSLA 350/450	CGE* (computacional)	-	-
E15	600	HSLA 350/450	CGE* (computacional)	-	-
E16	800	HSLA 350/450	CGE* (computacional)	-	-
E17	30	DP 350/600	CGE* (computacional)	-	-
E18	400	DP 350/600	CGE* (computacional)	-	-
E19	600	DP 350/600	CGE* (computacional)	-	-
E20	800	DP 350/600	CGE* (computacional)	-	-
E21	Ambiente	HSLA 350/450	Dobramento (prático)	10	2
E22	Ambiente	HSLA 350/450	Dobramento (prático)	20	2
E23	Ambiente	DP 350/600	Dobramento (prático)	10	2
E24	Ambiente	DP 350/600	Dobramento (prático)	20	2
E25	Em torno de 400	HSLA 350/450	Dobramento (prático)	10	2
E26	Em torno de 400	HSLA 350/450	Dobramento (prático)	20	2
E27	Em torno de 400	DP 350/600	Dobramento (prático)	10	2
E28	Em torno de 400	DP 350/600	Dobramento (prático)	20	2
E29	30	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	10	-
E30	30	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	20	-
E31	30	DP 350/600	Dobramento (computacional)	10	-
E32	30	DP 350/600	Dobramento (computacional)	20	-
E33	400	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	10	-
E34	400	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	20	-
E35	400	DP 350/600	Dobramento (computacional)	10	-
E36	400	DP 350/600	Dobramento (computacional)	20	-
E37	600	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	10	-
E38	600	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	20	-
E39	600	DP 350/600	Dobramento (computacional)	10	-
E40	600	DP 350/600	Dobramento (computacional)	20	-
E41	800	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	10	-
E42	800	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	20	-
E43	800	DP 350/600	Dobramento (computacional)	10	-
E44	800	DP 350/600	Dobramento (computacional)	20	-

FONTE: O autor (2015).

*Critério de Gradiente de Espessura (subitem 3.5.2.1)

3.2. MATERIAIS ENSAIADOS

Dois aços de alta resistência foram utilizados nos experimentos práticos e computacionais, sendo um aço convencional de alta resistência (HSLA350/450) e um aço avançado de alta resistência (DP350/600). Para representação dos materiais utilizados nos experimentos práticos foram utilizadas as propriedades mecânicas mensuradas por Tigrinho (2011), Chemin Filho (2011) e Lajarin (2012), que conduziram ensaios mecânicos nestes materiais. Na TABELA 5 e na TABELA 6 estão descritas algumas propriedades mecânicas para os aços HSLA 350/450 e DP 350/600.

As composições químicas, obtidas dos catálogos dos fornecedores, são mostradas na TABELA 4, sendo que estão representados somente os elementos químicos que os fornecedores indicaram algum teor (diferente de zero).

TABELA 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS HSLA350/450 E DP350/600

Material	C	Si	Mn
HSLA 350/450	0,14	0,40	2,10
DP 350/600	0,08	0,03	0,60

FONTE: O autor (2015).

TABELA 5 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS HSLA350/450 E DP350/600

Material	Espessura (mm)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de resistência máxima (MPa)	Along. Unif. (%)	Along. Total (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
HSLA 350/450	1,50	356	449	14,8	20,8	206
DP 350/600	1,57	395	620	14,9	20,0	206

FONTE: O autor (2015).

TABELA 6 – COEFICIENTES DE ENCRUAMENTO E COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA DOS AÇOS HSLA350/450 E DP350/600

Material	n_0	n_{45}	n_{90}	$n_{médio}$
HSLA 350/450	0,147	0,133	0,135	0,138
DP 350/600	0,150	0,145	0,153	0,149
	K_0	K_{45}	K_{90}	$K_{médio}$
HSLA 350/450	698	656	679	678
DP 350/600	957	965	978	967

FONTE: Lajarin (2012).

3.3. TEMPERATURAS ENSAIADAS

Para os ensaios de limites de conformação descritos na seção 3.5, e para os ensaios de retorno elástico descritos na seção 3.6, foi utilizado um forno elétrico da marca BRAVAC, modelo S-85, com potência de 3000 W (FIGURA 24).

FIGURA 24 – FORNO PARA AQUECIMENTO DAS AMOSTRAS



FONTE: REBEYKA (2014).

Os níveis de temperatura foram escolhidos com base na revisão bibliográfica (seções 2.3.3 e 2.4.3), com o intuito de permitir o estudo experimental para análise da influência da temperatura nos limites de conformação e no retorno elástico dos materiais selecionados (TABELA 7).

TABELA 7 – TEMPERATURAS DOS ENSAIOS

Temperatura (°C)
30
400
600
800

FONTE: O autor (2015).

3.4. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS NAS DIFERENTES TEMPERATURAS ENSAIADAS

Os materiais selecionados para estudo foram caracterizados no Laboratório de Conformação Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, sob supervisão do Professor Dr. Sérgio Tonini Button, responsável pelo laboratório.

Foram realizados ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura para os dois materiais utilizados no estudo, nas quatro temperaturas selecionadas, em três diferentes direções de laminação (0° , 45° e 90°). O objetivo foi levantar as curvas tensão-deformação de cada condição, a fim de obter propriedades mecânicas que foram utilizadas para alimentar os modelos computacionais descritos nas seções 3.5.2 e 3.6.2.

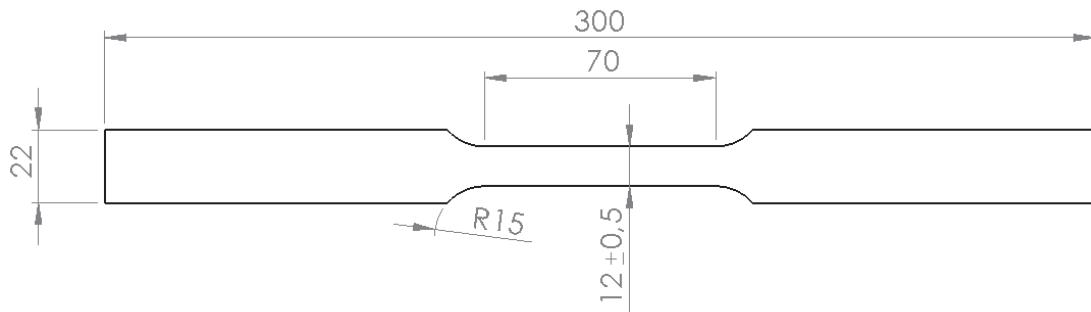
Os corpos de prova seguem padrão de ensaio (FIGURA 25). Foram realizadas curvas de aquecimento de acordo com a FIGURA 26, com forno acoplado à amostra, mantendo as temperaturas constantes durante o ensaio.

Para as temperaturas de 30°C , 400°C e 600°C , os corpos de prova foram aquecidos até a temperatura de ensaio e homogeneizados por dez minutos. A seguir, executou-se teste de tração com taxa de deformação de $0,1\%/\text{s}$.

Para a temperatura de 800°C , o corpo de prova foi aquecido até 950°C , homogeneizado por dez minutos, e resfriado até 800°C . A seguir, executaram-se os testes de tração com taxa de deformação $0,1\%/\text{s}$.

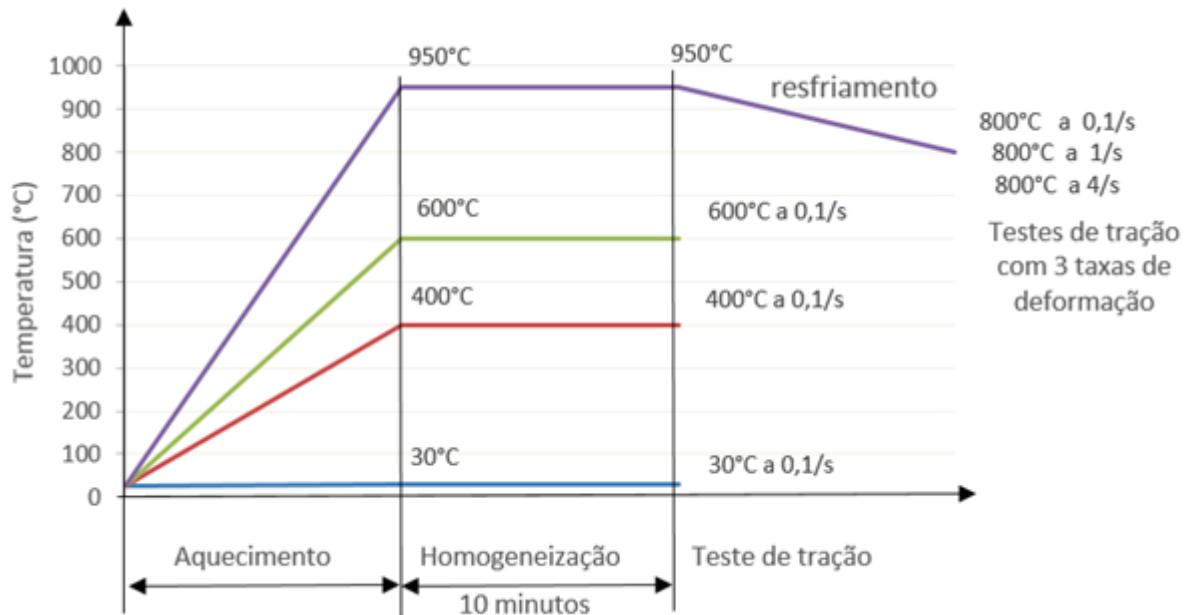
O planejamento experimental desta etapa se subdivide em 24 etapas, que estão demonstradas nas TABELA 8 e TABELA 9.

FIGURA 25 – CORPO DE PROVA PARA LEVANTAMENTO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.



FONTE: REBEYKA (2014).

FIGURA 26 – CURVAS DE AQUECIMENTO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO.



FONTE: REBEYKA (2014).

TABELA 8 – TABELA DE PARÂMETROS PARA TESTE DE TRAÇÃO DO MATERIAL HSLA350/450
(ESPESSURA DE 1,4 MM)

Número do teste	Direção (º)	Temperatura do ensaio (ºC)	Taxa de deformação (/s)
1	0	30	0,1
2	45		
3	90		
4	0	400	0,1
5	45		
6	90		
7	0	600	0,1
8	45		
9	90		
10	0	800	0,1
11	45		
12	90		

FONTE: REBEYKA (2014).

TABELA 9 – TABELA DE PARÂMETROS PARA TESTE DE TRAÇÃO DO MATERIAL DP350/600
(ESPESSURA DE 1,5 MM)

Número do teste	Direção (º)	Temperatura do ensaio (ºC)	Taxa de deformação (/s)
13	0	30	0,1
14	45		
15	90		
16	0	400	0,1
17	45		
18	90		
19	0	600	0,1
20	45		
21	90		
22	0	800	0,1
23	45		
24	90		

FONTE: REBEYKA (2014).

3.5. ANÁLISE DOS LIMITES DE CONFORMAÇÃO

Para análise dos limites de conformação, foram realizados ensaios utilizando os recursos do Laboratório de Conformação da Universidade Federal do Paraná.

Foram realizados 12 ensaios, variando-se o material e as temperaturas utilizadas, tanto para aplicação prática como computacional, conforme TABELA 10.

O objetivo é comparar os ensaios práticos e computacionais.

TABELA 10 – ARRANJO EXPERIMENTAL PARA OS ENSAIOS DE ANÁLISE DE LIMITES DE CONFORMAÇÃO

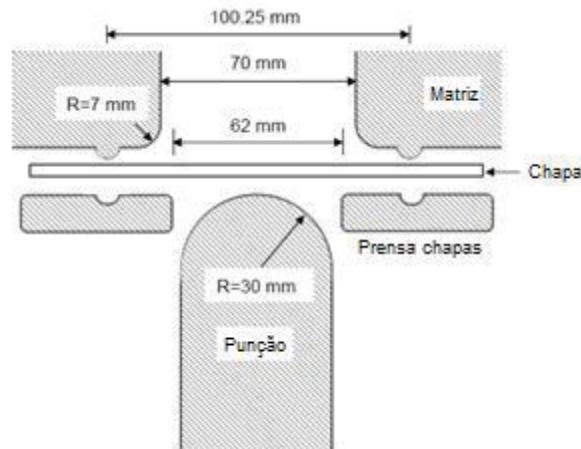
Ensaio	Temperatura (°C)	Material	Método
E9	Ambiente	HSLA 350/450	Nakazima (prático)
E10	Em torno de 400	HSLA 350/450	Nakazima (prático)
E11	Ambiente	DP 350/600	Nakazima (prático)
E12	Em torno de 400	DP 350/600	Nakazima (prático)
E13	30	HSLA 350/450	CGE (computacional)
E14	400	HSLA 350/450	CGE (computacional)
E15	600	HSLA 350/450	CGE (computacional)
E16	800	HSLA 350/450	CGE (computacional)
E17	30	DP 350/600	CGE (computacional)
E18	400	DP 350/600	CGE (computacional)
E19	600	DP 350/600	CGE (computacional)
E20	800	DP 350/600	CGE (computacional)

FONTE: O autor (2015).

3.5.1. Experimentos práticos (método de Nakazima)

Os experimentos práticos para levantamento da CLC dos dois materiais estudados foi desenvolvido com o uso do ferramental desenvolvido por Gipiela (2012), com base em estudos anteriores realizados por Nikhare *et al* (2008) (FIGURA 27).

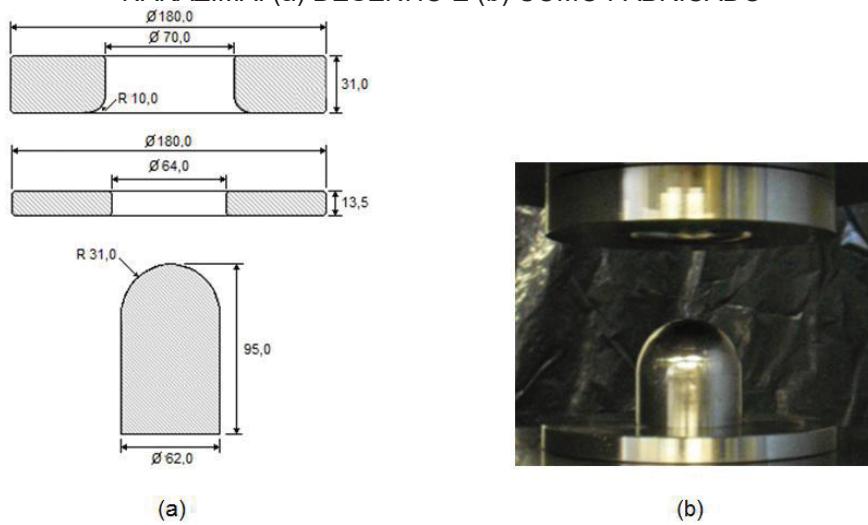
FIGURA 27 – FERRAMENTAL UTILIZADO EM TRABALHO DE NIKHARE *et al* (2008).



FONTE: NIKHARE *et al.* (2008).

Devido a algumas adaptações referentes à capacidade de carga da prensa hidráulica e possibilidade de montagem de ferramental alternativo, o ferramental fabricado é conforme a FIGURA 28. Outra vista da prensa hidráulica com o ferramental montado pode ser visualizada na figura seguinte.

FIGURA 28 - FERRAMENTAL DESENVOLVIDO PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE NAKAZIMA: (a) DESENHO E (b) COMO FABRICADO



FONTE: GIPIELA (2012)

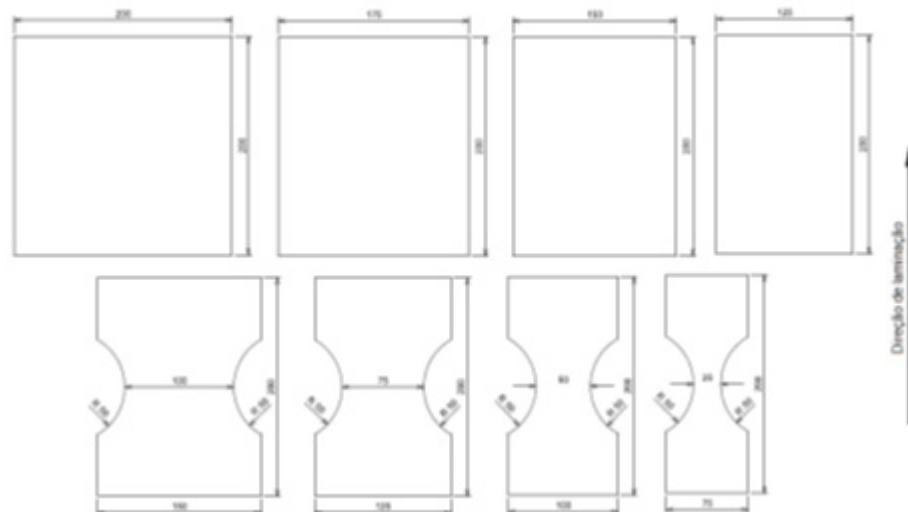
FIGURA 29 – PRENSA HIDRÁULICA PARA OS EXPERIMENTOS PRÁTICOS



FONTE: GIPIELA (2012)

Para levantar as CLC's, foram confeccionados corpos de prova (um conjunto para cada caso estudado) baseados no ensaio reduzido de Nakazima com somente oito geometrias diferentes, conforme Chemin (2011) utilizou para, em seu estudo, levantar a CLC para aço DP 350/600 (FIGURA 30).

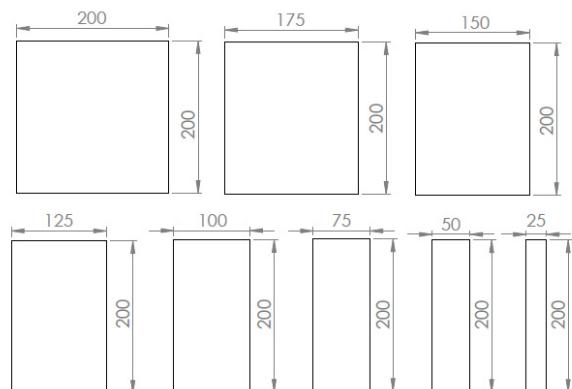
FIGURA 30 – CP'S UTILIZADOS POR CHEMIN (2011) PARA O LEVANTAMENTO DA CLC DO AÇO DP 350/600



FONTE: CHEMIN (2011).

No entanto, para serem equivalentes aos ensaios computacionais (descritos na seção 3.5.2.), foram realizadas adaptações impostas pelo Critério de Gradiente de Espessura (descrito no subitem 3.5.2.1.). As geometrias do conjunto de corpos de prova utilizados estão representadas na FIGURA 31.

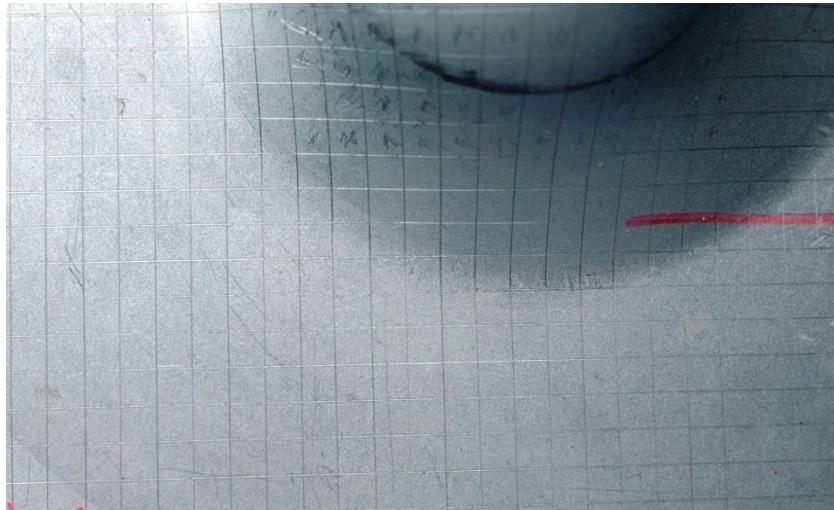
FIGURA 31 – CP'S ADAPTADOS PARA O LEVANTAMENTO DAS CLC'S NO PRESENTE ESTUDO
(MEDIDAS REPRESENTADAS EM mm)



FONTE: O autor (2015).

Para avaliação dos limites de conformação, foram realizadas impressões de malhas quadradas (4 mm por 4 mm) nas amostras, empregando-se técnica de riscamento, com equipamento disponível no Laboratório de Metrologia da UFPR (traçador de altura). A técnica de impressão eletroquímica, recomendada por Netto (2004), foi descartada devido à degradação que a malha sofreria em elevadas temperaturas.

FIGURA 32 – EXEMPLO DE MALHA RISCADA IMPRESSA EM UMA DAS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2016).

As temperaturas atingidas durante os ensaios, bem como os parâmetros de força de prensa chapas e taxa de deformação, para cada um dos quatro conjuntos utilizados (cada conjunto contendo oito geometrias diferentes), estão indicados na TABELA 11.

A metodologia utilizada para os ensaios a quente consistiu dos seguintes passos:

- 1) Inserção da amostra em forno.
- 2) Retirada da amostra do forno após atingir temperatura de 600°C.
- 3) Posicionamento da amostra na ferramenta de ensaio.
- 4) Acionamento do punção. Neste passo, foi registrada temperatura encontrada na chapa, com a utilização de um termopar, denominada “temperatura inicial”.
- 5) Parada do punção, após registrado o início da estrição, a partir da observação da diminuição das forças envolvidas no processo (com o auxílio de sistema supervisório). Neste momento, foi registrada a temperatura da chapa, denominada “temperatura final”.

TABELA 11 – PARÂMETROS UTILIZADOS DURANTE OS ENSAIOS NAKAZIMA

Identificação	Aço	Geometria (mm)	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Força de prensa chapas (bar)	Taxa de deformação (mm/s)
E9-1	HSLA 350/450	200x200	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E9-2	HSLA 350/450	200x175	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E9-3	HSLA 350/450	200x150	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E9-4	HSLA 350/450	200x125	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E9-5	HSLA 350/450	200x100	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E9-6	HSLA 350/450	200x75	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E9-7	HSLA 350/450	200x50	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E9-8	HSLA 350/450	200x25	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E10-1	HSLA 350/450	200x200	430	300	120	1,107
E10-2	HSLA 350/450	200x175	420	245	120	1,107
E10-3	HSLA 350/450	200x150	385	230	120	1,107
E10-4	HSLA 350/450	200x125	400	270	120	1,107
E10-5	HSLA 350/450	200x100	430	265	120	1,107
E10-6	HSLA 350/450	200x75	385	225	120	1,107
E10-7	HSLA 350/450	200x50	400	200	120	1,107
E10-8	HSLA 350/450	200x25	395	220	120	1,107
E11-1	DP 350/600	200x200	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E11-2	DP 350/600	200x175	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E11-3	DP 350/600	200x150	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E11-4	DP 350/600	200x125	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E11-5	DP 350/600	200x100	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E11-6	DP 350/600	200x75	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E11-7	DP 350/600	200x50	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E11-8	DP 350/600	200x25	Ambiente	Ambiente	120	1,107
E12-1	DP 350/600	200x200	410	285	120	1,107
E12-2	DP 350/600	200x175	370	270	120	1,107
E12-3	DP 350/600	200x150	410	280	120	1,107
E12-4	DP 350/600	200x125	430	320	120	1,107
E12-5	DP 350/600	200x100	400	275	120	1,107
E12-6	DP 350/600	200x75	430	310	120	1,107
E12-7	DP 350/600	200x50	420	235	120	1,107
E12-8	DP 350/600	200x25	390	265	120	1,107

FONTE: O autor (2015).

Foram, portanto, gerados 32 corpos de provas para a realização da parte experimental dos ensaios para levantamento de Curvas Limite de Conformação (FIGURA 33), sendo 8 geometrias para cada casa estudado.

Os parâmetros força de prensa-chapas e taxa de deformação foram fixados em 120 bar e 1,107 mm/s, respectivamente.

FIGURA 33 – CONJUNTO DE CORPOS DE PROVAS GERADOS PARA LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL DAS CLC



FONTE: O autor (2016).

Após a realização dos ensaios, os eixos maior e menor dos quadriláteros formados na malha impressa dos corpos de prova deformados foram medidos com o auxílio de um paquímetro, conforme representação da FIGURA 34. Na FIGURA 35 é possível visualizar um exemplo em detalhe de uma região de malha medida em umas das 32 amostras.

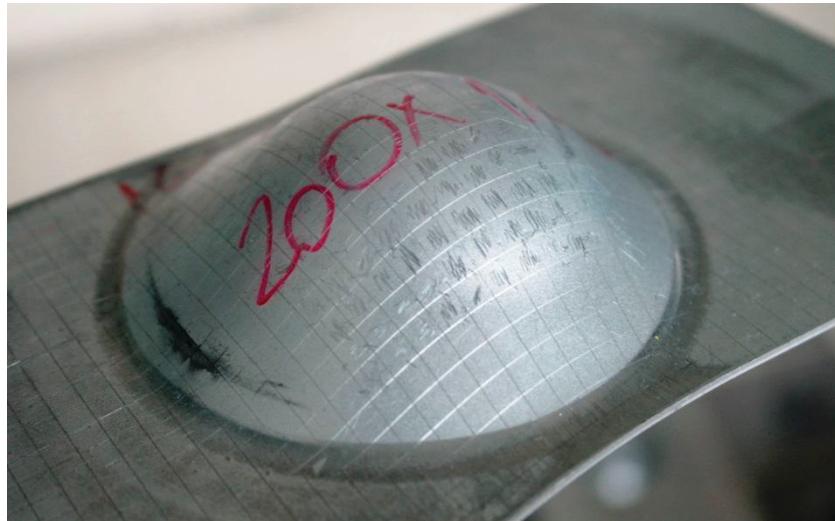
FIGURA 34 – EXEMPLO DE QUADRILÁTERO COM SEUS EIXOS MAIOR E MENOR, COM OS PONTOS DE MEDIDA ADOTADOS.

3,92 mm



FONTE: O autor (2015).

FIGURA 35 – DETALHE DE REGIÃO MEDIDA EM UMA DAS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2016).

A partir dos valores obtidos dos eixos maior e menor de cada quadrilátero medido, para cada corpo de prova, nos dois níveis de temperatura ensaiados, foram definidas quatro CLC (experimentos E9 a E12, conforme TABELA 10).

Os pontos definidos para a construção das CLC são obtidos a partir da seguinte forma:

- 1) O valor medido em cada elemento de malha é subtraído do valor inicial, aquele verificado antes da deformação (no caso do presente estudo, 4 mm nos dois eixos de medição).
- 2) A diferença entre os dois valores é dividida agora pelo valor inicial, ou seja, neste passo é obtida a deformação relativa sofrida pelo elemento de malha, em cada um dos dois eixos.
- 3) Da deformação relativa, são subtraídos 10% deste mesmo valor. Este passo é utilizado a fim de criar uma margem segura que dissipe possíveis erros advindos de incorreta previsão da estrição quando da parada do punção durante a operação de estampagem com ferramenta de Nakazima.

Do exemplo da FIGURA 34, os valores plotados seriam, portanto, 0,1305 para a deformação maior, e -0,018 para a deformação menor (este ponto se encontraria no segundo quadrante do DLC).

Foram medidos todos os quadriláteros, em cada um dos corpos de prova gerados, que apresentaram deformação aparentemente significativa imposta pelo punção, conforme exemplo da FIGURA 35. Com este método, torna-se possível,

também, visualizar e analisar os caminhos de deformação (conforme descrito na seção referente aos resultados).

3.5.2. Modelo computacional

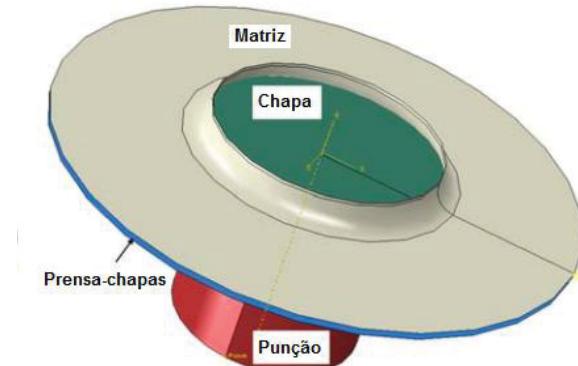
Por meio do software ABAQUS, o ensaio para levantamento das CLC's foi investigado com um modelo tridimensional aproximado, segundo estudos de Nikhare (2012) e Gipielia (2014). Os corpos que compõe a ferramenta de estampagem do modelo (matriz, punção e prensa-chapa) foram considerados como corpos rígidos não deformáveis. A chapa metálica é o único corpo deformável, com utilização do elemento de casca S4R constituindo a malha de elementos finitos.

As espessuras das chapas medida experimentalmente ($1,4\text{ mm}$ para o aço HSLA350/450 e $1,5\text{ mm}$ para o aço DP350/600) foram detalhadas no modelo. Para a definição das propriedades mecânicas dos materiais, foram utilizadas as curvas tensão-deformação levantadas para cada temperatura definida para o estudo (FIGURA 42 e FIGURA 45). O critério de escoamento utilizado foi o de *von-Mises*.

Aproveitando-se da relação axissimétrica do problema, apenas um quarto das chapas foi ensaiado, a fim de reduzir o tempo computacional.

Os parâmetros utilizados nos ensaios experimentais, como força de prensa-chapas e velocidade de deformação foram reproduzidos nas simulações.

FIGURA 36 – MODELO DE ESTAMPAGEM CONSTRUÍDO PARA LEVANTAMENTO COMPUTACIONAL DAS CLC



FONTE: Adaptado de NIKHARE (2012).

A estrição foi prevista conforme critério de gradiente de espessura, detalhado no subitem seguinte.

O objetivo foi obter, via simulação numérica, além das CLC's obtidas no método experimental descrito no item 3.5.1, também curvas para as temperaturas 600°C e 800°C. São os ensaios E13 a E20, descritos na TABELA 10.

3.5.2.1. Critério de gradiente de espessura (CGE)

Para prever os limites de conformação da simulação, este trabalho seguiu o critério de gradiente de espessura (NIKHARE, 2012; GIPIELA, 2014). Uma estrição localizada é reconhecida pela presença de um gradiente de espessura local crítico na chapa metálica durante o processo de conformação. Este tipo de estrição localizada é independente do caminho de deformação, velocidade de estampagem e o tipo de material utilizado na chapa (isto é, as propriedades mecânicas do material) que está sendo estampado. No início de uma estrição local visível ocorre o aparecimento do gradiente crítico local de espessura ($R_{crítico}$). Durante a deformação, um gradiente de espessura, $R_{gradiente\ de\ espessura}$, se desenvolve na chapa através da seguinte expressão:

$$R_{gradiente\ de\ espessura} = \frac{\text{Espessura\ atual\ do\ elemento\ estriacionado}}{\text{Espessura\ atual\ do\ elemento\ vizinho}} \quad (3)$$

Este gradiente de espessura mantém-se reduzido a partir do valor inicial de espessura durante a operação de estampagem. No início da estrição localizada, o gradiente de espessura torna-se mais acentuado. Portanto, um valor crítico é atingido nesta transição até a estrição difusa. O critério está representado na Equação 4.

O valor crítico (0,92) foi adotado conforme estudos experimentais e computacionais de Nikhare (2012), e será avaliado também neste estudo.

$$R_{gradiente\ de\ espessura} \leq R_{crítico} = 0,92 \quad (4)$$

Para cálculo do gradiente de espessura local para todos os elementos de cada geometria de corpo de prova ensaiado (conforme TABELA 12), foi

desenvolvida uma planilha dinâmica, para cada geometria, que calcula, para cada elemento, sua relação de espessura com cada um de seus vizinhos, conforme ilustrado em esquema representativo em FIGURA 37 e FIGURA 38.

TABELA 12 – NÚMERO DE ELEMENTOS PARA CADA GEOMETRIA DO CONJUNTO NAKAZIMA REDUZIDO

Corpo de Prova	Geometria (mm)	Número de Elementos
1	200 x 200	2500
2	200 x 175	2200
3	200 x 150	1900
4	200 x 125	1550
5	200 x 100	1250
6	200 x 75	950
7	200 x 50	650
8	200 x 25	300

FONTE: O autor (2015).

FIGURA 37 – REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DA RELAÇÃO ENTRE CADA ELEMENTO DA MALHA COM CADA UM DE SEUS VIZINHOS (PARA ELEMENTO INTERNO)



FONTE: O autor (2015).

Como exemplo, se tomássemos a ilustração da FIGURA 37 como sendo uma das chapas metálicas estudadas, e considerando, de forma simplificada, que esta chapa foi subdividida em nove elementos, cada um desses elementos seria tomado como referência, vez por vez. No caso de estarmos analisando o elemento central, como destacado na ilustração, sua espessura seria comparada a cada incremento da operação computacional de estampagem, com a espessura de seus oito vizinhos.

Se em uma destas comparações a relação entre as espessuras fosse inferior a 92%, seria considerado que durante este incremento da operação ocorreu o fenômeno da estrição, sendo tomados, então, os valores de deformação maior e menor neste tempo de operação. A partir destes seria construída a CLC.

Quando o elemento de referência se encontra nas bordas da chapa, como representado na FIGURA 38, considera-se, para este caso, a existência de apenas três vizinhos. No caso de o elemento de referência ser o próximo a direita do representado, por exemplo, cinco.

FIGURA 38 – REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DA RELAÇÃO ENTRE CADA ELEMENTO DA MALHA COM CADA UM DE SEUS VIZINHOS (PARA ELEMENTO EXTERNO)

Elemento de Referência	Vizinho 5	
Vizinho 7	Vizinho 8	

FONTE: O autor (2015).

Exemplos de planilhas dinâmicas desenvolvidas com o auxílio do software *Microsoft Office Excel 2007* estão representadas em FIGURA 39 e FIGURA 40. Na coluna B da planilha são inseridos os valores de deformação na direção da espessura oriundos de cada incremento de simulação desenvolvida no software *Abaqus*. Na coluna A fica representado o número de cada elemento analisado. Na coluna C é calculada a espessura atual de cada elemento (espessura original da chapa menos a deformação). Nas colunas de D a K são verificadas a espessura atual de cada um dos vizinhos do elemento, conforme configuração baseada na geometria do problema. Nas colunas de L a S são calculados os gradientes de espessura. Quando um destes gradientes de espessura (no número de vinte mil para o caso da maior chapa) atinge qualquer valor menor que 0,92, ocorre indicação visual, conforme verificado na FIGURA 40.

FIGURA 39 – EXEMPLO DE PLANILHA DINÂMICA UTILIZADA PARA CÁLCULO DE GRADIENTE DE ESPESSURA (PRIMEIROS ELEMENTOS).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1		PE PE33																	
2		@Loc 2																	
3																			
4																			
5	1	-7,31E-06	1,40E+00	0	0	0	0	1,339937	0	1,33993	1,33995	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	1	1	1	1
6	2	-2,67E-05	1,40E+00	0	0	0	1,33993	1,3399376	1,33993	1,33993	1,33995	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	1	1	1	1
7	3	-2,36E-05	1,40E+00	0	0	0	1,33997	1,3399368	1,33993	1,33993	1,40001	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	1	1	1	1
8	4	-3,21E-05	1,40E+00	0	0	0	1,33998	1,3399388	1,33993	1,40001	1,40001	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	1	1	1	1
9	5	-1,21E-05	1,40E+00	0	0	0	1,33997	1,339937	1,40001	1,40001	1,40003	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	1	1	1	1
10	6	-2,72E-06	1,40E+00	0	0	0	1,33993	1,40003	1,40001	1,40003	1,40008	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	1	1	1	1
11	7	3,00E-05	1,40E+00	0	0	0	1,4	1,400068	1,40003	1,4001	1,40022	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	1	1	1	0,9399
12	8	6,76E-05	1,40E+00	0	0	0	1,40003	1,400132	1,40006	1,40011	1,40015	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	1	1	1	0,9399
13	9	1,32E-04	1,40E+00	0	0	0	1,40007	1,4002	1,40011	1,40015	1,40022	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	1	1	1	0,9399
14	10	2,00E-04	1,40E+00	0	0	0	1,40013	1,400279	1,40015	1,40022	1,40023	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0,9399	1	1	0,9399
15	11	2,73E-04	1,40E+00	0	0	0	1,4002	1,400363	1,40017	1,40022	1,40037	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1	1	0,9399
16	12	3,63E-04	1,40E+00	0	0	0	1,40028	1,40047	1,40029	1,40037	1,40046	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1	0,9399
17	13	4,70E-04	1,40E+00	0	0	0	1,40036	1,400572	1,4004	1,40044	1,40056	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1	0,9399
18	14	5,72E-04	1,40E+00	0	0	0	1,40047	1,400673	1,40046	1,40055	1,40065	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1	0,9399
19	15	6,73E-04	1,40E+00	0	0	0	1,40057	1,400781	1,40056	1,40065	1,40074	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1	1
20	16	7,81E-04	1,40E+00	0	0	0	1,40067	1,400873	1,40065	1,40074	1,40083	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1	1
21	17	8,79E-04	1,40E+00	0	0	0	1,40078	1,400875	1,40074	1,40083	1,40093	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1	1
22	18	9,75E-04	1,40E+00	0	0	0	1,40088	1,401087	1,40083	1,40093	1,40103	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1	1
23	19	1,09E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40098	1,401197	1,40093	1,40103	1,40119	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1	1
24	20	1,20E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40109	1,401308	1,40103	1,40113	1,40123	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1	1
25	21	1,31E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40124	1,401421	1,40113	1,40123	1,40134	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1,0001	1
26	22	1,42E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40131	1,401527	1,40123	1,4013	1,40145	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1,0001	1
27	23	1,53E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40142	1,40165	1,40134	1,40145	1,40157	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1,0001	1
28	24	1,65E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40153	1,401749	1,40145	1,40157	1,40166	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1,0001	1
29	25	1,75E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40165	1,401851	1,40157	1,40166	1,40174	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1,0001	1
30	26	1,85E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40175	1,401944	1,40166	1,40174	1,40188	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1,0001	1
31	27	1,94E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40185	1,402051	1,40174	1,40188	1,40195	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1	1
32	28	2,05E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40194	1,402217	1,40188	1,40195	1,40205	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1,0001	1
33	29	2,22E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40205	1,40212	1,40195	1,40205	1,40231	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0002	1,0001	0,9399
34	30	2,21E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40222	1,40233	1,40205	1,40231	1,40215	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1,0001	0,9399
35	31	2,33E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40221	1,402426	1,40231	1,40215	1,40224	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0001	1,0001	0,9399
36	32	2,43E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40233	1,40263	1,40215	1,40224	1,40258	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9399	1,0002	1,0001	0,9399
37	33	2,06E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40243	1,40226	1,40215	1,40224	1,40258	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0,9997	0,9399	0,9399	0,9399	0,9399
38	34	2,23E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40206	1,402231	1,40258	1,40223	1,40191	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9397	1	1,0002	0,9398
39	35	2,23E-03	1,40E+00	0	0	0	1,40223	1,402468	1,40216	1,40191	1,40105	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1,0001	0,9398	1	1,0002	0,9398

FONTE: O autor (2015).

FIGURA 40 – EXEMPLO DE PLANILHA DINÂMICA UTILIZADA PARA CÁLCULO DE GRADIENTE DE ESPESSURA (ALGUNS ELEMENTOS EM QUE HOUVE ESTRICÇÃO, SEGUNDO O CRITÉRIO)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
2078	2074	-9,07E-03	1,49032E+00	1,49266082	1,4913	1,489794	1,4923	1,48932	1,49195	1,4887	1,48988	0,9988	0,9997	1,0008	0,9991	1,0011	0,9993	1,0003	1,0015	7,52E-04	-6,37E-04
2079	2075	-1,08E-02	1,48922E+00	1,49136444	1,4893	1,4880201	1,4909	1,4873	1,4905	1,4867	1,4867	0,9986	0,9996	1,0008	0,9989	1,0013	0,9992	1,0003	1,0017	3,49E-03	-8,23E-04
2080	2076	-1,27E-02	1,487268E+00	1,4897364	1,4884	1,4860377	1,4892	1,4848	1,4867	1,4867	1,4863	0,9983	0,9995	1,0008	0,9987	1,0017	0,9991	1,0004	1,0024	5,6E-04	-4,36E-04
2081	2077	-1,52E-02	1,484790E+00	1,48980201	1,4884	1,4823239	1,4873	1,4837	1,4867	1,4837	1,4898	0,9978	0,9992	1,0018	0,9983	1,0003	0,9987	1,0007	0,9978	-1,72E-04	-9,00E-04
2082	2078	-1,63E-02	1,483682E+00	1,48963077	1,48829	1,4859565	1,4848	1,4857	1,4867	1,4867	1,4871	0,9984	0,9994	1,0005	0,9981	1,0003	0,9993	1,0001	0,9971	8,04E-04	-5,21E-04
2083	2079	9,74E-03	1,509373E+00	1,489239	1,4884	1,480503	1,4837	1,4837	1,4867	1,4867	1,4861	0,9981	0,9992	1,0029	0,9982	1,0003	0,9993	1,0001	0,9971	9,14E-04	-2,35E-04
2084	2080	2,65E-02	1,526451E+00	1,4959665	1,5205	1,5180032	1,5097	1,5141	1,5161	1,5237	1,5062	1,0204	1,0039	1,0058	1,0077	1,0082	1,0068	1,0018	1,0134	9,14E-04	-2,35E-04
2085	2081	1,41E-02	1,514059E+00	1,5205038	1,5265	1,4957	1,5237	1,5062	1,4808	1,4958	1,4974	0,9974	1,0063	0,9991	1,0123	0,9936	1,0052	1,0226	-2,16E-04	-1,16E-03	
2086	2082	-4,32E-03	1,495677E+00	1,5180032	1,5046	1,477718	1,5141	1,4577	1,5062	1,4808	1,4461	0,9853	0,9984	1,0239	1,0073	1,026	1,026	1,0302	1,0343	3,53E-03	-1,50E-04
2087	2083	-4,23E-03	1,457745E+00	1,50463395	1,4777	1,453000	1,4957	1,4382	1,4608	1,4461	1,436	0,9868	0,9965	1,0286	1,0186	1,0348	1,0348	1,0226	1,023	2,25E-03	-2,26E-03
2088	2084	-6,18E-02	1,43821E+00	1,477718	1,4745	1,43493	1,4461	1,436	1,4373	1,4373	1,4395	0,9951	0,9991	1,0023	0,9986	1,0035	1,0035	1,0029	1,0029	3,33E-03	-4,38E-03
2089	2085	-6,61E-02	1,433882E+00	1,44350034	1,4349	1,432854	1,4382	1,438	1,4332	1,4332	1,4325	0,9921	0,9993	1,000							

3.6. ANÁLISE DE RETORNO ELÁSTICO

Para análise de retorno elástico foram realizados ensaios utilizando os recursos do Laboratório de Conformação da Universidade Federal do Paraná.

O modelo proposto por Makinouchi *et al* (1993) (descrito na seção 2.4) é o mais utilizado para estudo do problema do retorno elástico, conforme exemplos de Samuel (2000), Gunnarsson (2001), Ouakdi *et al* (2011), Lajarin (2012) e Woellner (2013). Entretanto, o presente estudo se propõe a analisar o caso a partir da utilização de ensaio de dobramento simples, descritos nas seções subsequentes. Isso se deve ao fato de o objetivo ser analisar a influência direta da temperatura, sem a interferência dos demais parâmetros que influem diretamente no modelo de Makinouchi (1993), como o coeficiente de atrito, a força de prensa-chapas e parâmetros de ferramenta. Portanto, o modelo de dobramento foi escolhido por produzir um modo mais simples de deformação plástica, onde não há escorregamento da chapa sobre o raio da matriz e nem ação restritiva variável do prensa-chapas.

Foram realizados 24 ensaios, variando-se o material, as temperaturas utilizadas, e o raio de dobra (em dois níveis) em aplicações práticas e computacionais, conforme TABELA 13.

Para as aplicações práticas foi adotada repetibilidade em número de 2, resultando, portanto, em um total de 32 resultados.

O objetivo é comparar os ensaios práticos e computacionais, e analisar a influência da temperatura no retorno elástico.

TABELA 13 – ARRANJO EXPERIMENTAL PARA OS ENSAIOS DE RETORNO ELÁSTICO

Ensaio	Temperatura (°C)	Material	Método	Raio de Dobra (mm)	Repetibilidade
E21	Ambiente	HSLA 350/450	Dobramento (prático)	10	2
E22	Ambiente	HSLA 350/450	Dobramento (prático)	20	2
E23	Ambiente	DP 350/600	Dobramento (prático)	10	2
E24	Ambiente	DP 350/600	Dobramento (prático)	20	2
E25	Em torno de 400	HSLA 350/450	Dobramento (prático)	10	2
E26	Em torno de 400	HSLA 350/450	Dobramento (prático)	20	2
E27	Em torno de 400	DP 350/600	Dobramento (prático)	10	2
E28	Em torno de 400	DP 350/600	Dobramento (prático)	20	2
E29	30	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	10	-
E30	30	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	20	-
E31	30	DP 350/600	Dobramento (computacional)	10	-
E32	30	DP 350/600	Dobramento (computacional)	20	-
E33	400	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	10	-
E34	400	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	20	-
E35	400	DP 350/600	Dobramento (computacional)	10	-
E36	400	DP 350/600	Dobramento (computacional)	20	-
E37	600	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	10	-
E38	600	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	20	-
E39	600	DP 350/600	Dobramento (computacional)	10	-
E40	600	DP 350/600	Dobramento (computacional)	20	-
E41	800	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	10	-
E42	800	HSLA 350/450	Dobramento (computacional)	20	-
E43	800	DP 350/600	Dobramento (computacional)	10	-
E44	800	DP 350/600	Dobramento (computacional)	20	-

FONTE: O autor (2015).

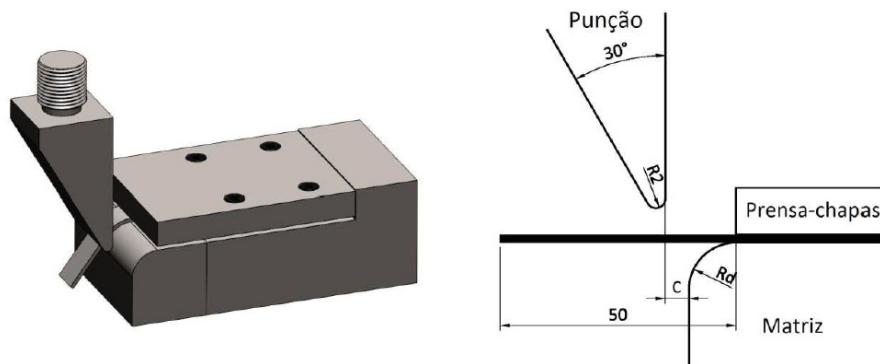
3.6.1. Experimentos práticos

O ensaio experimental de dobramento segue modelo proposto por Lajarin (2012), e está esquematicamente representado na FIGURA 41.

Amostras com 130 mm de comprimento e 13 mm de largura foram posicionadas entre a matriz e o prensa-chapas. O punção com raio de 2 mm é movido para baixo 50 mm, dobrando a chapa sobre o raio da matriz (R_d), formando um ângulo de aproximadamente 90º. Posteriormente, o punção é movido para cima e a amostra liberada, produzindo o retorno elástico. A folga entre punção e matriz (c) será mantida fixa em 1,5 vezes a espessura da chapa. Dois raios de dobra foram

utilizados (10 mm e 20 mm). Cada combinação de parâmetros sofrerá uma repetitividade de 2.

FIGURA 41 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO DE DOBRAMENTO E DIMENSÕES DA FERRAMENTA



FONTE: LAJARIN (2012).

3.6.1.1. Procedimento para medição do retorno elástico

Os corpos de prova dobrados nos ensaios práticos de dobramento seguido de retorno elástico foram posicionados em um scanner digital, onde o ângulo final de dobra foi medido com registrador digital na casa dos segundos, com o auxílio do software *Corel Draw X7*.

3.6.2. Modelo computacional

Foi construído um modelo de elementos finitos explícito dinâmico utilizando o aplicativo comercial *Abaqus*. Punção, matriz e prensa-chapas foram considerados como corpos rígidos e a chapa foi submetida a malhamento e posterior análise de deformações. O objetivo foi descrever computacionalmente o mesmo procedimento utilizado no ensaio prático de dobramento simples.

Método de descarregamento apropriado (LAJARIN, 2012; WOELLNER, 2013) foi utilizado para análise do retorno elástico, a partir do uso de sub-rotina que descreve o fenômeno.

3.6.2.1. Procedimento para medição do retorno elástico

No caso dos experimentos de simulação, os resultados foram registrados em imagem digital com extensão BMP (*bitmap*). Posteriormente essas imagens foram inseridas no software *Corel Draw X7*, onde foi medido o ângulo de dobra final (θ).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

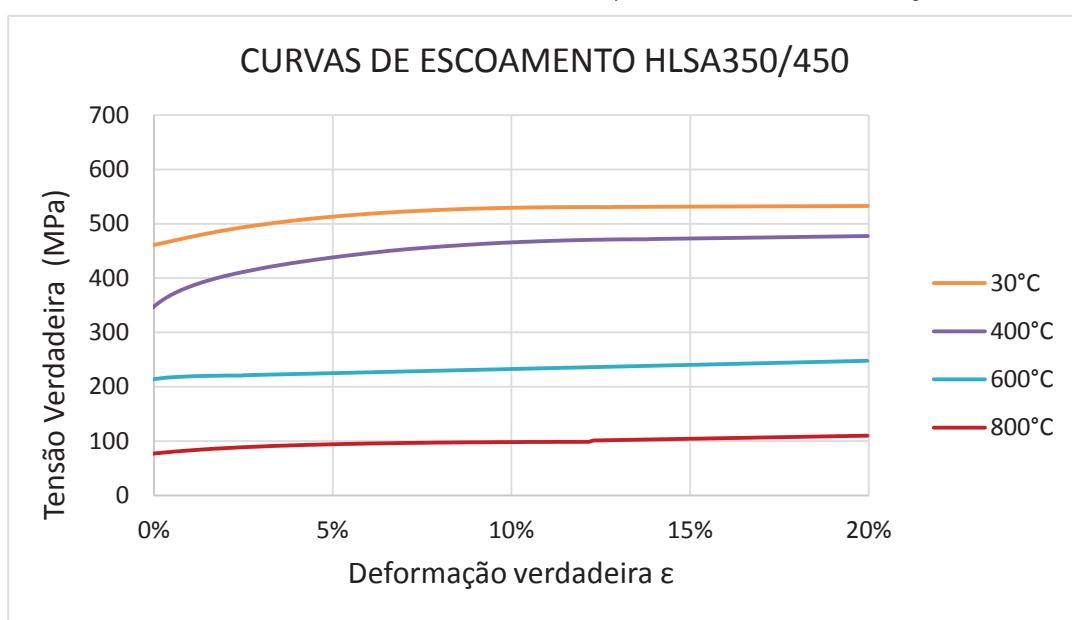
4.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS NAS DIFERENTES TEMPERATURAS ENSAIADAS

Os resultados obtidos a partir das estratégias descritas no item 3.4 estão demonstrados nos subitens seguintes. Pelo fato de os ensaios de dobramento terem ocorridos na direção de laminação, foram consideradas somente as curvas ensaiadas nesta direção (0°). Nos ensaios de limites de conformação, as dimensões maiores das chapas também foram de tal forma que são paralelas a esta direção.

4.1.1. Aço HSLA 350/450

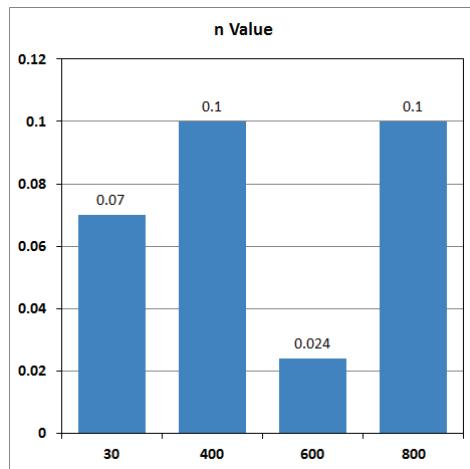
Para o aço HSLA 350/450, as curvas ilustradas na FIGURA 42 foram utilizadas para alimentar e descrever o material nos modelos computacionais propostos neste estudo, para cada uma das quatro temperaturas estudadas. A fim de investigação, estão representados nas FIGURA 43 e FIGURA 44 o coeficiente de encruamento e o coeficiente de resistência, calculados a partir das referidas curvas.

FIGURA 42 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO VERDADEIRA DO AÇO HSLA 350/450 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS (REGIÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA)



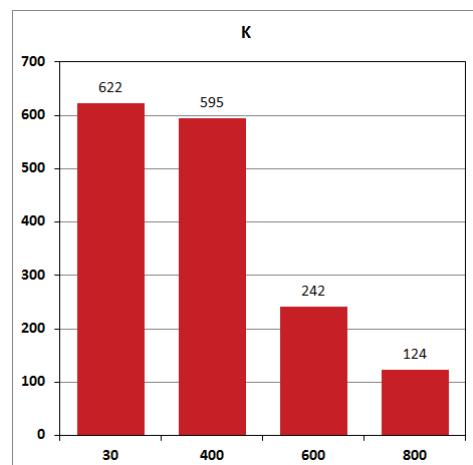
FONTE: O autor (2015).

FIGURA 43 – COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO (n) DO AÇO HSLA 350/450 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS



FONTE: O autor (2015).

FIGURA 44 – COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA (K) DO AÇO HSLA 350/450 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS

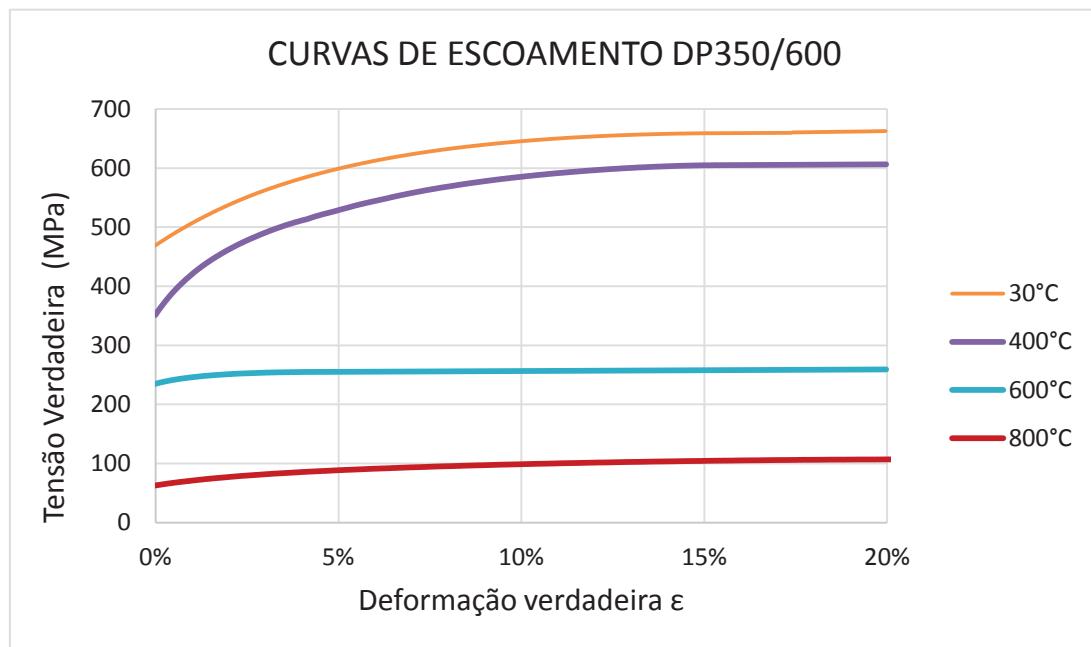


FONTE: O autor (2015).

4.1.2. Aço DP 350/600

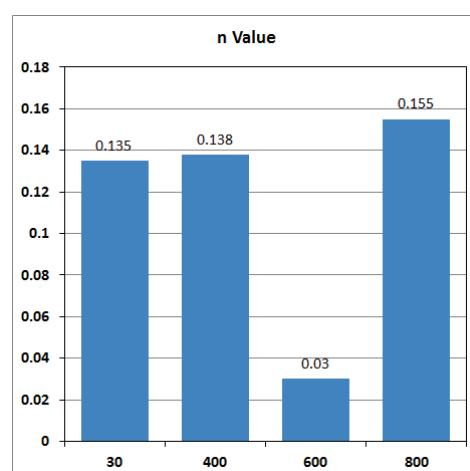
Para o aço DP 350/600, foram utilizadas as curvas ilustradas na FIGURA 45. Estão representados nas FIGURA 46 e FIGURA 47 o coeficiente de encruamento e o coeficiente de resistência, calculados a partir das referidas curvas.

FIGURA 45 – CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO VERDADEIRA DO AÇO DP 350/600 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS (REGIÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA)



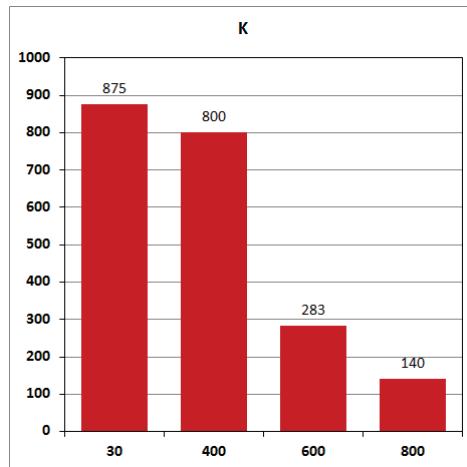
FONTE: O autor (2015).

FIGURA 46 – COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO (n) DO AÇO DP 350/600 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS



FONTE: O autor (2015).

FIGURA 47 – COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA (K) DO AÇO DP 350/600 PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ENSAIADAS



FONTE: O autor (2015).

4.2. RESULTADOS DA ANÁLISE DOS LIMITES DE CONFORMAÇÃO

Os resultados obtidos dos ensaios para verificar os limites de conformação dos dois aços analisados em cada uma das temperaturas de estudo são mostrados a seguir. Para cada um dos materiais, em um primeiro momento são verificados os resultados dos ensaios experimentais, e após dos ensaios computacionais. Em seguida, estes são comparados. Além das demonstrações e comparações das CLC construídas, são apresentados os caminhos de deformação para cada chapa analisada, em suas oito diferentes geometrias.

TABELA 14 – RESUMO DOS EXPERIMENTOS DE LIMITES DE CONFORMAÇÃO

Ensaio	Temperatura (°C)	Material	Método
E9	Ambiente	HSLA 350/450	Nakazima (prático)
E10	Em torno de 400	HSLA 350/450	Nakazima (prático)
E11	Ambiente	DP 350/600	Nakazima (prático)
E12	Em torno de 400	DP 350/600	Nakazima (prático)
E13	30	HSLA 350/450	CGE (computacional)
E14	400	HSLA 350/450	CGE (computacional)
E15	600	HSLA 350/450	CGE (computacional)
E16	800	HSLA 350/450	CGE (computacional)
E17	30	DP 350/600	CGE (computacional)
E18	400	DP 350/600	CGE (computacional)
E19	600	DP 350/600	CGE (computacional)
E20	800	DP 350/600	CGE (computacional)

FONTE: O autor (2015).

4.2.1. Aço HSLA 350/450

4.2.1.1. Resultados Experimentais

As FIGURA 48 e FIGURA 49 correspondem, respectivamente, aos ensaios E9 e E10. Os pontos medidos de cada uma das oito diferentes geometrias do Ensaio de Nakazima Reduzido foram plotados em um Diagrama Limite de Conformação (DLC). Em ambos os casos foram contemplados os diferentes modos de deformação, conforme apresentado em FIGURA 6. Em termos de DLC, significa dizer que pontos foram encontrados em seus dois quadrantes. O primeiro, a direita do eixo central, representando o estado biaxial de deformações (ou estiramento). O segundo quadrante permite verificar o comportamento das chapas em estado uniaxial de deformações. Além disso, os pontos que são encontrados sobre o eixo central permitem a visualização do estado planar de deformações.

Importante destacar que, apesar de ter sido impossível conduzir os ensaios a quente dentro das mesmas faixas exatas de temperatura, foram plotados os pontos resultantes das diferentes geometrias decorrentes do Ensaio de Nakazima em um mesmo DLC, a fim de comparação, e com o objetivo de permitir a construção da CLC. Apesar disso, conforme pode ser verificado na TABELA 15, as temperaturas foram mantidas tão aproximadas quanto foi possível entre os diferentes ensaios.

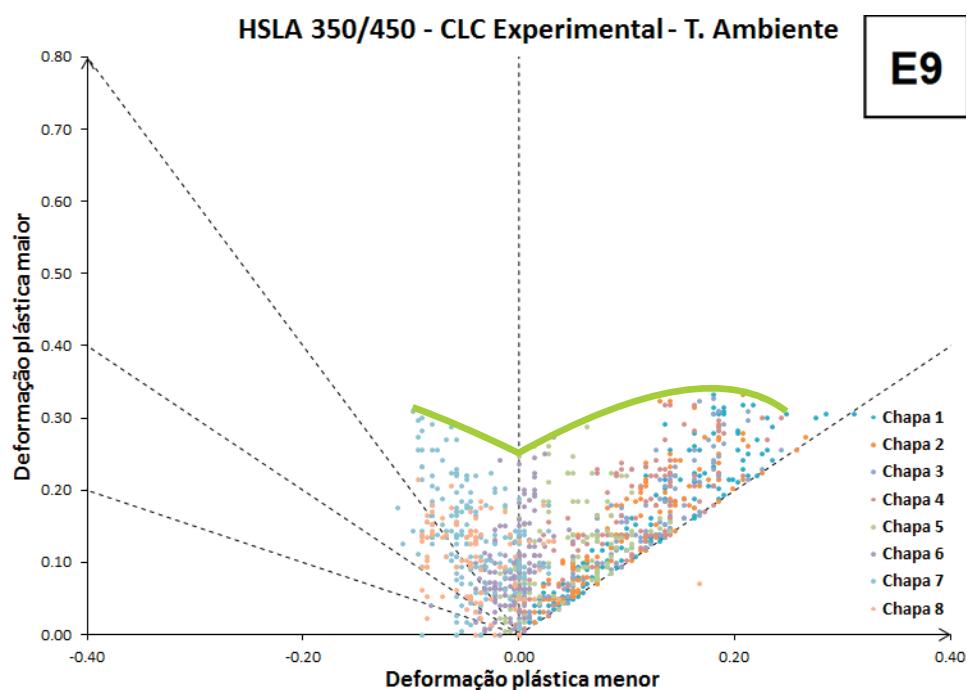
Todos os caminhos de deformação obtidos em cada um dos ensaios realizados estão expostos no Apêndice A.

TABELA 15 – DETALHAMENTO DAS TEMPERATURAS ATINGIDAS NOS ENSAIOS E9 E E10

Identificação	Aço	Geometria (mm)	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
E9-1	HSLA 350/450	200x200	Ambiente	Ambiente
E9-2	HSLA 350/450	200x175	Ambiente	Ambiente
E9-3	HSLA 350/450	200x150	Ambiente	Ambiente
E9-4	HSLA 350/450	200x125	Ambiente	Ambiente
E9-5	HSLA 350/450	200x100	Ambiente	Ambiente
E9-6	HSLA 350/450	200x75	Ambiente	Ambiente
E9-7	HSLA 350/450	200x50	Ambiente	Ambiente
E9-8	HSLA 350/450	200x25	Ambiente	Ambiente
E10-1	HSLA 350/450	200x200	430	300
E10-2	HSLA 350/450	200x175	420	245
E10-3	HSLA 350/450	200x150	385	230
E10-4	HSLA 350/450	200x125	400	270
E10-5	HSLA 350/450	200x100	430	265
E10-6	HSLA 350/450	200x75	385	225
E10-7	HSLA 350/450	200x50	400	200
E10-8	HSLA 350/450	200x25	395	220

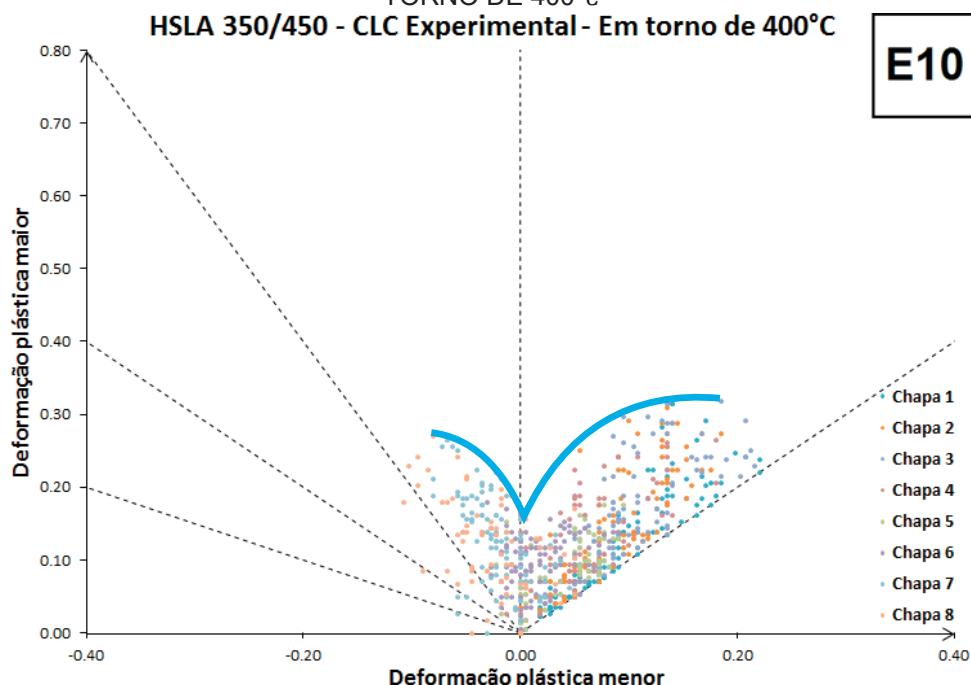
FONTE: O autor (2015).

FIGURA 48 – CLC EXPERIMENTAL PARA O AÇO HSLA 350/450, ENSAIADO EM TEMPERATURA AMBIENTE



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 49 – CLC EXPERIMENTAL PARA O AÇO HSLA 350/450, PARA AS TEMPERATURAS EM TORNO DE 400°C

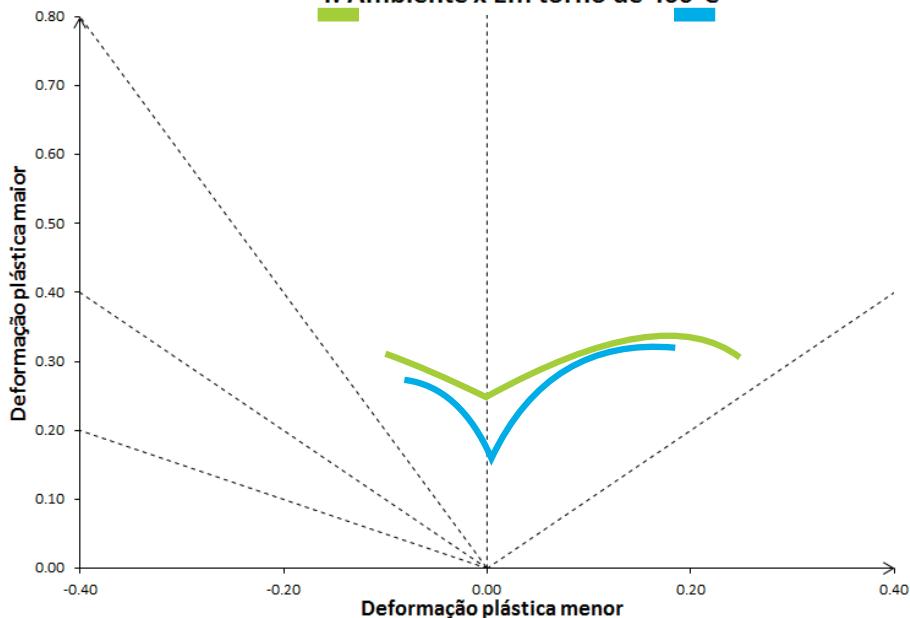


FONTE: O autor (2016).

Na FIGURA 50, as duas curvas acima demonstradas são plotadas em um mesmo DLC, a fim de comparação visual da diferença de comportamento do material nas duas temperaturas estudadas, em termos de limites de conformação.

FIGURA 50 – COMPARAÇÃO DAS CLC LEVANTADAS EXPERIMENTALMENTE NAS DUAS DIFERENTES TEMPERATURAS ESTUDADAS (AÇO HSLA 350/450)

HSLA 350/450 - CLC Experimental
T. Ambiente x Em torno de 400°C



FONTE: O autor (2016).

Em termos de uma comparação quantitativa, foram tomados três pontos de referência. Além do ponto sobre o eixo central, que representa o estado plano de deformações, os extremos coincidentes das duas curvas também foram comparados. Os valores indicados na TABELA 16 correspondem às deformações maiores (eixo y), tomadas em três pontos comuns no eixo x.

TABELA 16 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E9 E E10 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X

	Estado uniaxial	Estado plano	Estado biaxial
Temp. ambiente	0,288	0,2376	0,333
Em torno de 400°C	0,2655	0,1575	0,3195
Relação	92,19%	66,29%	95,95%

FONTE: O autor (2016).

Para o aço HSLA 350/440, de acordo com os testes experimentais, ficou demonstrada uma significativa queda do limite de conformação suportado pelo material quando submetido a estado plano de deformações (cerca de 34%), quando ensaiado a temperaturas próximas a 400°C, em comparação com ensaios em temperatura ambiente. Em contrapartida, nos outros dois estados de deformação analisados, a queda observada nos limites foi pequena (menos de 8% para um e cerca de 4% para o outro), sendo que possivelmente pode ser uma diferença a ser desconsiderada se levados em conta os possíveis erros decorrentes das medições.

A tendência encontrada, portanto, concorda com os experimentos de Goud *et al* (2014). Conforme demonstrado no subitem 2.3.3 (FIGURA 13), esses autores também observaram queda significativa nos limites de conformação para a condição de estado plano de deformação conforme se aumentava a temperatura (150°C e 300°C). Na condição de 450°C, entretanto, esta tendência começa a se inverter, mas ainda assim o parâmetro estudado mantém-se abaixo da condição de temperatura ambiente. No subitem seguinte, com o auxílio do modelo computacional, o comportamento dos limites de conformação em temperaturas superiores, para este estudo, poderá ser observado.

Ainda de acordo com Goud *et al* (2014), duas possíveis causas podem ser atribuídas a este comportamento, conforme mencionado em 2.3.3. A primeira

possibilidade seria relativa ao impacto da temperatura na resistência mecânica do material, sendo que o coeficiente de resistência (K) sofreu diminuição até a temperatura de $300^{\circ}C$, e em $450^{\circ}C$ aumentou (

TABELA 2). Esse fenômeno seria explicado, no estudo de Goud *et al* (2014), pela presença de silício e outros elementos que aumentariam o deslocamento de densidade devido ao regime de deformação dinâmica a partir do maior nível de temperatura estudado ($450^{\circ}C$). A fins de comparação, o aço utilizado por Goud *et al* (2014) possui 0,83% de silício em sua composição (em peso) e 0,39% de manganês (TABELA 1). O aço HSLA 350/450 possui 0,4% de silício e 2,1% de manganês (TABELA 4).

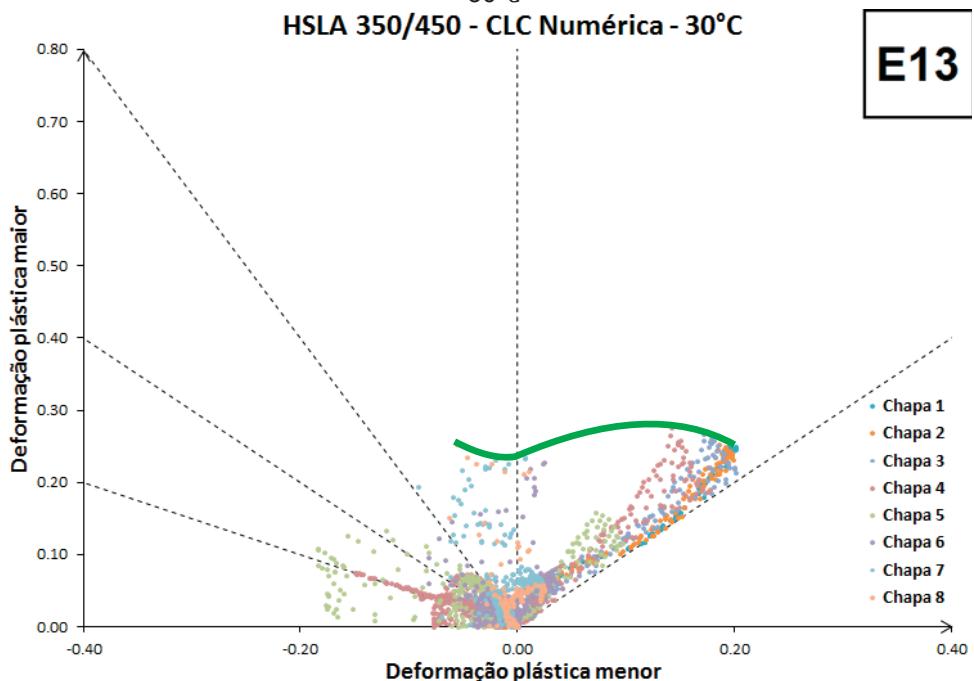
A segunda explicação apresentada por Goud *et al* (2014) seria relativa ao impacto da temperatura no coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação (m). Como este coeficiente está diretamente associado ao coeficiente de encruamento (n), existe a possibilidade de comparação. No estudo de Goud *et al* (2014), o coeficiente n variou da seguinte forma: 0,304 em temperatura ambiente, 0,274 em $150^{\circ}C$, 0,289 em $300^{\circ}C$ e 0,261 em $450^{\circ}C$ (

TABELA 2). No presente estudo, o aço HSLA 350/450 apresentou: 0,07 em temperatura ambiente, 0,1 em $400^{\circ}C$, 0,024 em $600^{\circ}C$ e 0,1 em $800^{\circ}C$.

4.2.1.2. Resultados Computacionais

As FIGURA 51, FIGURA 52, FIGURA 53 e FIGURA 54 demonstram as CLC encontradas numericamente para as quatro temperaturas ensaiadas. Assim como nas CLC levantadas experimentalmente, nestas também se verifica a possibilidade de análise em ambos os quadrantes do DLC.

FIGURA 51 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO HSLA 350/450, PARA A TEMPERATURA DE 30°C

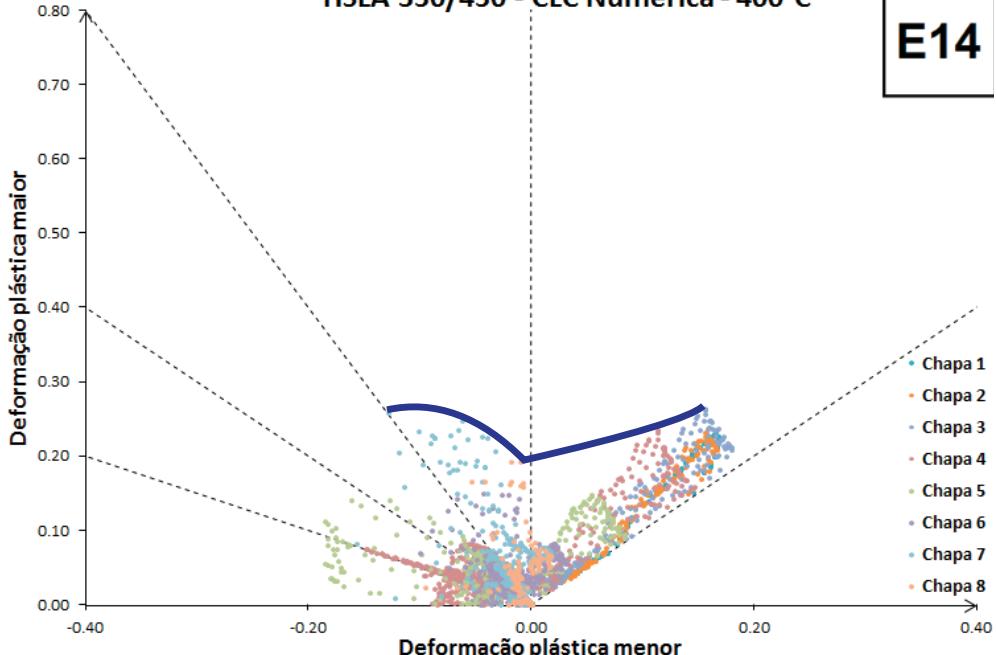


FONTE: O autor (2016).

FIGURA 52 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO HSLA 350/450, PARA A TEMPERATURA DE 400°C (EXPERIMENTO E14)

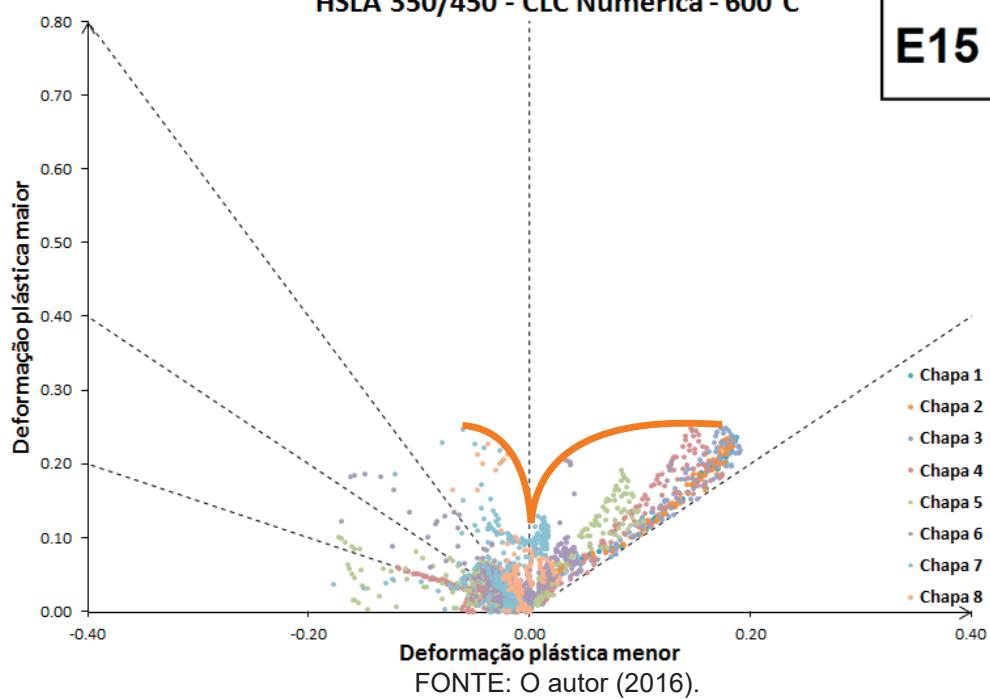
HSLA 350/450 - CLC Numérica - 400°C

E14



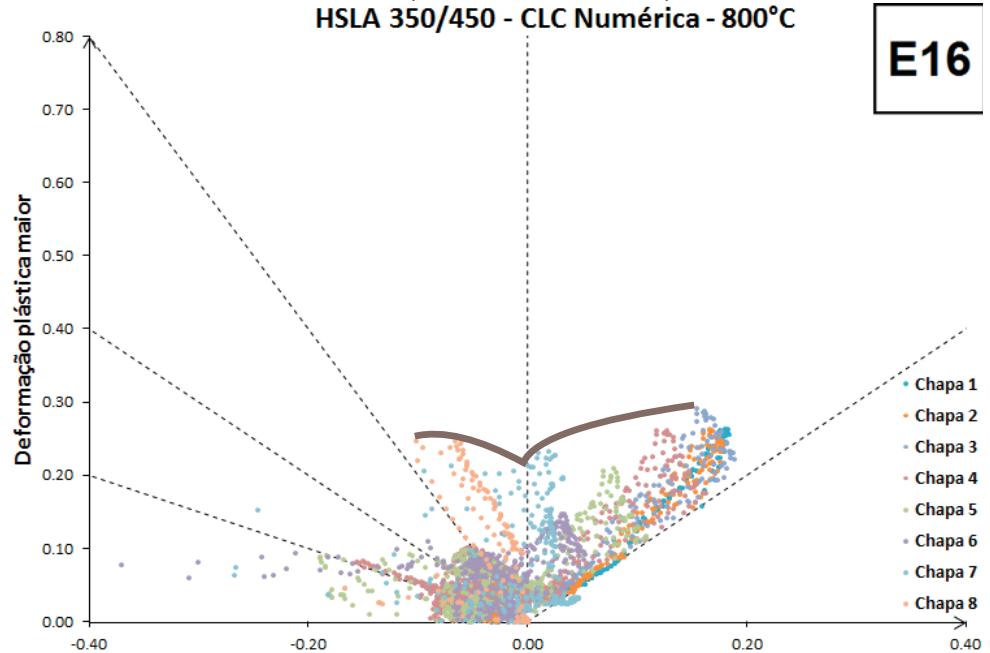
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 53 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO HSLA 350/450, PARA A TEMPERATURA DE 600°C (EXPERIMENTO E15)
HSLA 350/450 - CLC Numérica - 600°C



FONTE: O autor (2016).

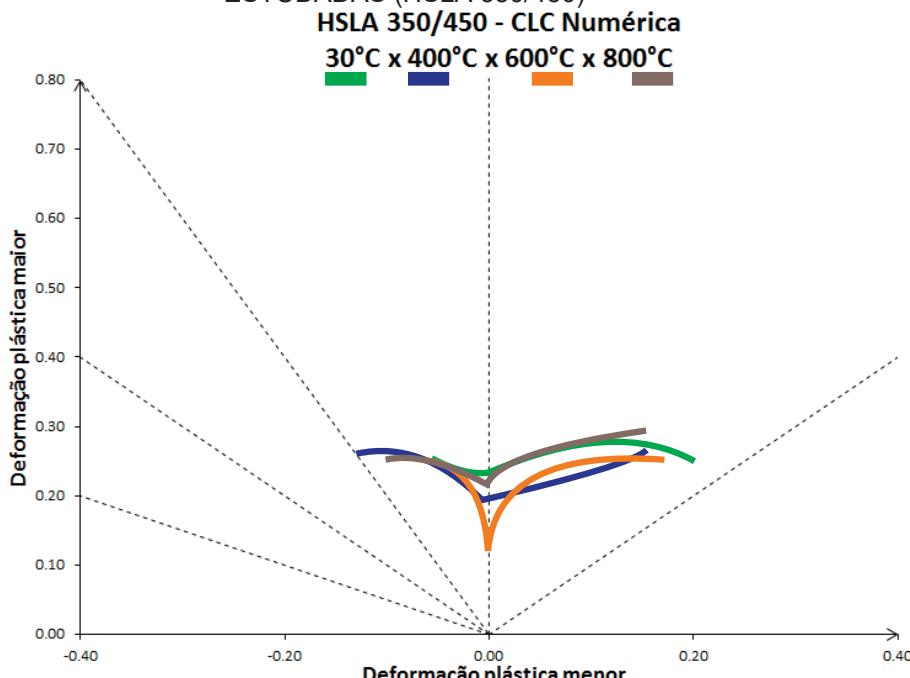
FIGURA 54 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO HSLA 350/450, PARA A TEMPERATURA DE 800°C (EXPERIMENTO E16)
HSLA 350/450 - CLC Numérica - 800°C



FONTE: O autor (2016).

Quando comparadas as quatro curvas (FIGURA 55), nota-se visual queda dos limites de conformação no modo biaxial de deformação das curvas referentes a 400°C e 600°C, quando comparadas com a curva do material ensaiado numericamente a 30°C. No estado plano de deformações, essa mesma tendência é observada, com o acréscimo de uma acentuada queda da curva que representa o ensaio de 600°C. No modo uniaxial de deformação, as quatro curvas apresentam-se muito próximas. A curva referente ao experimento em 800°C se aproxima em todos os aspectos da curva levantada a 30°C.

FIGURA 55 – COMPARAÇÃO DAS CLC COMPUTACIONAIS PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)



FONTE: O autor (2016).

As comparações realizadas na TABELA 17, seguem a metodologia da TABELA 16. Os pontos extremos coincidentes, bem como o sobre o eixo central foram tomados como referência.

TABELA 17 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E13, E14, E15 E E16 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X

	Estado uniaxial	Estado plano	Estado biaxial
30°C	0,253	0,233	0,276
400°C	0,235	0,193	0,262
Relação com 30°C	92,89%	82,83%	94,93%
600°C	0,247	0,117	0,239
Relação com 30°C	97,63%	50,21%	86,59%
800°C	0,239	0,214	0,286
Relação com 30°C	94,47%	91,85%	103,62%

FONTE: O autor (2016).

Assim como na comparação dos resultados experimentais, os resultados em estados de deformação biaxial e uniaxial para a temperatura de 400°C são relativamente próximos da amostra em 30°C. Particularmente nestes dois pontos descritos, essas relações são muito semelhantes quando a comparação é feita entre os resultados práticos e computacionais. Mais sobre essa comparação, que visa validar o método computacional implementado, está descrita no subitem seguinte. No estado plano de deformações, a amostra em 400°C apresenta cerca de 17% de queda em relação à amostra simulada em 30°C.

Para a simulação do material em 600°C, o decréscimo apresentado no estado plano de deformações é de cerca de 50%. No estado uniaxial, a queda nos limites é insignificante (cerca de 2%). Já no estado biaxial a queda representa cerca de 13%.

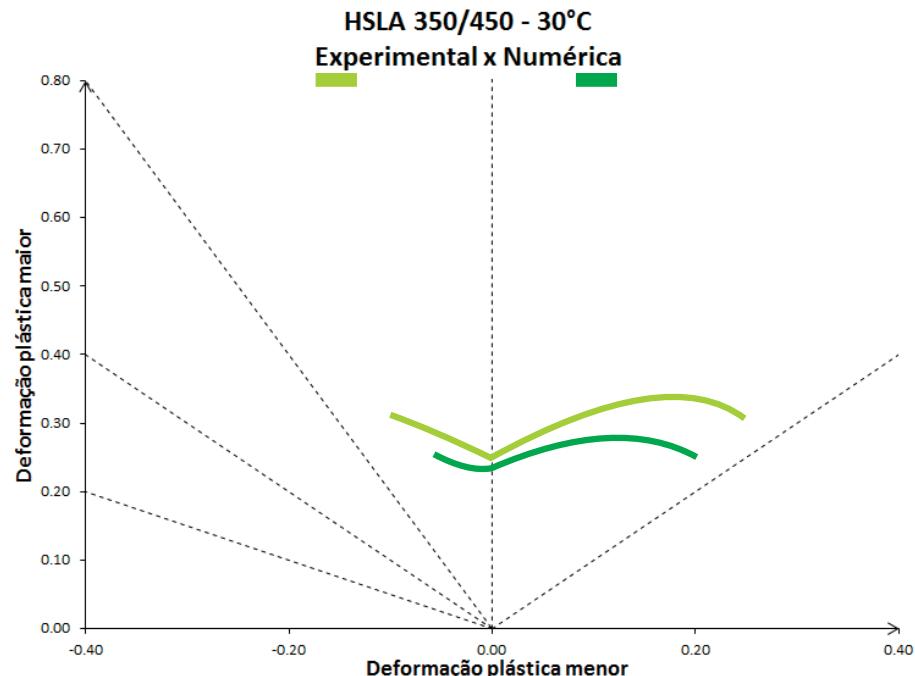
A CLC numérica para 800°C se apresentou muito semelhante em todos os aspectos à CLC numérica para 30°C, não ocorrendo diferença maior que 10%.

Portanto, verificam-se também nos resultados decorrentes da simulação computacional, especial impacto da temperatura no estado plano de deformações, conforme discussão apresentada no subitem 4.2.1.1.

4.2.1.3. Comparação dos resultados computacionais com os experimentais

A comparação visual dos resultados experimental e numérico para temperaturas próximas a 30°C (FIGURA 56) mostram limites de conformação menores para as amostras simuladas numericamente.

FIGURA 56 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO EXPERIMENTAL VERSUS O COMPUTACIONAL PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)



FONTE: O autor (2016).

A TABELA 18 mostra a comparação das duas curvas das deformações maiores (eixo y), a partir de três pontos de referência fixados no eixo x (deformações plásticas menores). O estado plano de deformações mostra um limite de conformação de cerca de 2% mais baixo da curva computacional comparada com a experimental. Para os outros dois pontos de referência, a queda do limite é de cerca de 13%, aproximadamente.

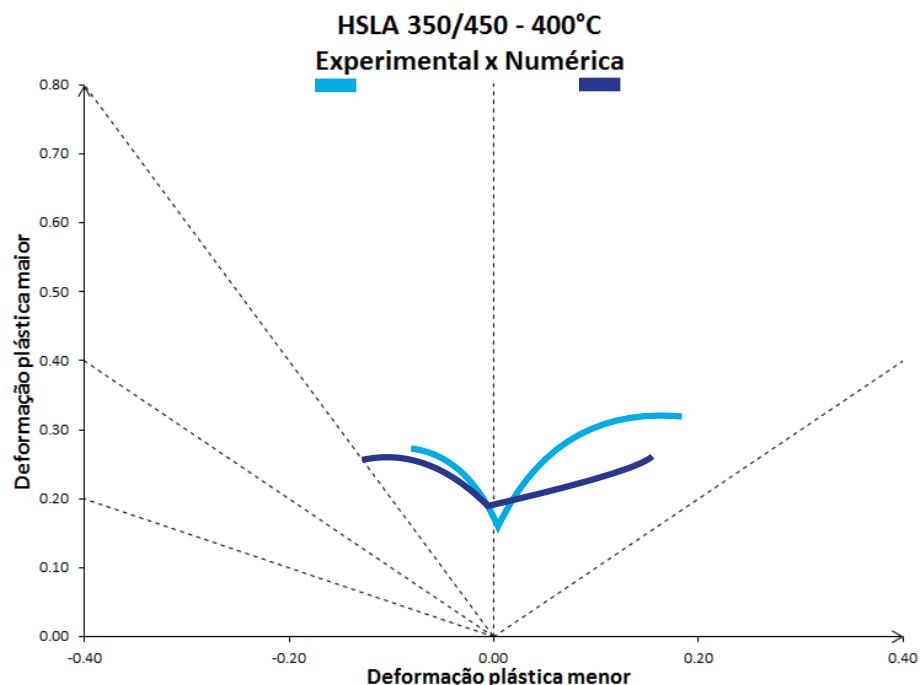
TABELA 18 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E9 E E13 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X

	Estado uniaxial	Estado plano	Estado biaxial
Experimental	0,288	0,2376	0,3195
Computacional	0,253	0,233	0,276
Relação	87,85%	98,06%	86,38%

FONTE: O autor (2016).

A comparação visual dos resultados experimental e numérico para as temperaturas aproximadamente em 400°C (FIGURA 57) mostra proximidade entre os estados de deformação uniaxial e planar, sendo a diferença maior observada na condição biaxial de deformação.

FIGURA 57 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO EXPERIMENTAL VERSUS O COMPUTACIONAL PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)



FONTE: O autor (2016).

A TABELA 19 apresenta de forma mais clara as conclusões acima expostas. Enquanto no estado uniaxial ocorreu queda de cerca de 7% apenas da CLC computacional com relação à CLC experimental, e somente 3% de diferença aproximadamente para o estado plano (dessa vez com relação inversa, ou seja, o limite computacional se mostrando mais elevado), no estado biaxial a comparação mostrou queda de quase 20% dos limites simulados numericamente.

TABELA 19 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E10 E E14 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X

	Estado uniaxial	Estado plano	Estado biaxial
Experimental	0,27	0,1565	0,3195
Computacional	0,251	0,161	0,256
Relação	92,96%	102,88%	80,13%

FONTE: O autor (2016).

4.2.2. Aço DP 350/600

4.2.2.1. Resultados Experimentais

A FIGURA 58 mostra todos os pontos de deformação medidos para as oito geometrias de chapas diferentes que constituem a CLC experimental para o aço DP 350/600 em temperatura ambiente. Da mesma forma, a FIGURA 59 demonstra a constituição da CLC do mesmo aço para temperaturas próximas de 400°C no início da operação.

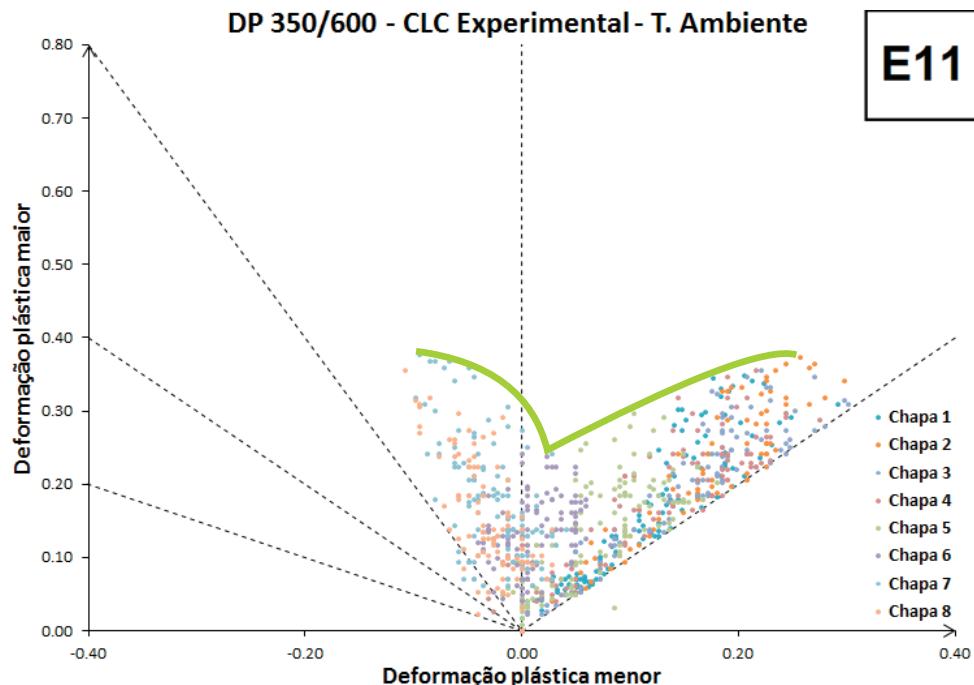
A TABELA 20 detalha as temperaturas experimentadas durante os ensaios E11 e E12.

TABELA 20 – DETALHAMENTO DAS TEMPERATURAS ATINGIDAS NOS ENSAIOS E9 E E10

Identificação	Aço	Geometria (mm)	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
E11-1	DP 350/600	200x200	Ambiente	Ambiente
E11-2	DP 350/600	200x175	Ambiente	Ambiente
E11-3	DP 350/600	200x150	Ambiente	Ambiente
E11-4	DP 350/600	200x125	Ambiente	Ambiente
E11-5	DP 350/600	200x100	Ambiente	Ambiente
E11-6	DP 350/600	200x75	Ambiente	Ambiente
E11-7	DP 350/600	200x50	Ambiente	Ambiente
E11-8	DP 350/600	200x25	Ambiente	Ambiente
E12-1	DP 350/600	200x200	410	285
E12-2	DP 350/600	200x175	370	270
E12-3	DP 350/600	200x150	410	280
E12-4	DP 350/600	200x125	430	320
E12-5	DP 350/600	200x100	400	275
E12-6	DP 350/600	200x75	430	310
E12-7	DP 350/600	200x50	420	235
E12-8	DP 350/600	200x25	390	265

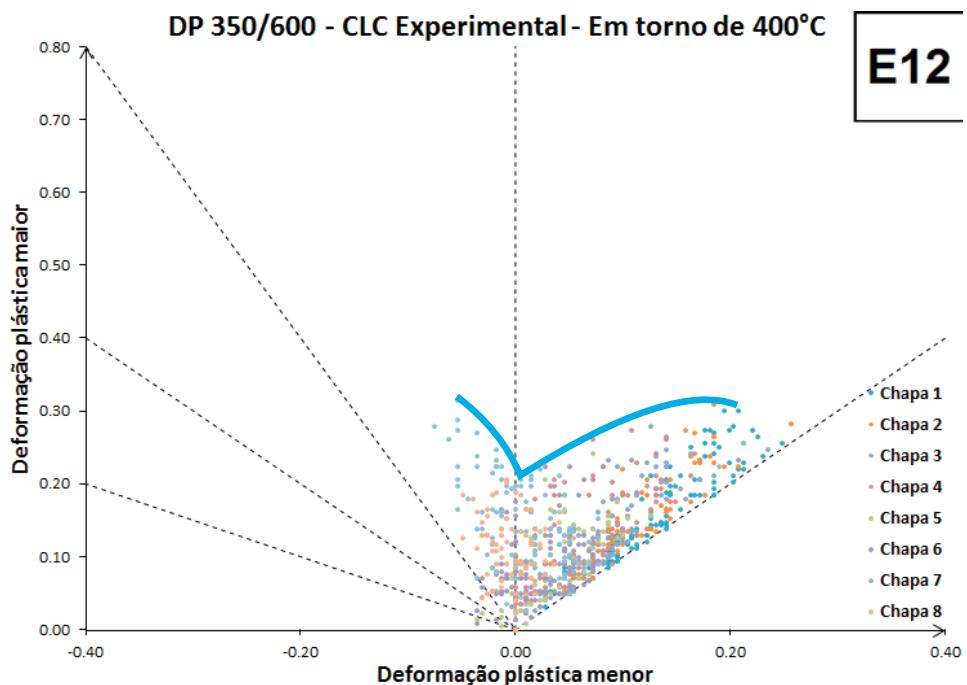
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 58 – CLC EXPERIMENTAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA A TEMPERATURA DE 30°C



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 59 – CLC EXPERIMENTAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA AS TEMPERATURAS EM TORNO DE 400°C

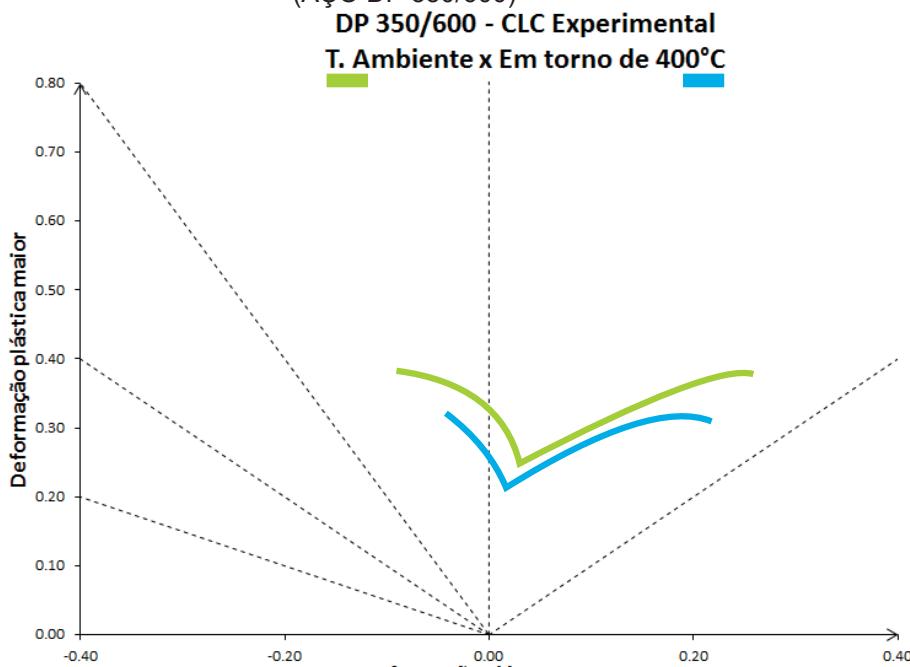


FONTE: O autor (2016).

No DLC da FIGURA 60 é possível comparar visualmente o efeito da temperatura na obtenção dos limites de conformação. Ao longo de toda a extensão da CLC, os limites encontrados em valores próximos a 400°C são menores do que em temperatura ambiente.

É importante notar que nas CLC levantadas para o aço DP 350/600 o ponto de inflexão das curvas não se encontra exatamente sobre o eixo central, caracterizando estado planar puro de deformação, estando deslocado levemente para o lado do primeiro quadrante. Apesar disso, para termos de análise comparativa, será considerado este ponto, conjuntamente com os extremos coincidentes das duas curvas a serem comparadas.

FIGURA 60 – COMPARAÇÃO DAS CLC NAS DUAS DIFERENTES TEMPERATURAS ESTUDADAS
(AÇO DP 350/600)



FONTE: O autor (2016).

TABELA 21 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E11 E E12 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X

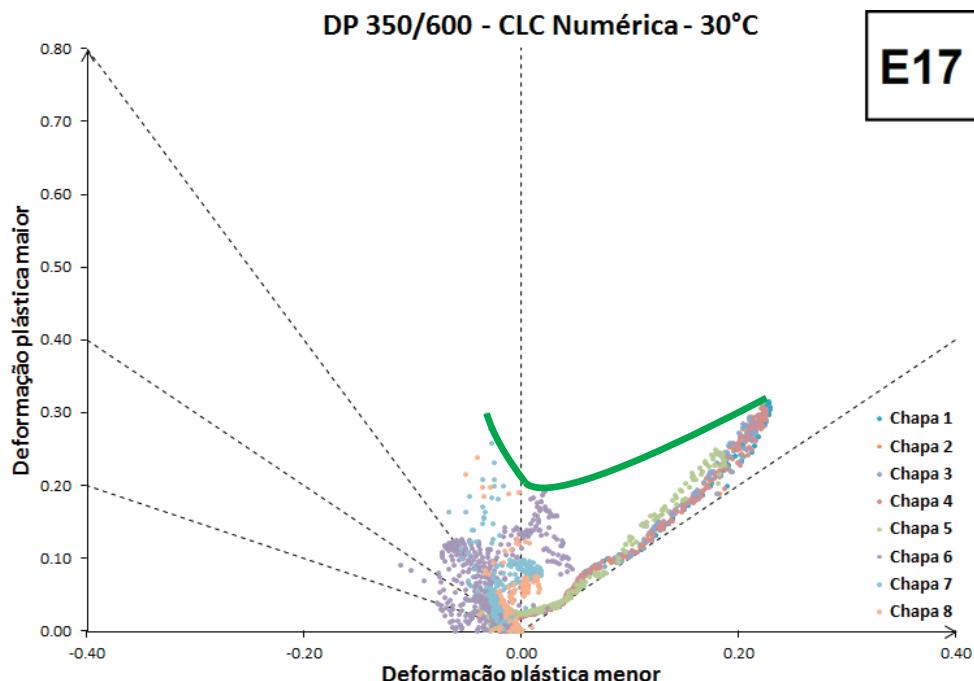
	Estado uniaxial	Estado plano	Estado biaxial
Temp. ambiente	0,365	0,225	0,3465
Em torno de 400°C	0,315	0,2115	0,3015
Relação	86,3%	94.00%	87,01%

FONTE: O autor (2016).

4.2.2.2. Resultados Computacionais

De FIGURA 61 a FIGURA 64 estão representadas as CLC obtidas via simulação numérica no software *Abaqus* para o aço DP 350/600 para as quatro temperaturas estudadas. São os experimentos E17 (30°C), E18 (400°C), E19 (600°C) e E20 (800°C). Em todos os resultados, assim como verificado nos resultados decorrentes da análise para o aço HSLA 350/440, ficam contemplados os dois quadrantes do DLC.

FIGURA 61 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA A TEMPERATURA DE 30°C



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 62 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA A TEMPERATURA DE 400°C

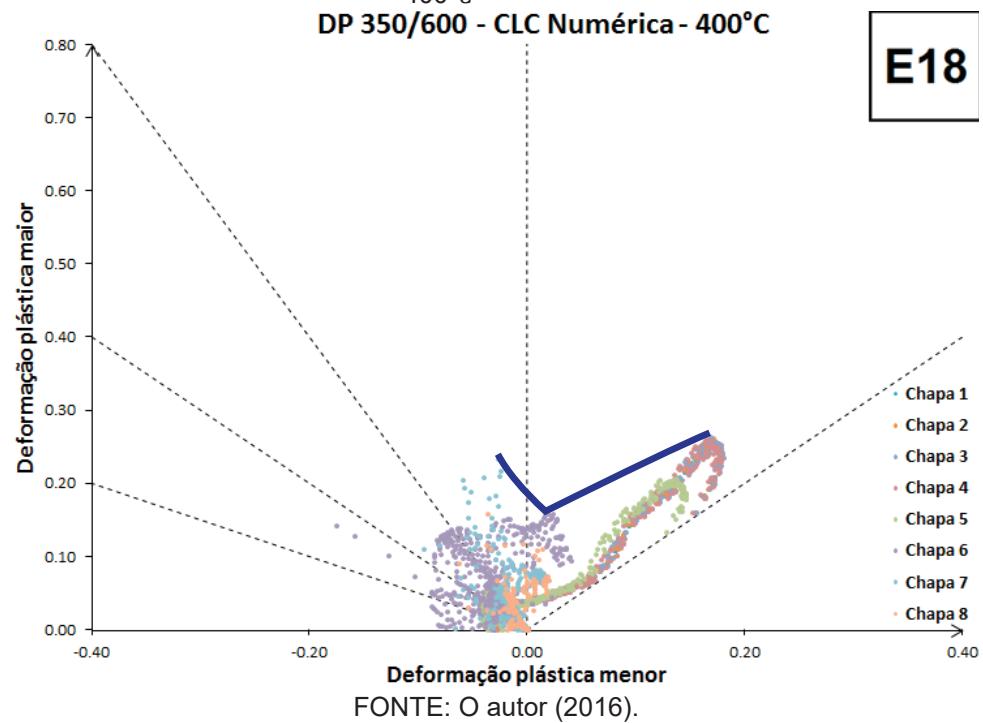


FIGURA 63 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA A TEMPERATURA DE 600°C

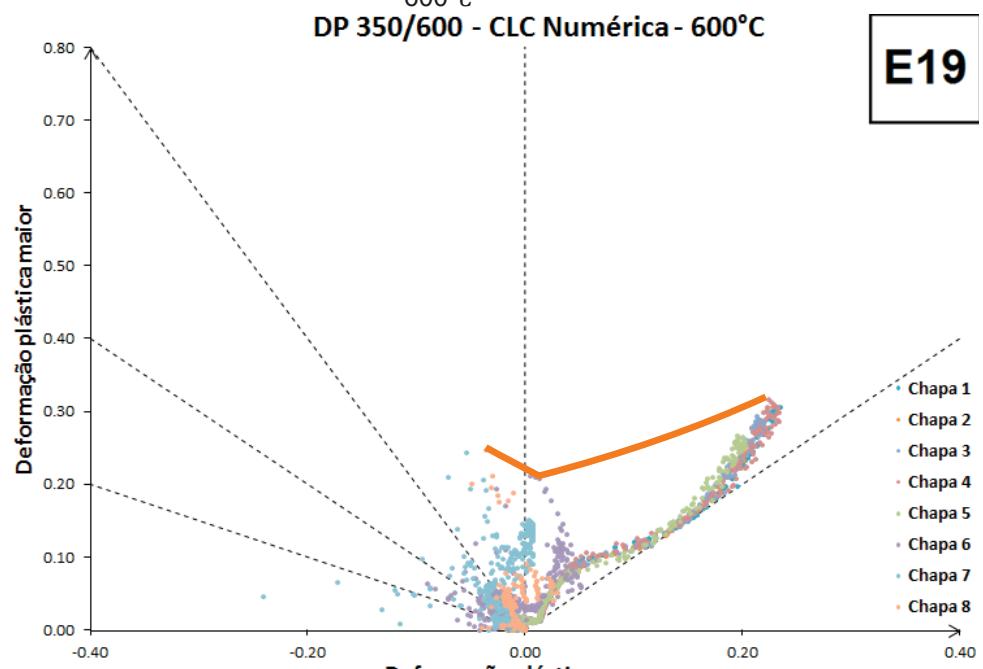
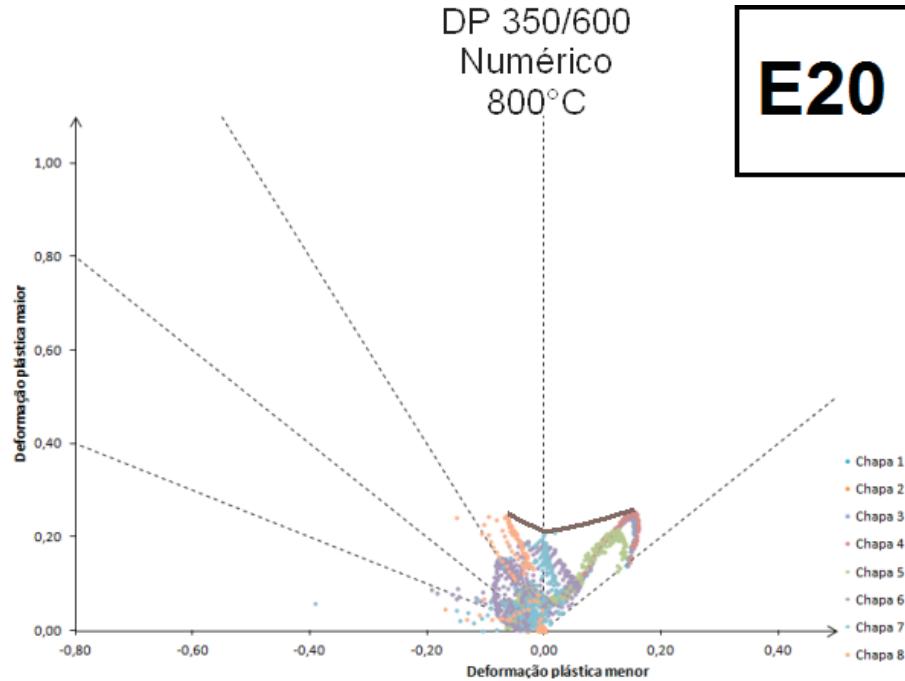


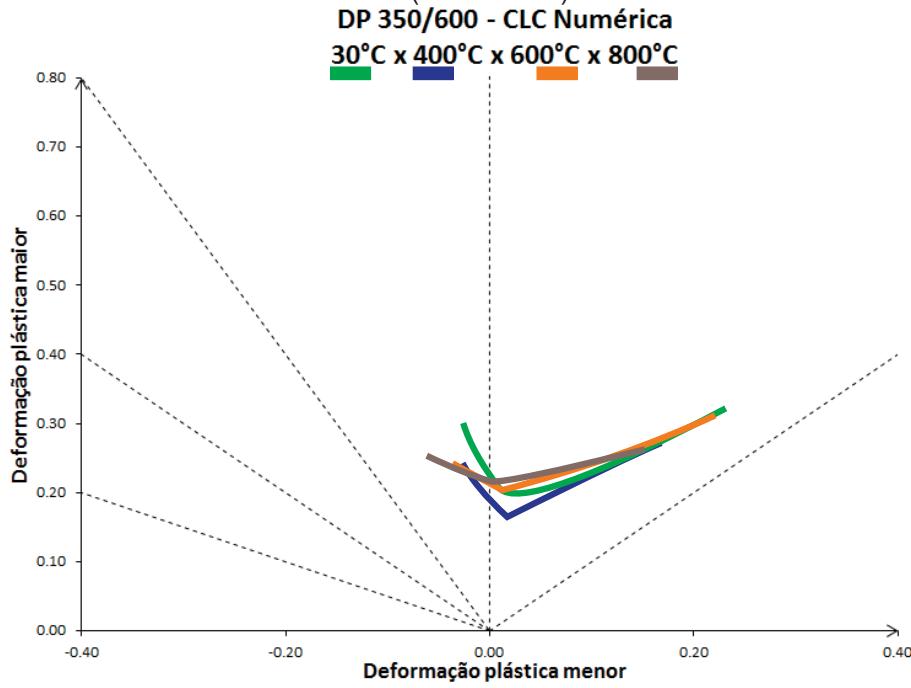
FIGURA 64 – CLC COMPUTACIONAL PARA O AÇO DP 350/600, PARA A TEMPERATURA DE 800°C



FONTE: O autor (2016).

A FIGURA 65 traz a possibilidade de comparação das quatro CLC demonstradas. Assim como nas CLC experimentais, também nas curvas para 400°C e 600°C o ponto de inflexão encontra-se levemente deslocado do eixo central. Este ponto de inflexão é claramente encontrado em menor limite para a temperatura de 400°C. Os pontos de inflexão das curvas decorrentes das temperaturas de 600°C e 800°C, entretanto, encontram-se acima do ponto de inflexão da CLC em 30°C.

FIGURA 65 – COMPARAÇÃO DAS CLC COMPUTACIONAIS PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)



FONTE: O autor (2016).

A TABELA 22 traz as diferenças qualitativas das curvas para três pontos de referência. Tendência similar é encontrada para as deformações biaxiais, sendo a maior diferença representada entre as curvas de pouco mais de 5%. No estado uniaxial de deformações, o segundo limite mais alto é na CLC de 600°C (cerca de 22% abaixo da CLC de 30°C), seguida da CLC em 800°C (cerca de 24% abaixo) e da CLC para 400°C, com cerca de 29% abaixo da curva em 30°C. Para o estado plano de deformações, as duas curvas de maiores temperaturas superam a CLC tomada como referência, e a curva de 400°C mostra um limite de cerca de 15% inferior a esta mesma.

Aplicando a mesma análise realizada por Goud *et al* (2014) e verificada no presente estudo para o aço HSLA 350/450, o impacto da temperatura no estado plano de deformação se dá com apresentação de diminuição dos limites de conformação para o segundo nível de temperatura estudado (400°C), sendo que para as temperaturas superiores (600°C e 800°C) estes limites ficam acima até mesmo da temperatura ambiente. Cabe ressaltar que o aço DP 350/600 apresenta 0,03% de silício e 0,6% de manganês em peso (TABELA 4).

TABELA 22 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E17, E18, E19 E E20 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X

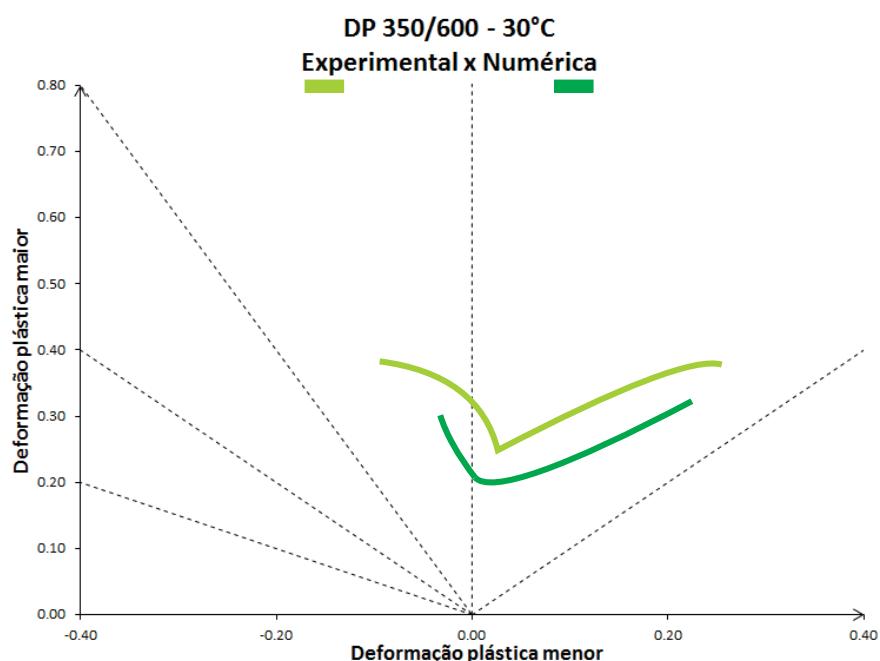
	Estado uniaxial	Estado plano	Estado biaxial
30°C	0,299	0,176	0,261
400°C	0,212	0,149	0,256
Relação com 30°C	70,9%	84,66%	98,08%
600°C	0,234	0,211	0,251
Relação com 30°C	78,26%	119,89%	96,17%
800°C	0,226	0,197	0,247
Relação com 30°C	75,59%	111,93%	94,64%

FONTE: O autor (2016).

4.2.2.3. Comparação dos resultados computacionais com os experimentais

A FIGURA 66 mostra uma diferença visual um mais expressiva entre as curvas para temperaturas próximas a 30°C ensaiadas experimentalmente e numericamente, do que quando comparadas com a mesma comparação para o aço HSLA 350/440, principalmente em relação ao estado plano de deformações (medidas de limites próximas ao eixo central, ou com a deformação menor muito próxima de zero).

FIGURA 66 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO EXPERIMENTAL VERSUS O COMPUTACIONAL PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)



FONTE: O autor (2016).

A TABELA 23 confirma quantitativamente a diferença maior encontrada ao comparar o estado plano de deformações, enquanto para os outros dois pontos de referência essa diferença se mantém próxima de 14% abaixo.

TABELA 23 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E11 E E17 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X

	Estado uniaxial	Estado plano	Estado biaxial
Experimental	0,3465	0,225	0,3555
Computacional	0,299	0,176	0,307
Relação	86,29%	78,22%	86,36%

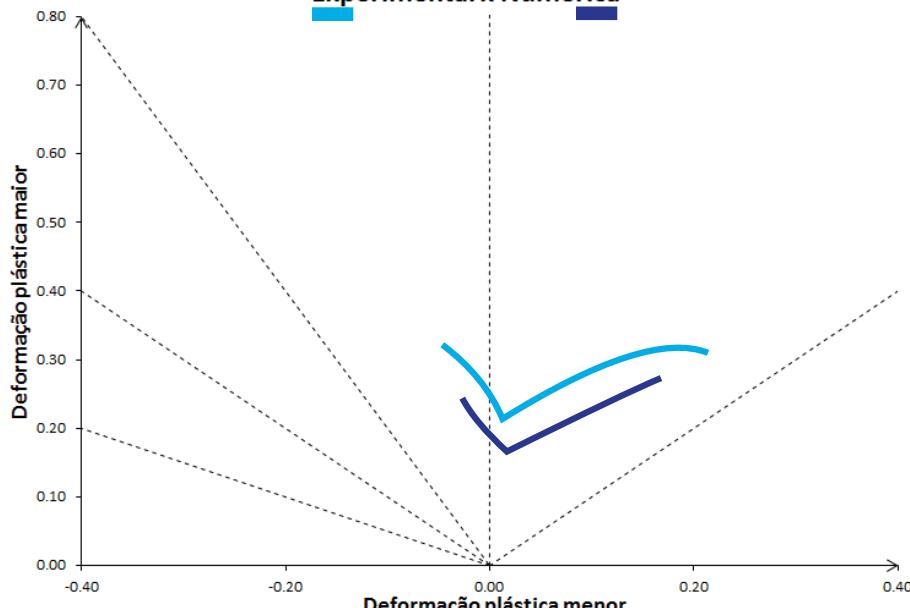
FONTE: O autor (2016).

A mesma tendência se verifica visualmente para temperaturas próximas as 400°C, principalmente em relação ao estado plano de deformações.

FIGURA 67 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO EXPERIMENTAL VERSUS O COMPUTACIONAL PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600)

DP 350/600 - 400°C

Experimental x Numérica



FONTE: O autor (2016).

Na TABELA 24 se nota a mesma tendência encontrada para os resultados próximos às temperaturas ambientes, ou seja, uma diferença muito contundente para os estados planos de deformações (cerca de 30%), enquanto que para os

outros dois pontos de referência, uma maior proximidade (cerca de 10% no extremo esquerdo das curvas, e 15% no extremo direito.

TABELA 24 – COMPARAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIORES DAS CLC E12 E E18 EM TERMOS DOS TRÊS PONTOS DE REFERÊNCIA COMUNS NO EIXO X

	Estado uniaxial	Estado plano	Estado biaxial
Experimental	0,261	0,2115	0,3015
Computacional	0,234	0,149	0,256
Relação	89,66%	70,45%	84,91%

FONTE: O autor (2016).

4.3. RESULTADOS DA ANÁLISE DE RETORNO ELÁSTICO

Os experimentos realizados nesta seção estão expostos na tabela seguinte, com seus resultados para ângulos medidos após dobraria e após retorno elástico.

TABELA 25 – RESUMO DOS EXPERIMENTOS DE DOBRAMENTO SIMPLES

Ensaio	Repetição	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Material	Método	Raio de Dobra (mm)	Ângulo após retorno elástico (°)
E21	A	23	23	HSLA350/450	Dobramento (prático)	10	102,14
	B	23	23	HSLA350/450	Dobramento (prático)	10	100,87
E22	A	23	23	HSLA350/450	Dobramento (prático)	20	106,06
	B	23	23	HSLA350/450	Dobramento (prático)	20	105,97
E23	A	23	23	DP350/600	Dobramento (prático)	10	103,14
	B	23	23	DP350/600	Dobramento (prático)	10	101,95
E24	A	23	23	DP350/600	Dobramento (prático)	20	106,87
	B	23	23	DP350/600	Dobramento (prático)	20	106,79
E25	A	375	190	HSLA350/450	Dobramento (prático)	10	100,24
	B	350	170	HSLA350/450	Dobramento (prático)	10	101,19
E26	A	350	170	HSLA350/450	Dobramento (prático)	20	105,33
	B	380	200	HSLA350/450	Dobramento (prático)	20	105,78
E27	A	345	170	DP350/600	Dobramento (prático)	10	99,89
	B	360	160	DP350/600	Dobramento (prático)	10	98,37
E28	A	340	170	DP350/600	Dobramento (prático)	20	104,87
	B	360	175	DP350/600	Dobramento (prático)	20	104,57
E29	-	30	30	HSLA350/450	Dobramento (computacional)	10	99,43
E30	-	30	30	HSLA350/450	Dobramento (computacional)	20	100,41
E31	-	30	30	DP350/600	Dobramento (computacional)	10	100,73
E32	-	30	30	DP350/600	Dobramento (computacional)	20	101,49
E33	-	400	400	HSLA350/450	Dobramento (computacional)	10	98,03
E34	-	400	400	HSLA350/450	Dobramento (computacional)	20	98,98
E35	-	400	400	DP350/600	Dobramento (computacional)	10	98,88
E36	-	400	400	DP350/600	Dobramento (computacional)	20	100,1
E37	-	600	600	HSLA350/450	Dobramento (computacional)	10	96,46
E38	-	600	600	HSLA350/450	Dobramento (computacional)	20	96,96
E39	-	600	600	DP350/600	Dobramento (computacional)	10	96,01
E40	-	600	600	DP350/600	Dobramento (computacional)	20	98,68
E41	-	800	800	HSLA350/450	Dobramento (computacional)	10	95,31
E42	-	800	800	HSLA350/450	Dobramento (computacional)	20	96,31
E43	-	800	800	DP350/600	Dobramento (computacional)	10	95,33
E44	-	800	800	DP350/600	Dobramento (computacional)	20	98,1

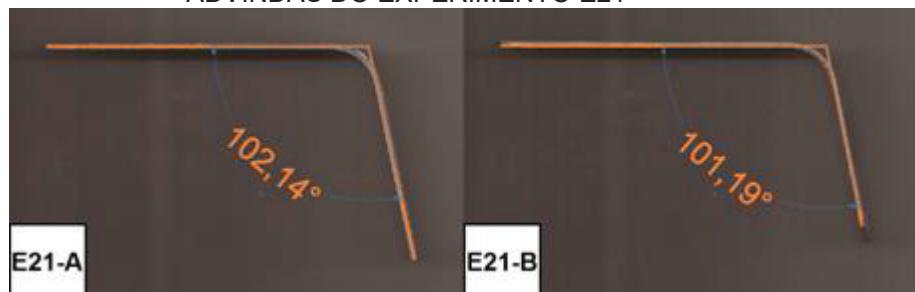
FONTE: O autor (2016).

4.3.1. Aço HSLA 350/450

4.3.1.1. Resultados Experimentais

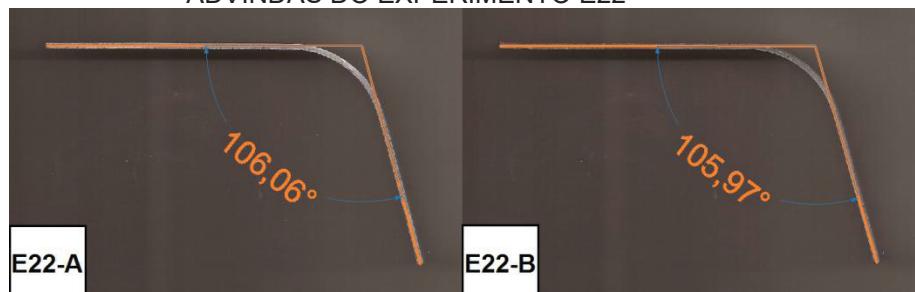
O retorno elástico medido em temperaturas ambientes é observado nas FIGURA 68 e FIGURA 69, para corpos de prova confeccionados em aço HSLA 350/450, e com raios de dobra de 10 mm e 20 mm, respectivamente.

FIGURA 68 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E21



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 69 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E22



FONTE: O autor (2016).

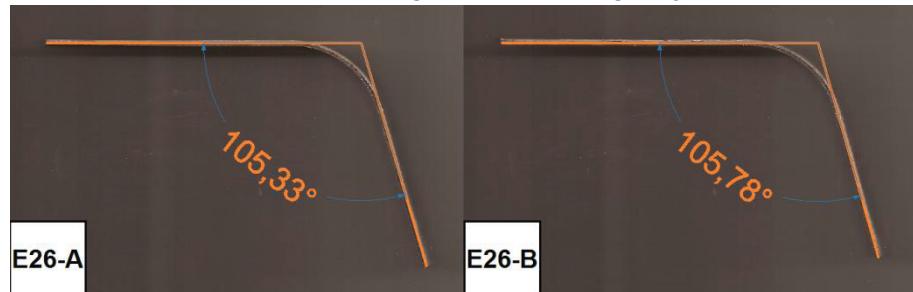
Os resultados dos experimentos para ensaios conduzidos em altas temperaturas com corpos de provas em aço HSLA 350/450, estão ilustrados nas FIGURA 70 e FIGURA 71, com raios de dobra de 10 mm e 20 mm, respectivamente.

FIGURA 70 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E25



FONTE: O autor (2016).

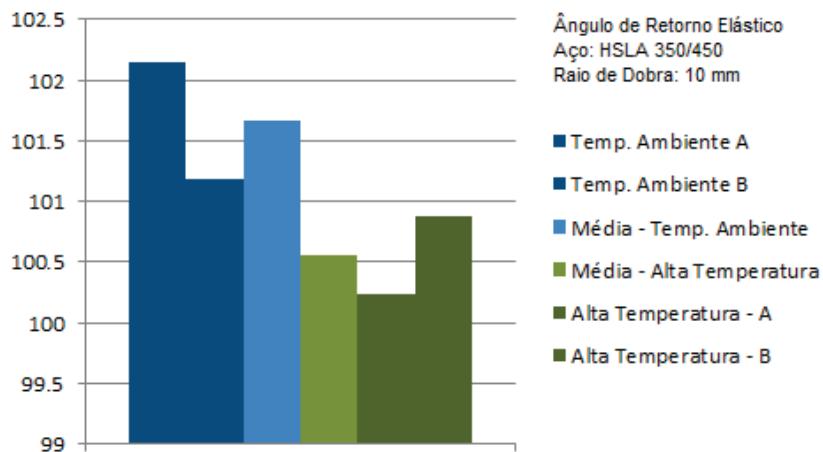
FIGURA 71 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E26



FONTE: O autor (2016).

O impacto da elevação da temperatura para níveis próximos de $400^{\circ}C$ para amostras dobradas em matrizes de raio 10 mm pode ser observado na FIGURA 72. O ângulo médio entre as duas amostras dobradas em temperatura ambiente é de $101,67^{\circ}$, enquanto que o mesmo para temperaturas em torno de $400^{\circ}C$ é $100,55^{\circ}$, o que representa uma diminuição média de 1,09%.

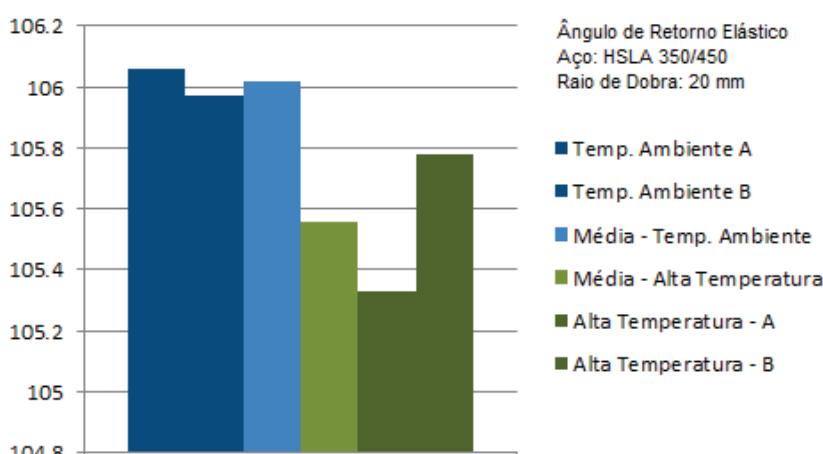
FIGURA 72 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO HSLA 350/450 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 10 MM



FONTE: O autor (2016).

Para o raio de dobra de 20 mm, os ângulos medidos após retorno elástico estão graficamente expostos na FIGURA 73. Em temperatura ambiente o ângulo médio entre as duas amostras testadas foi de 106,02°, enquanto que em altas temperaturas foi de 105,56°, o que representou uma queda média de somente 0,43%.

FIGURA 73 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO HSLA 350/450 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 20 MM

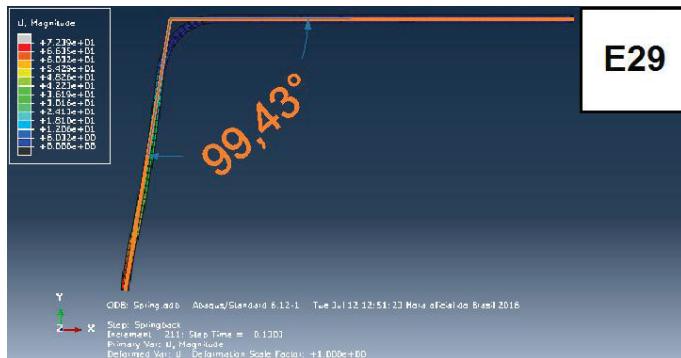


FONTE: O autor (2016).

4.3.1.2. Resultados Computacionais

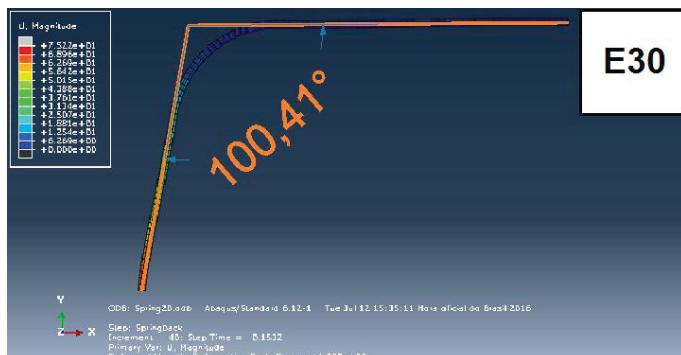
Os resultados advindos das simulações computacionais para o aço HSLA 350/450 estão contemplados na série de figuras de FIGURA 74 a FIGURA 81.

FIGURA 74 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E29 (30°C, RAIO DE DOBRA 10 MM)



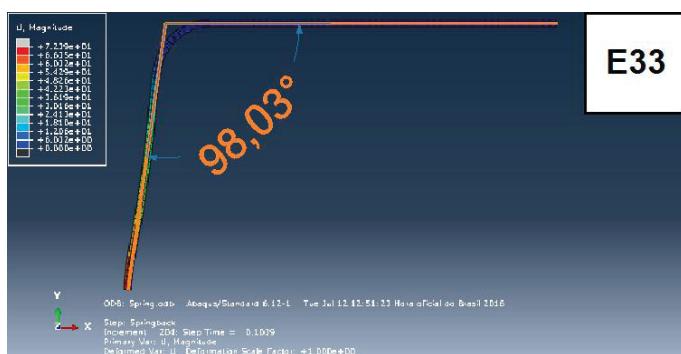
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 75 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E30 (30°C, RAIO DE DOBRA 20 MM)



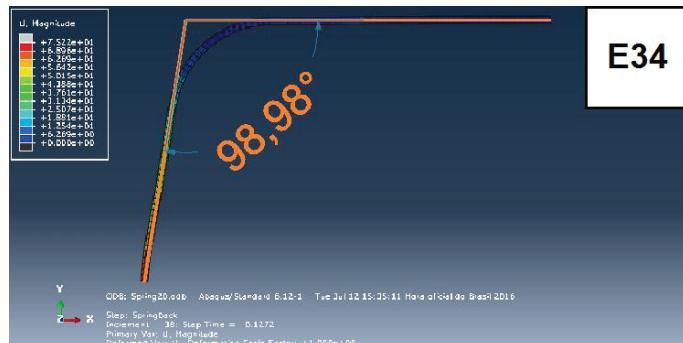
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 76 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E33 (400°C, RAIO DE DOBRA 10 MM)



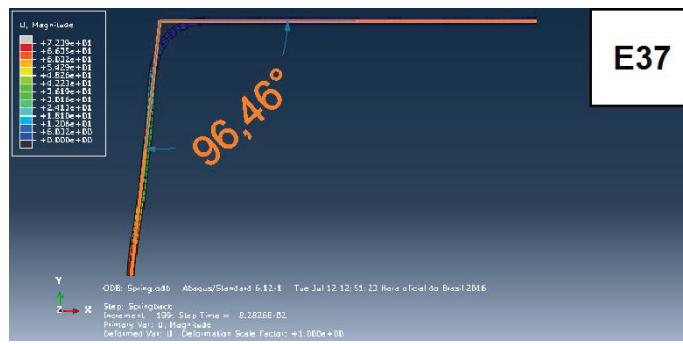
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 77 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E34 (400°C, RAIO DE DOBRA 20 MM)



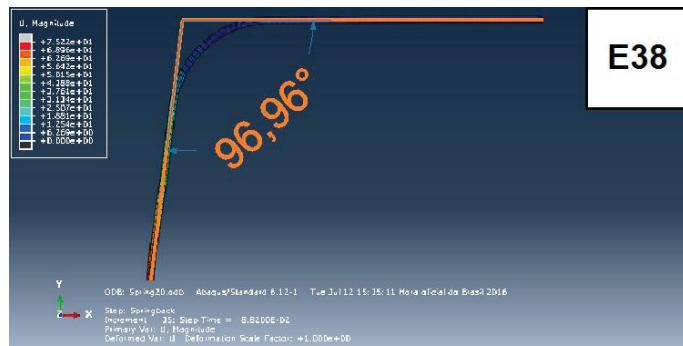
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 78 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E37 (600°C, RAIO DE DOBRA 10 MM)



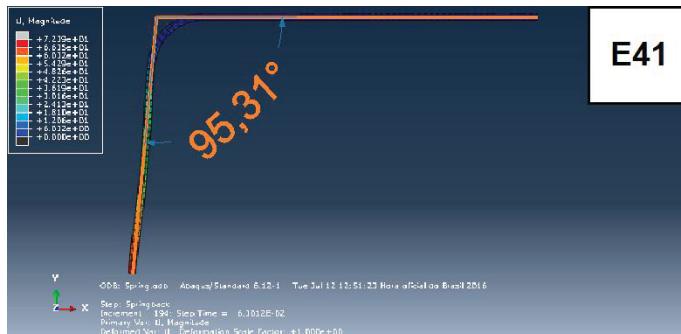
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 79 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E38 (600°C, RAIO DE DOBRA 20 MM)



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 80 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E41 (800°C, RAIO DE DOBRA 10 MM)



FONTE: O autor (2016).

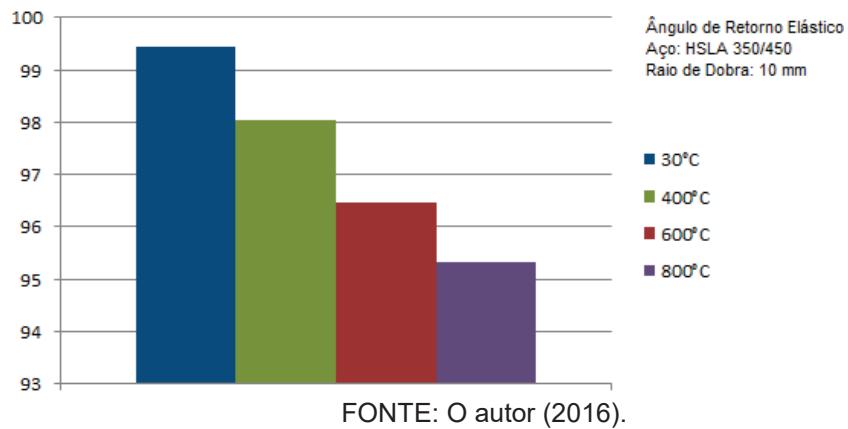
FIGURA 81 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E42 (800°C, RAIO DE DOBRA 20 MM)



FONTE: O autor (2016).

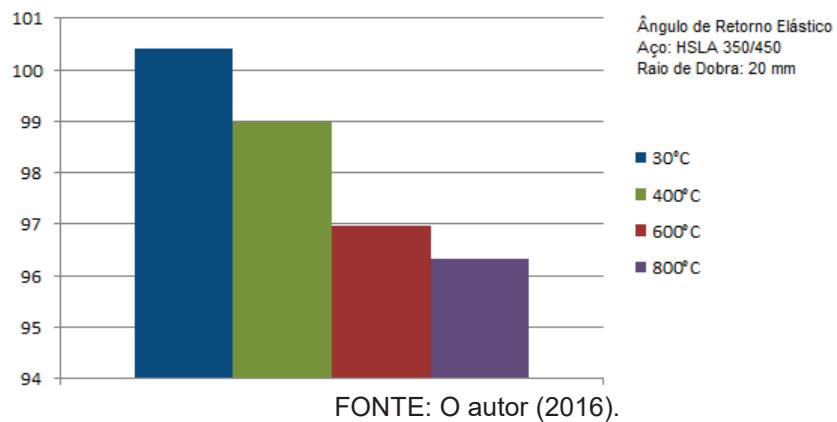
Para os resultados simulados computacionalmente, o retorno elástico diminui conforme se aumenta a temperatura, conforme pode ser visualizado na FIGURA 82 (raio de dobra igual a 10 mm) e FIGURA 83 (raio de dobra igual a 20 mm).

FIGURA 82 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO HSLA 350/450 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 10 MM (SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL)



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 83 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO HSLA 350/450 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 20 MM (SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL)



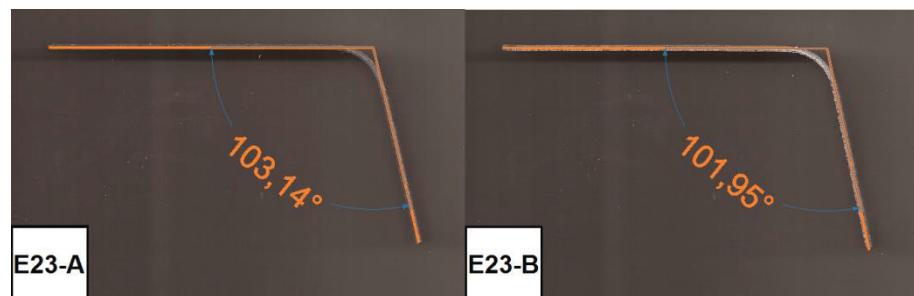
FONTE: O autor (2016).

4.3.2. Aço DP 350/600

4.3.2.1. Resultados Experimentais

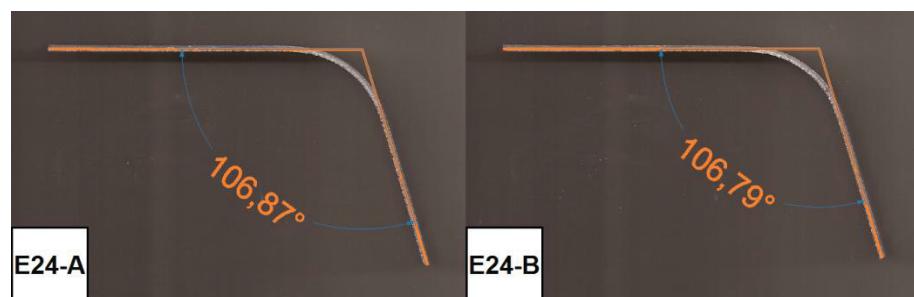
O retorno elástico medido em temperaturas ambientes é observado nas FIGURA 84 e FIGURA 85, para corpos de prova de aço DP 350/600, e com raios de dobra de 10 mm e 20 mm, respectivamente.

FIGURA 84 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E23



FONTE: O autor (2016).

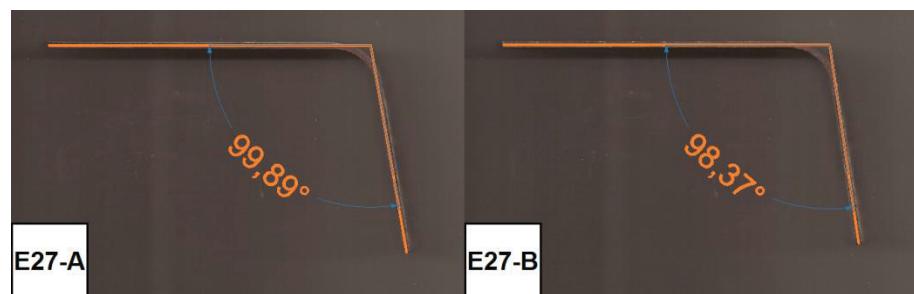
FIGURA 85 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E24



FONTE: O autor (2016).

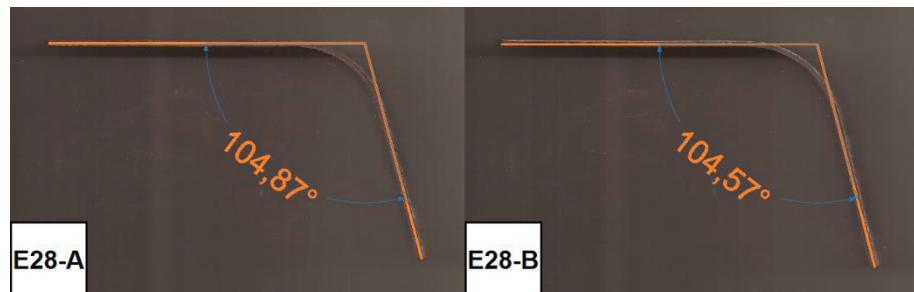
Em temperaturas em torno de 400°C , os resultados medidos estão expostos na FIGURA 86 (raio de dobra igual a 10 mm) e FIGURA 87 (raio de dobra igual a 20 mm).

FIGURA 86 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E27



FONTE: O autor (2016).

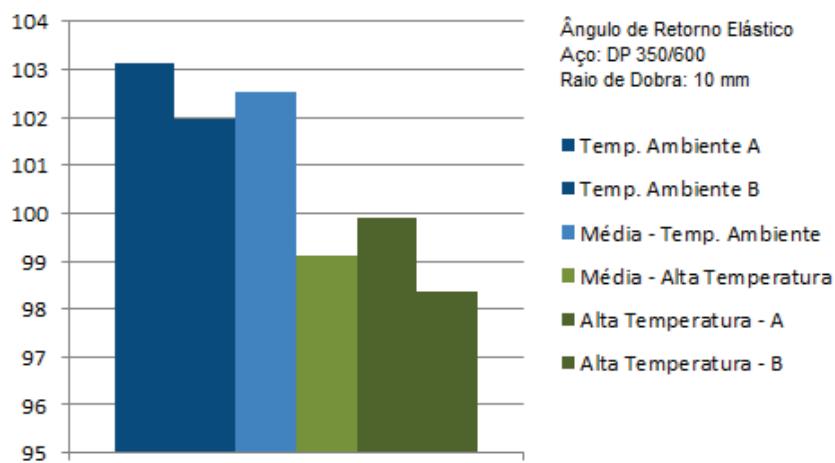
FIGURA 87 – ÂNGULOS MEDIDOS APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA AS AMOSTRAS ADVINDAS DO EXPERIMENTO E28



FONTE: O autor (2016).

Em termos de comparação, a FIGURA 88 representa a diferença observada no retorno elástico para amostras dobradas em temperatura ambiente e em alta temperatura (em torno de 400°C). Para o raio de dobra igual a 10 mm, o resultado médio para o primeiro caso apresentou $102,55^{\circ}$, e para o segundo $99,13^{\circ}$. A utilização de altas temperaturas, para esse caso, representou, portanto, uma diminuição de 3,33%.

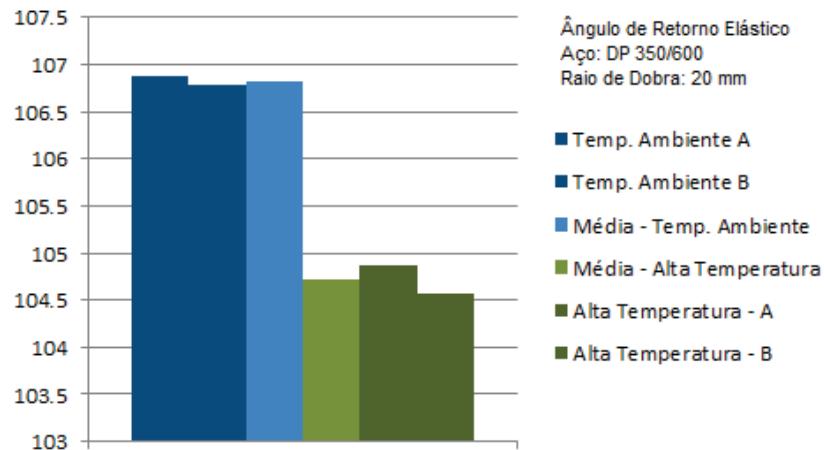
FIGURA 88 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO DP 350/600 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 10 MM



FONTE: O autor (2016).

Para os casos dobrados em raio de dobra de 20 mm, a diminuição observada foi 1,98% do ângulo de retorno elástico medido em alta temperatura com relação ao da dobra em temperatura ambiente (FIGURA 89).

FIGURA 89 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO DP 350/600 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 20 MM

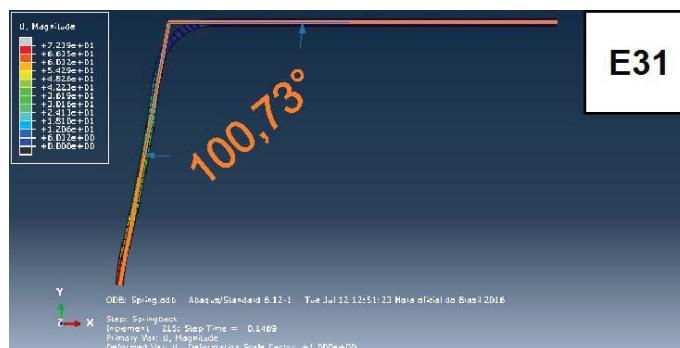


FONTE: O autor (2016).

4.3.2.2. Resultados Computacionais

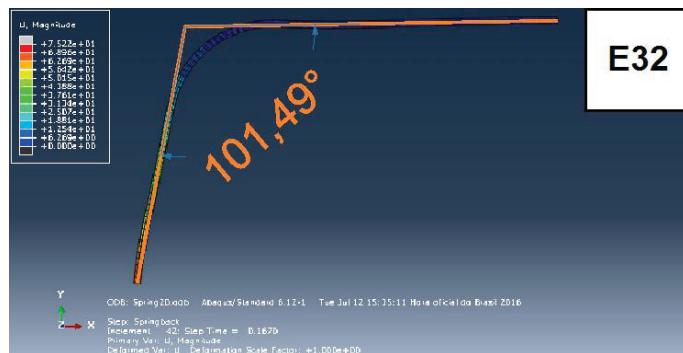
Os resultados advindos das simulações computacionais para o aço DP 350/600 estão contemplados na série de figuras de FIGURA 90 a FIGURA 97.

FIGURA 90 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E31



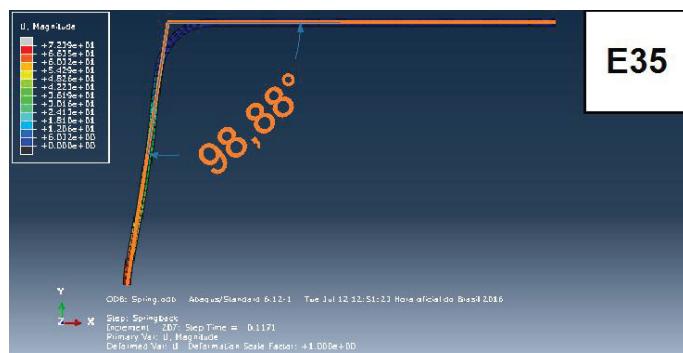
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 91 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E32



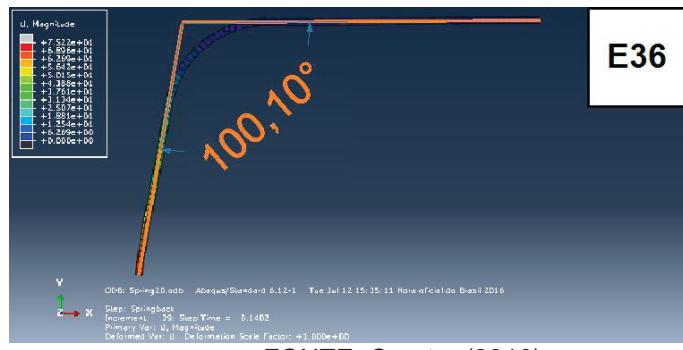
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 92 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E35



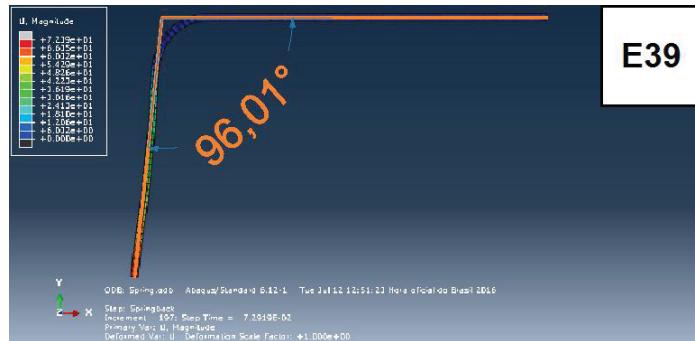
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 93 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E36



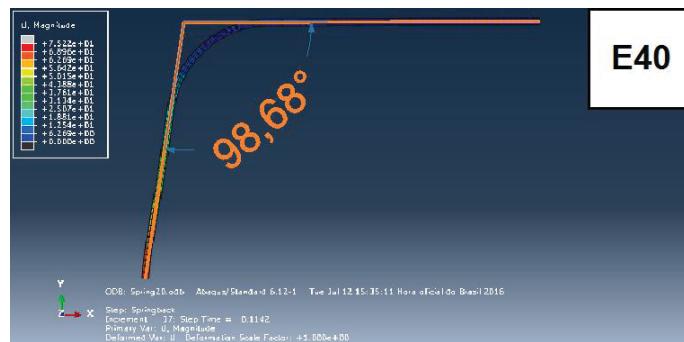
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 94 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E39



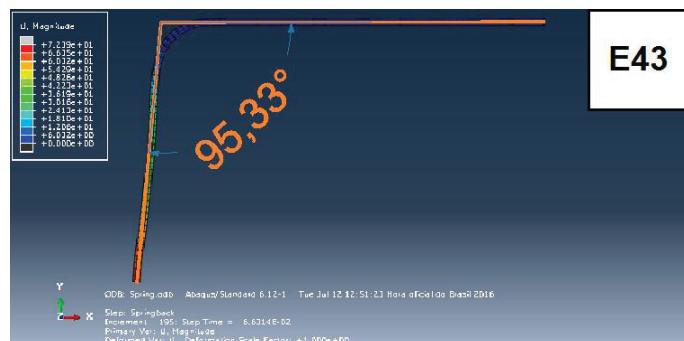
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 95 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E40



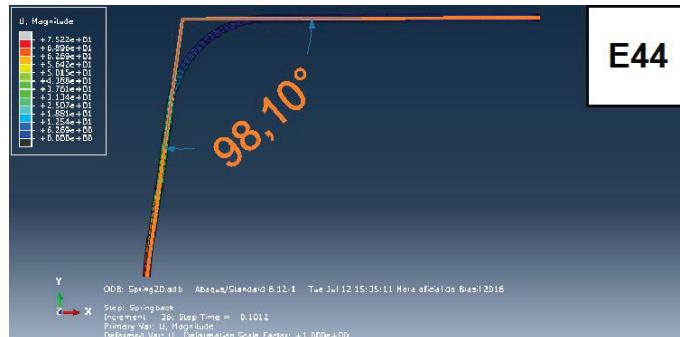
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 96 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E43



FONTE: O autor (2016).

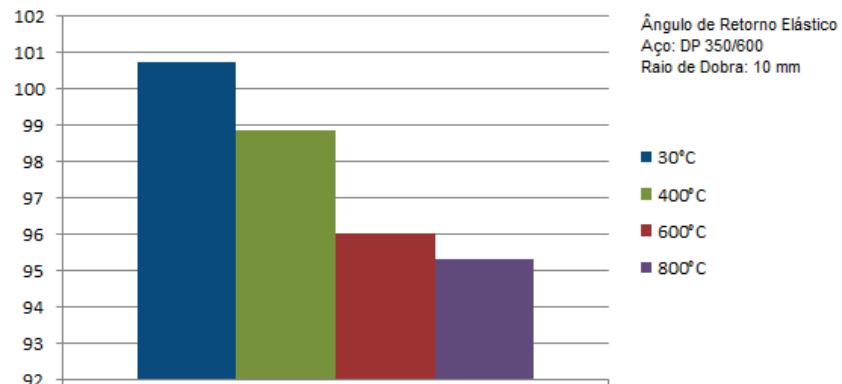
FIGURA 97 – ÂNGULO MEDIDO APÓS RETORNO ELÁSTICO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E44



FONTE: O autor (2016).

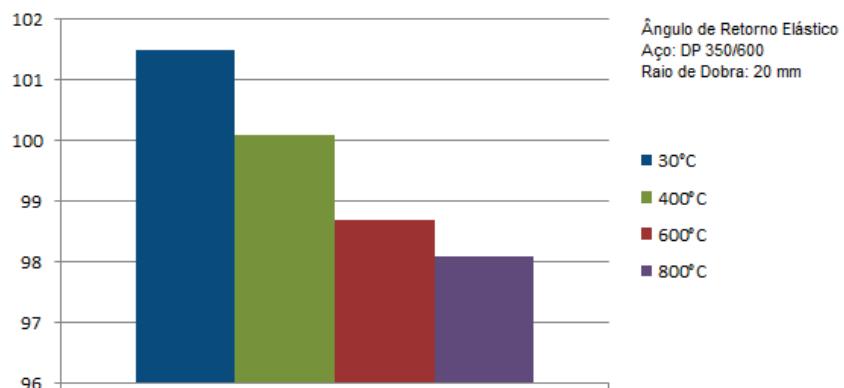
Para os resultados simulados computacionalmente, também no caso do aço DP 350/600 o retorno elástico diminui conforme se aumenta a temperatura, conforme pode ser visualizado na FIGURA 98 (raio de dobra igual a 10 mm) e FIGURA 99 (raio de dobra igual a 20 mm).

FIGURA 98 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO DP 350/600 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 10 MM (SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL)



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 99 – COMPARAÇÃO GRÁFICA DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS NO RETORNO ELÁSTICO DE AÇO HSLA DP 350/600 DOBRADO EM MATRIZ DE RAIO IGUAL A 20 MM (SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL)



FONTE: O autor (2016).

5. CONCLUSÃO

- Conforme apontado pela literatura, o aumento da temperatura tem impacto positivo na diminuição do problema do efeito do retorno elástico em chapas de aço de alta resistência. Esse fenômeno pôde ser observado tanto nos experimentos práticos, quanto nos computacionais.

- O modelo computacional construído para prever o efeito do retorno elástico descreve suficientemente bem a realidade, atingindo valores de proximidade entre 93,8% e 99,7%.

- O aço DP 350/600 apresenta medições de ângulo de retorno elástico maiores que o aço HSLA 350/450 em temperatura ambiente. Entretanto, o aço *dual phase* se mostrou mais sensível ao efeito da temperatura, atingindo valores menores de ângulo de retorno elástico em altas temperaturas nos experimentos práticos. Esse comportamento pôde ser observado nos dois níveis estudados de raio de dobra.

- Os experimentos práticos para levantamento dos limites de conformação (método de Nakazima) demonstraram que o impacto do aumento da temperatura é negativo em relação aos limites de conformação, no caso dos dois aços estudados, para os dois níveis de temperatura verificados.

- O modelo computacional construído e o Método do Gradiente de Espessura previram Curvas Limite de Conformação mais baixas que as construídas com os experimento práticos. Para ambos os aços a proporção de tal diminuição se mostrou equivalente. Esse fato decorre, provavelmente, da dificuldade em se prever a estrição durante os experimentos práticos.

- O modelo computacional construído e o método empregado para previsão de estrição se mostraram equivalentes à realidade na resposta à alta temperatura empregada. Ou seja, para o modelo computacional, o impacto da temperatura 400°C também é negativo.

- As outras duas temperaturas estudadas com a utilização do método numérico mostraram comportamento adverso em relação à de 400°C. Ao contrário, desta, o impacto da elevação da temperatura para níveis maiores não foi sempre negativo. No caso do aço HSLA 350/450, a CLC da temperatura de 800°C se mostrou muito próxima à CLC da temperatura ambiente, enquanto a de 600°C se aproximou muito da CLC para 400°C. No caso do aço DP 350/600, ambas as curvas

para níveis maiores de temperatura se mostraram significativamente acima da CLC construída com a utilização da temperatura de 400°C.

- Suspeita-se, portanto, que para níveis maiores de temperatura que os alcançados nos experimentos práticos os limites de conformação de ambos os aços estudados podem ser mantidos sem perdas.

- No caso da suspeita acima ser verdadeira, é provável que existam níveis de temperatura ótimos para cada aço, em termos de diminuição do retorno elástico sem perdas significativas de limites de conformação.

5.1. Sugestões de trabalhos futuros

- Construir estrutura capaz de manter a temperatura constante durante o Ensaio Nakazima, e também durante os ensaios de dobramentos simples.
- A partir do desenvolvimento de estrutura adequada, investigar experimentalmente o impacto de temperaturas entre 400°C e 800°C nos limites de conformação de aços de alta resistência.
- Para ensaios em que sejam atingidas temperaturas superiores à de austenitização dos aços, verificar a mudança microestrutural ocorrida, a fim de investigar a influência da microestrutura nos eventos estudados.

REFERÊNCIAS

- ABAQUS, Inc. **ABAQUS Theory Manual**, version 6.9, 2009.
- ALUMATTER, **Swift Cup Test: Earing**. European Aluminium Association and Matter, The University of Liverpool, 2010. Disponível em: <http://aluminium.matter.org.uk/>.
- ANDERSSON, A. **Numerical and experimental evaluation of springback in a front side Member**, J. of Mat. Proc. Tech., v. 169, p. 352–356, 2005.
- ARCELORMITTAL, 2012. **Dual Phase and Complex Phase steels**. Automotive Worldwide. Disponível em www.arcelormittal.com/automotive/sheets, acessado em 25/02/2013.
- ASM INTERNATIONAL, **High-strength low-alloy steels**. Alloying: Understanding the Basics, Estados Unidos, p. 193-203, 2001.
- ATZEMA, E.H. **Formability of sheet metal and sandwich laminates**. PhD thesis, University of Twente, 1994.
- BASTOS, A. L. **Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- BRESCIANI FILHO, E. **Conformação plástica dos metais**. Editora da Unicamp, 6^a edição, 2011.
- BURCHITZ, I.A. **Improvement of Springback Prediction in Sheet Metal Forming**. Tese de doutorado, Universidade de Twente, Holanda, 2008.
- BURFORD, D. A.; NARASIMHAN, K.; WAGONER, R. H. **A theoretical sensitivity analysis for full-dome formability tests: parameter study for n, m and r**. A Metallurgical Transactions, v. 22, p. 1775 – 1799, 1991.
- CALDIN, R. **Estudo da conformabilidade na hidroconformação de recortes de chapas de aço soldados a laser**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2006.
- CHEMIN FILHO, R. A. **Estudo da fratura de aços de nova geração DP600 através de variação de pressão no prensa-chapas**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- DIETER, G. E. **Workability Testing Techniques**. ASM Int., 1984.
- EVANGELISTA, S. H. **Diagramas de limite de conformação aplicados à análise por elementos finitos de um processo de estampagem em chapas metálicas**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

GHOSH, A. K. The influence of strain hardening and strain-rate sensitivity on sheet metal forming. Journal of Engineering Materials and Technology, 1977.

GIPIELA, M. L. Estudo da expansão de furos e conformabilidade de chapas de aço multifásico CPW800. Tese de doutorado, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

GIPIELA, M. L.; WOELLNER, N.; NIKHARE, C. P.; MARCONDES, P. V. P. Experimental and numerical analysis on strain development during hole expansion. 4^a Conferência Internacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre, 2014.

GOMES, I. R. Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface. Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2001.

GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. Corte e Conformação de Metais, p. 26-57. Dezembro 2008.

GORNI, A. A. A metalurgia por trás dos aços avançados de alta resistência. Revista IH, p. 39. 2011.

GORNI, A. A. Novas tendências no processo de estampagem a quente. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

GOUD, R. R.; PRASAD, K. E.; SINGH, S. K. Formability limit diagrams of extra-deep-drawing steel at elevated temperatures. Procedia Materials Science, v. 6, p. 123-128. 2014.

GRONOSTAJSKI, J. e DOLNY, A. Determination of Forming Limit Curves by Means of Marciniaik Punch. Memoires Scientifiques Rev.Met., p.570-578, 1980.

GUNNARSSON, L.; SCHEDIN, E. Improving the properties of exterior body panels in automobiles using variable blank holder force. J. of Mat. Proc. Tech., v. 114. p. 168-173. 2001.

HAUS, S. A. Influência do efeito Bauschinger no retorno elástico em aços avançados de alta resistência. Dissertação de Mestrado, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2011.

HUSSAINI, S. M.; SINGH, S. K.; GUPTA, A. K. Formability and fracture studies of austenitic stainless steel 316 at different temperatures. Journal of King Saud University, v. 26, p. 184-190, 2014.

HUSSAINI, S. M.; KRISHNA, G.; GUPTA, A. K.; SINGH, S. K. Development of experimental and theoretical forming limit diagrams for warm forming of austenitic stainless steel 316. Journal of Manufacturing Processes, v. 18, p. 151-158, 2015.

KEELER, S. P. General techniques to minimize springback. Metal Forming Magazine, v. 42, 2008.

KEELER, S P. **Training manual enhanced FLC project – The bead correction factor.** 2002.

KEELER, S. P. **Understanding Sheet Metal Formability.** Machinery, 1968.

KIM, H. J.; CHOI, S. C.; LEE, K. T. KIM, H. Y. **Experimental Determination of Forming Limit Diagram and Springback Characteristics of AZ31B Mg Alloy Sheets at Elevated Temperatures.** Materials Transaction, v. 49, p. 1112-1119, 2008.

LAJARIN, S. F. **Influência da variação do módulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência.** Tese de Doutorado, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

LANGE, K. **Forming Handbook.** New York: McGraw Hill and SME, 1993.

LAURENT, H.; RIO, G.; BLE'S G. **Asynchronous interface between a finite element commercial software ABAQUS and an academic research code HERZHH++.** Advances in Engineering Software, v. 39, p.1010–1022, 2008.

LI, K. P.; CARDEN, W. P; WAGONER, R.W. **Simulation of springback,** Int. J. of Mechanical Sciences, v. 44, p. 103–122, 2002.

LEE, J.; LEE, K.; KIM, D.; CHOI, H.; KIM, B. **Spring-back and spring-go behaviors in bending of thick plates of high-strength steel at elevated temperature.** Computational Materials Science, v. 100, p.76-79, 2014.

LUNA M. **Tesis doctoral en contribución al estudio del proceso de doblado al aire de chapamodelo de predicción el ángulo de recuperación y el radio de doblado final,** pág. 57, Departament d'Enginyeria Mecánica i de la Construcción Industrial, Universita de Girona, GIRONA, 2005.

MAKINOUCHI, A.; E. NAKAMACHI, E. ONATE, R.H. WAGONER. Proceedings of the 2th international conference and workshop on numerical simulation of 3D sheet metal forming processes, NUMISHEET 1993, Isehara, Japan, 1993.

MAKINOUCHI, A. **Recent developments in sheet metal forming simulation.** Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications (K.-I. Mori, ed.), pp. 3_10, Swets & Zeitlinger, 2001.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.L.; HU, S.J. **The mechanics of sheet metal forming.** Butterworth-Heinemann, 1992.

MARCONDES, P. V. P. **Curvas limites de conformação – CLC.** Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, 2009.

MARCONDES, P. V. P. **Propriedades mecânicas fundamentais.** Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, 2009.

MATTIASON, K.; BEMSPANG, L.; HAMMAN T. **Evaluation of a dynamic approach using explicit integration in 3-D sheet forming simulation.** Numerical Methods in Industrial Forming Process, p. 55-66, Rotterdam, 1992.

NAKAZIMA, K.; KIKUMA, T.; HASUKA, K. **Study on Formability of Steel Sheets.** Yawata Tech. Rep., pp141, 1968.

NETTO, S. E. S. **Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação.** Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas Metalurgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEM - UFRGS), Porto Alegre, 2004.

NIKHARE, C., MARCONDES, P. V. P., WEISS, M., HODGSON, P. D. **Experimental and numerical evaluation of forming and fracture behaviour of high strength steel.** Proceedings of the New Developments on Mettalurgy and Applications of High Strength Steels. Buenos Aires, 2008.

NIKHARE, C.; CHEMIN FILHO, R. A.; TIGRINHO, L. M. V.; MARCONDES, P. V. P. **Influence of blank holding force on the forming limits of DP590 steel.** International Deep-Drawing Research Group Conference, Mumbai, 2012.

OTOMAR, H. P. **Estudo comparativo da estampabilidade da liga de alumínio AA 1050 partindo de placas obtidas por vazamento direto e bobinas obtidas por vazamento contínuo.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

OUAKDI, E. H.; LOUAHDI, R.; KHIRANI, D.; TABOURET, L. **Evaluation of springback under the effect of holding force and die radius in a stretch bending test.** Materials and Design, v. 35, p. 106-112, 2011.

PIAO, P. S. P. **Modelação e simulação numérica de processos de conformação plástica de metais.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010.

RAMALHEIRA, J. M. L. **Comportamento mecânico de peças hidroformadas.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

REBEYKA, C. J. **Influência de parâmetros de processo, ferramenta e temperatura na magnitude do retorno elástico após conformação de aços de alta resistência.** Projeto de Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SACHS, G. **Institute of automobile engineers**, p. 588-589, Londres, 1935.

SAMUEL, M. **Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bendings of anisotropic sheet metals,** J. of Mat. Proc. Tech., v. 105, p. 382-393. 2000.

SCHULER. **Metal Forming Handbook.** Berlin, Springer, 1998.

SHENG, Z. Q.; JIRATHEARANAT, S.; ALTAN, T. **Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing.** International Journal of Machines Tools and Manufacture, v. 44, p. 487-494. 2004.

SINGH, S. K.; MAHESH, K.; KUMAR, A.; SWATHI, M. **Understanding formability of extra-deep drawing steel at elevated temperature using finite element simulation.** Materials and Design, v. 31, p. 4478-4484, 2010.

SOUZA, S. A. **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos.** São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 5^a edição, 1982.

STOUGHTON, T. B. **A general forming limit criterion for sheet metal forming.** International Journal of Mechanical Sciences, vol. 42, pp.1-27, 2000.

TAHERIZADEH, A.; GREEN, D. E.; GHAEI, A. **Simulation of earing using two anisotropic models: quadratic non-associated and non-quadratic associated.** International Deep Drawing Research Group, IDDRG 2009 International Conference, Golden, CO, USA, 2009.

TEPEDINO, J. O. A. **Aplicação de Curvas Limite de Conformação na previsão de rupturas em bordas de peças estampadas.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

TIGRINHO, L. M. V. **Análise da fratura de chapas de aço avançado de alta resistência DP600 quando submetido a diferentes estados de tensões.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

OZTURK, F.; LEE, D. **Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test.** Journal of Materials Processing Technology, 170, pp. 247-253, 2005.

WANHEIM, T. **Design of forming processes: sheet metal forming.** Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2004. **Handbook of metallurgical process design,** p. 23-46. 2004.

WHITELEY, R. L. **The importance of directionality in drawing quality sheet steel.** Forty-first Annual Convention of the Society, Chicago, 1959.

WOELLNER, N. **Influência da força de prensa-chapas no retorno elástico de chapas de aço de alta resistência.** Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

WORLDAUTOSTEEL, Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines,
Versão 4.1, 2009. Disponível em: www.worldautosteel.org.

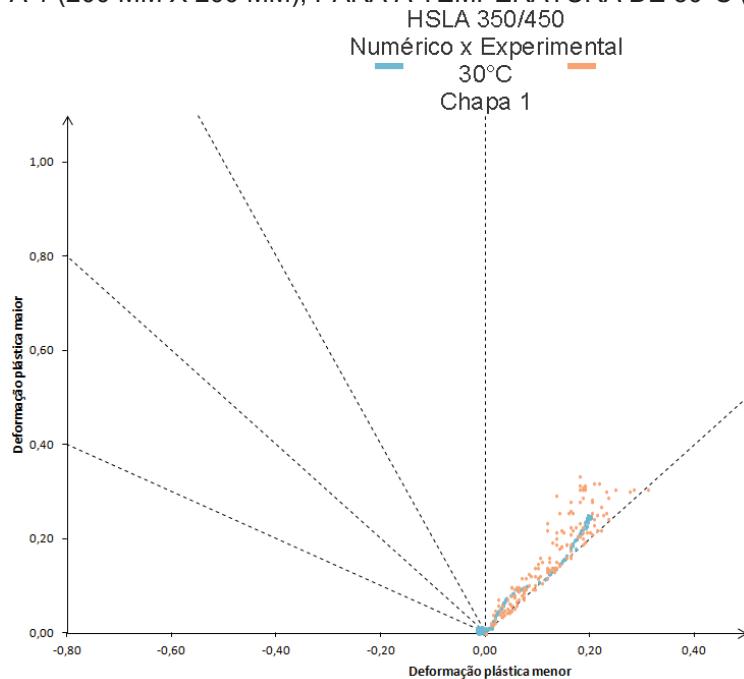
YANAGIMOTO, J.; OYAMADA, K. **Mechanism of springback-free bending of high-strength steel sheets under warm forming conditions.** Annals of the CIRP, v. 56, p. 265-268, 2007.

ZHANG, C.; CHU, X.; GUINES, D.; LEOTOING, L.; DING, J.; ZHAO, G. **Effects of temperature and strain rate on the forming limit curves of AA5086 sheet.** Procedia Engineering, v. 81, p. 772-778, 2014.

ZHENG, Q.; AOYAMA, T.; SHIMIZU, T.; YANG, M. **Experimental and numerical analysis of springback behavior under elevated temperatures in micro bending assisted by resistance heating.** Procedia Engineering, v.18, p. 1481-1486, 2014.

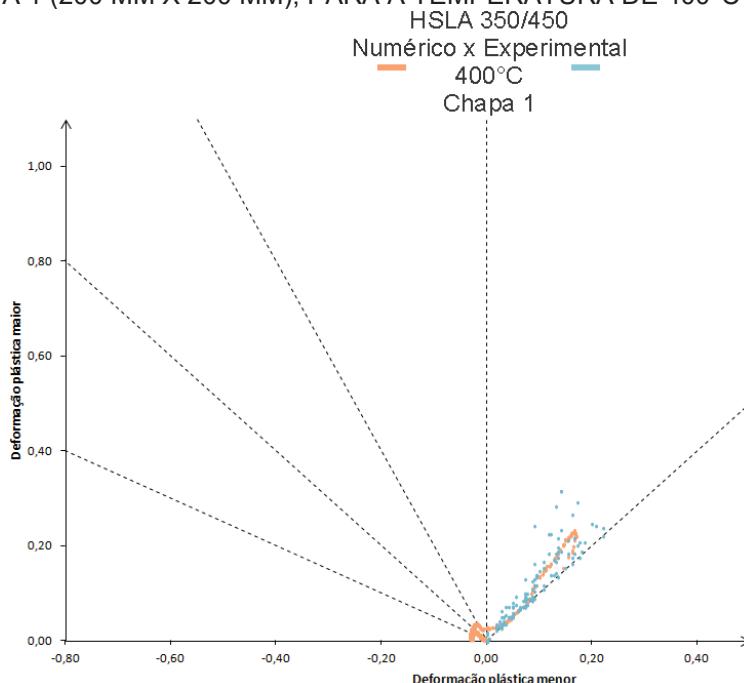
APÊNDICE A – Caminhos de deformação utilizados para construção das CLC experimental e numérica para o aço HSLA 350/450

FIGURA 100 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)



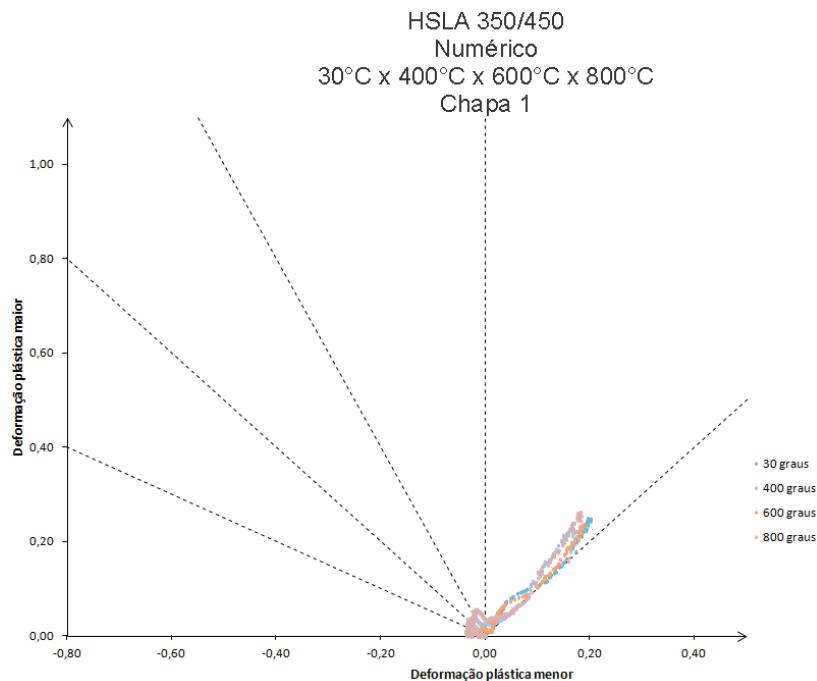
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 101 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)



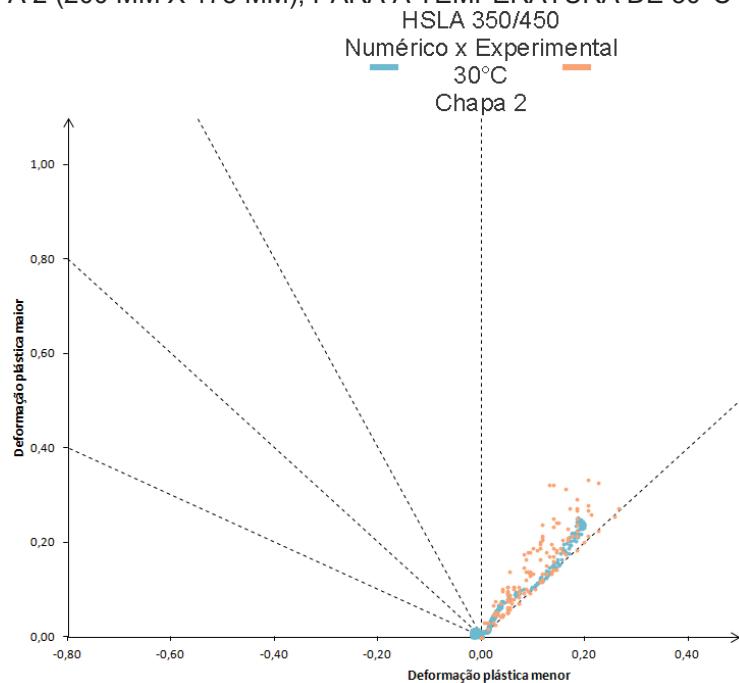
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 102 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)



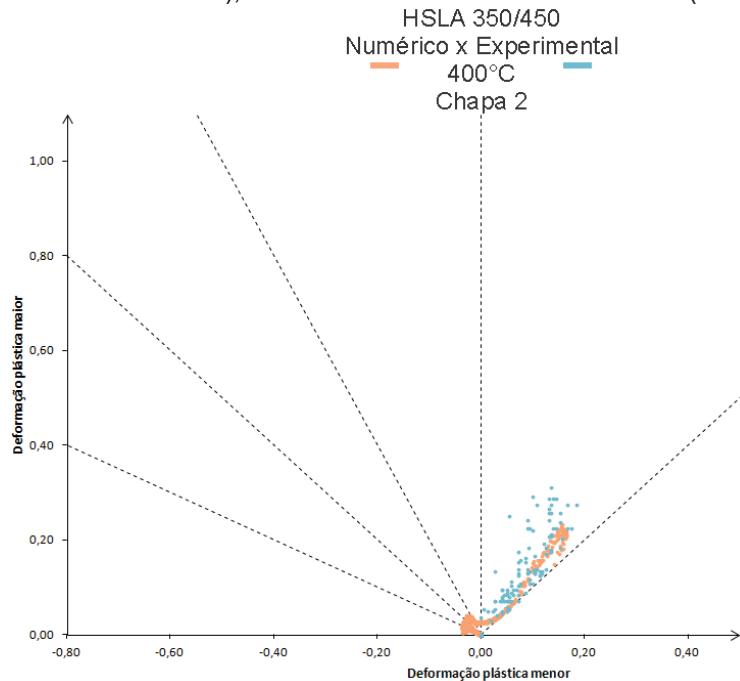
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 103 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)



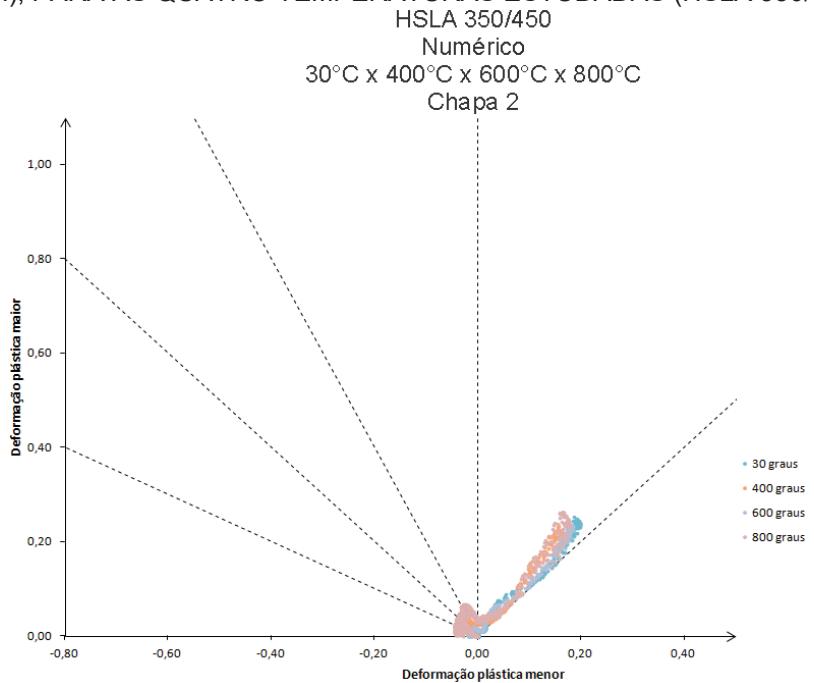
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 104 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)



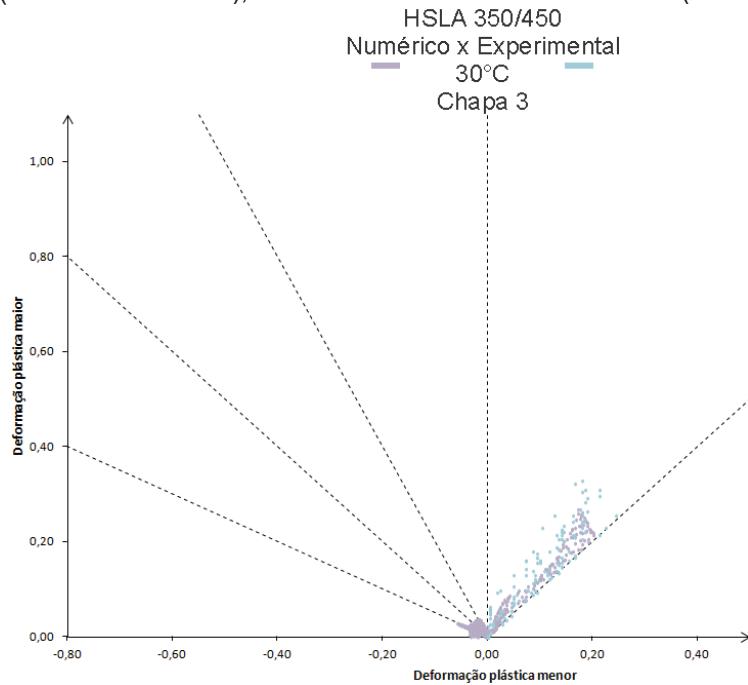
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 105 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)



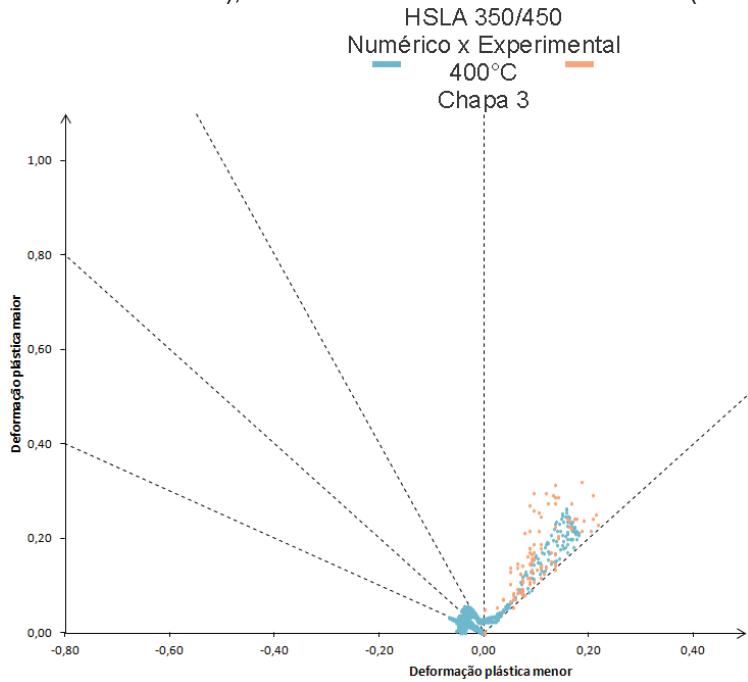
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 106 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)



FONTE: O autor (2016).

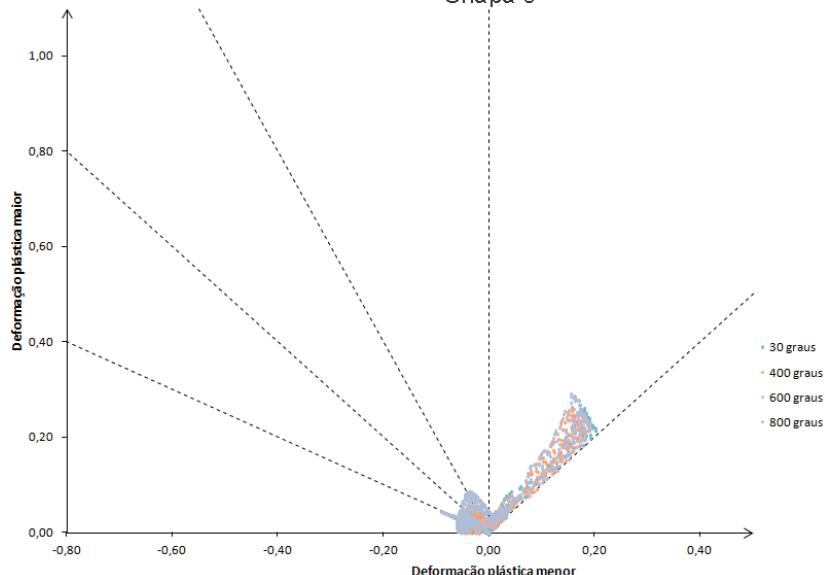
FIGURA 107 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 108 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)

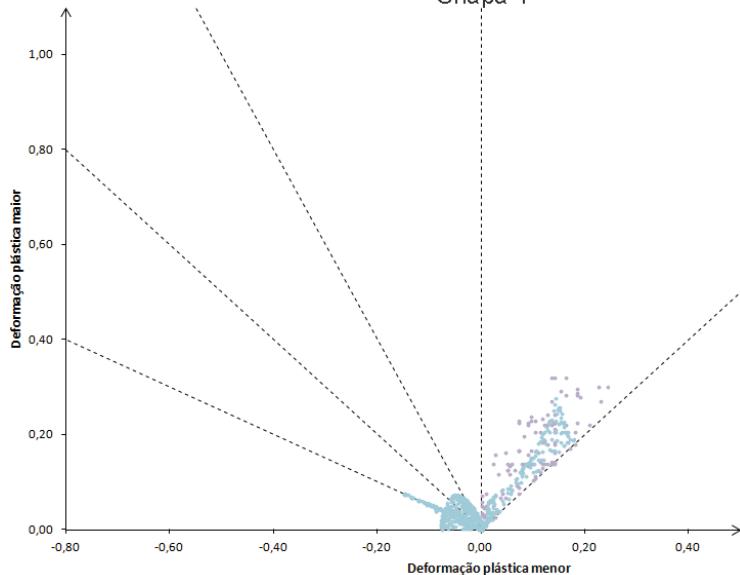
HSLA 350/450
Numérico
30°C x 400°C x 600°C x 800°C
Chapa 3



FONTE: O autor (2016).

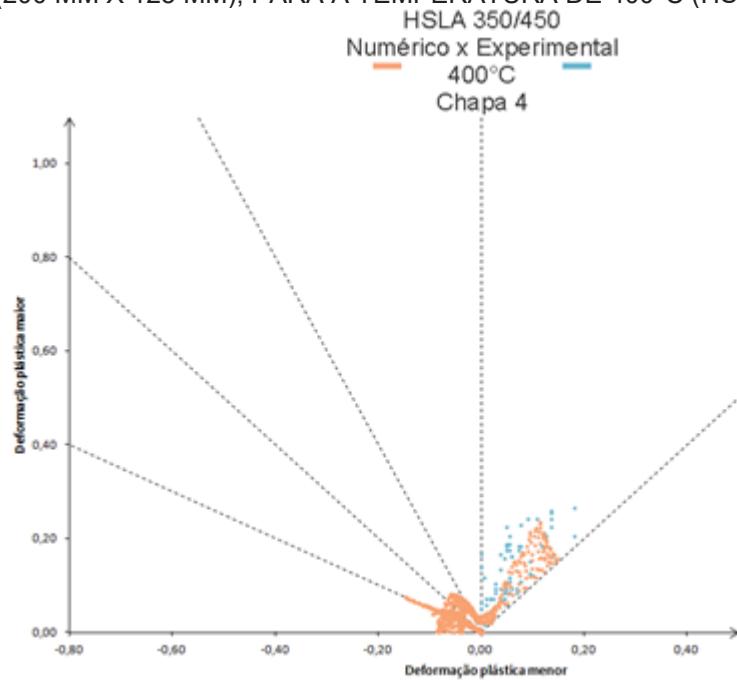
FIGURA 109 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)

HSLA 350/450
Numérico x Experimental
30°C
Chapa 4



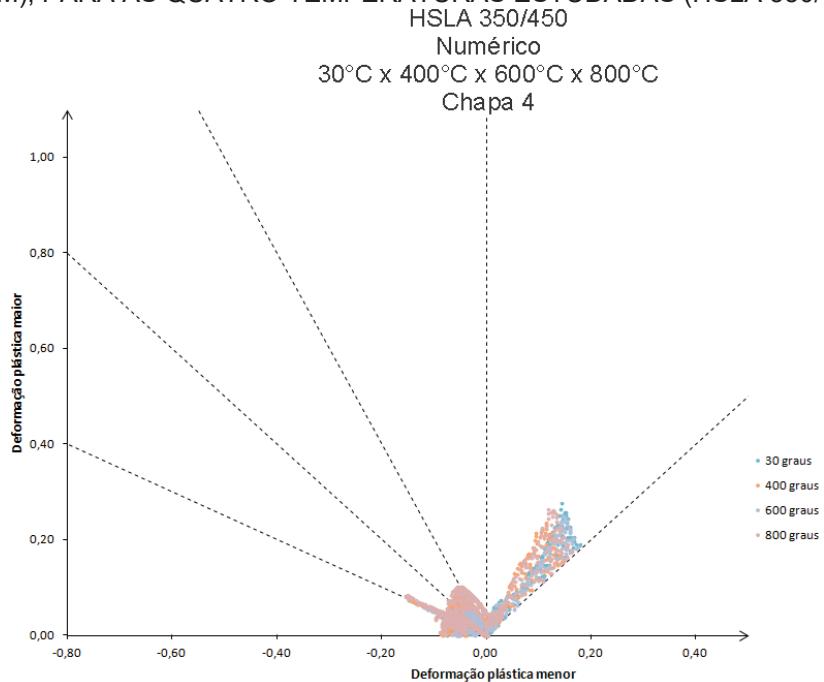
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 110 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)



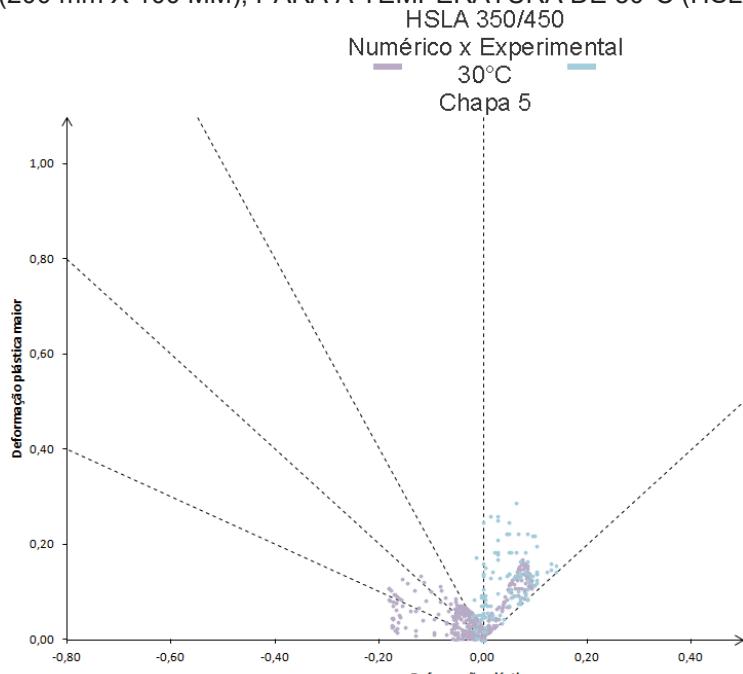
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 111 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)



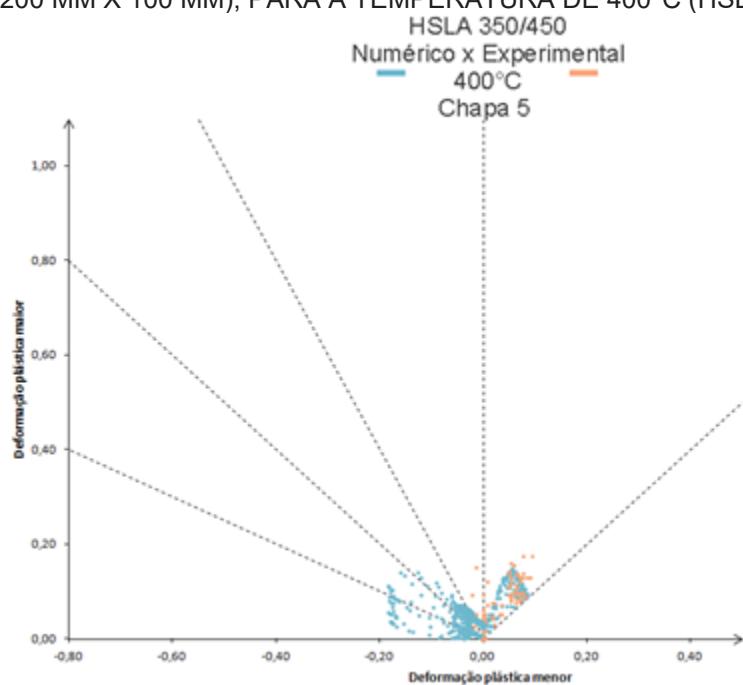
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 112 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 5 (200 mm X 100 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)



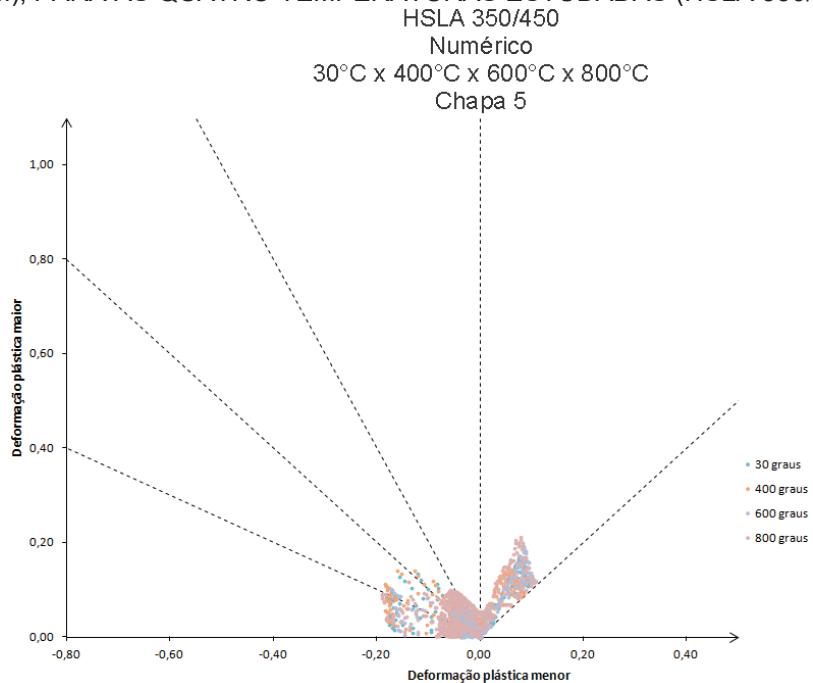
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 113 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 5 (200 MM X 100 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)



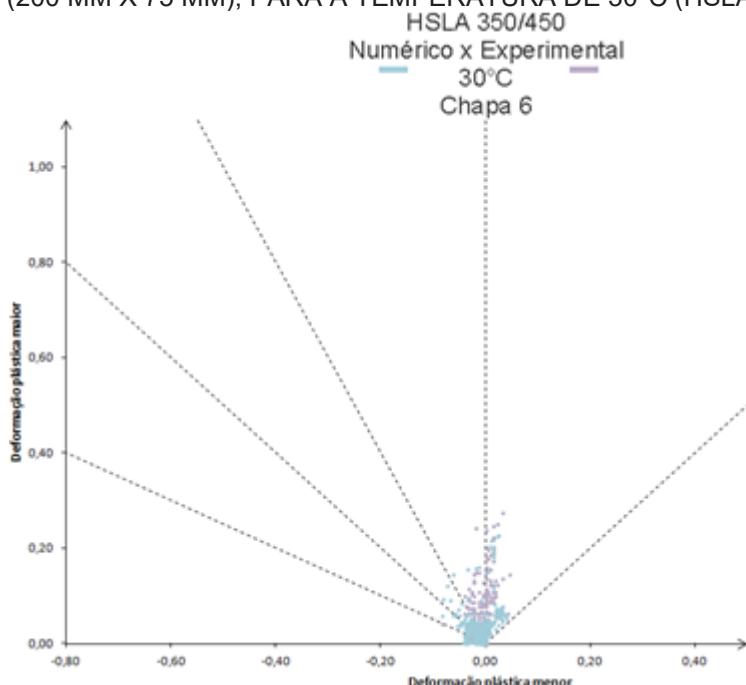
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 114 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 5 (200 MM X 100 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)



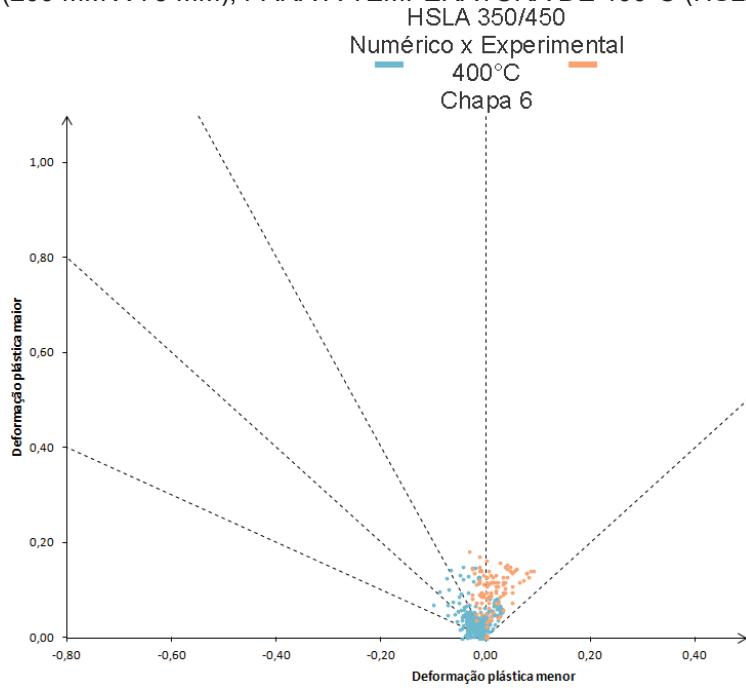
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 115 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)



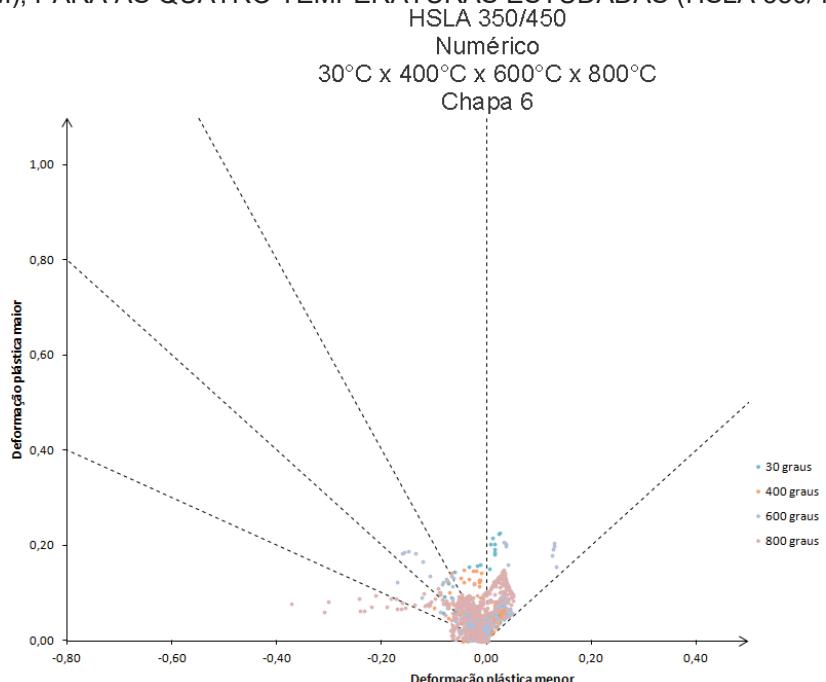
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 116 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)



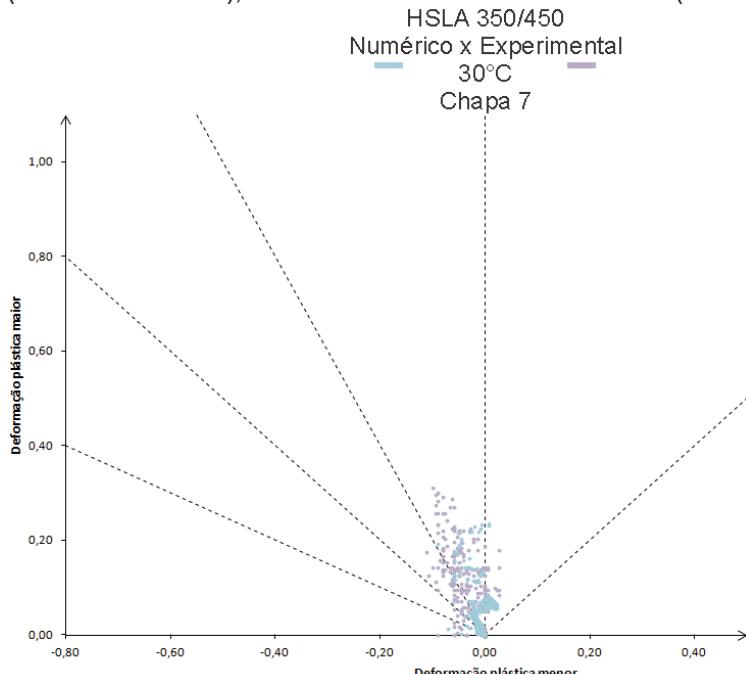
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 117 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)



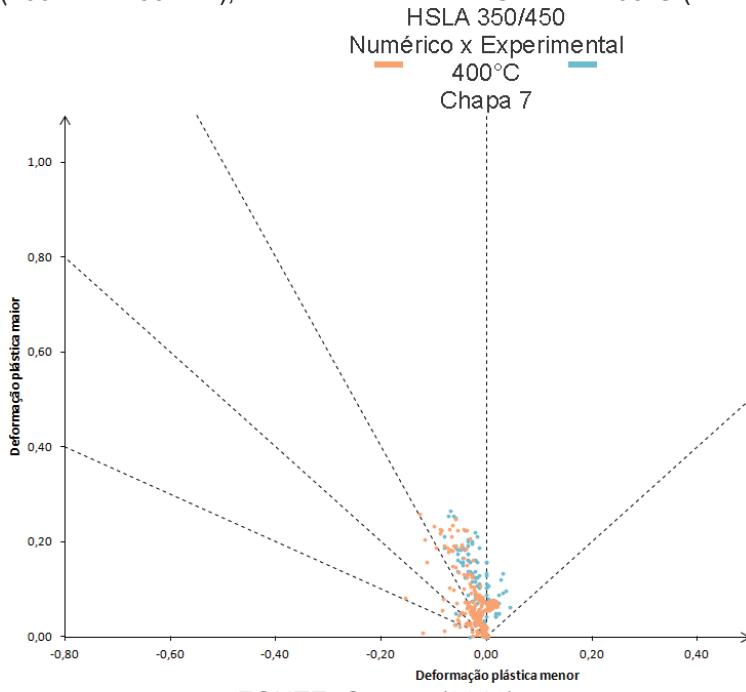
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 118 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 7 (200 MM X 50 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 119 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 7 (200 MM X 50 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)



FONTE: O autor (2016).

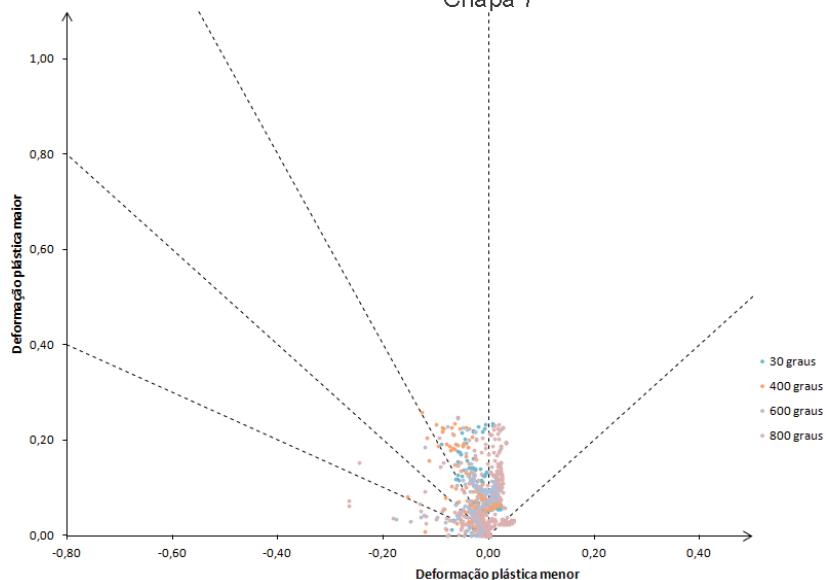
FIGURA 120 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 7 (200 MM X 50 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)

HSLA 350/450

Numérico

30°C x 400°C x 600°C x 800°C

Chapa 7



FONTE: O autor (2016).

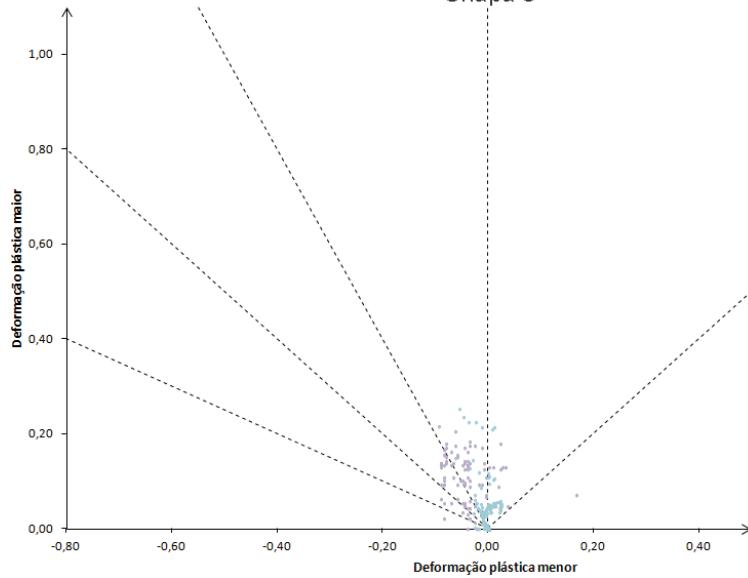
FIGURA 121 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (HSLA 350/450)

HSLA 350/450

Numérico x Experimental

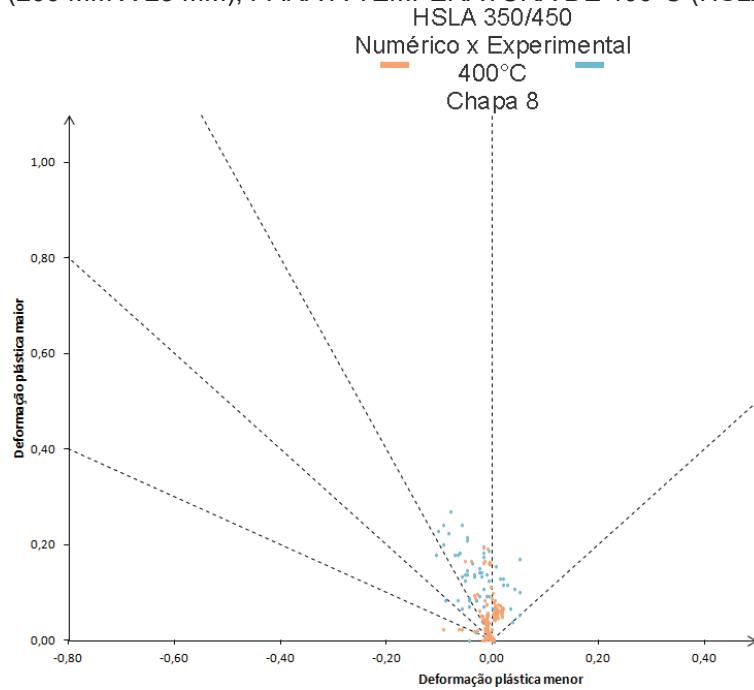
30°C

Chapa 8



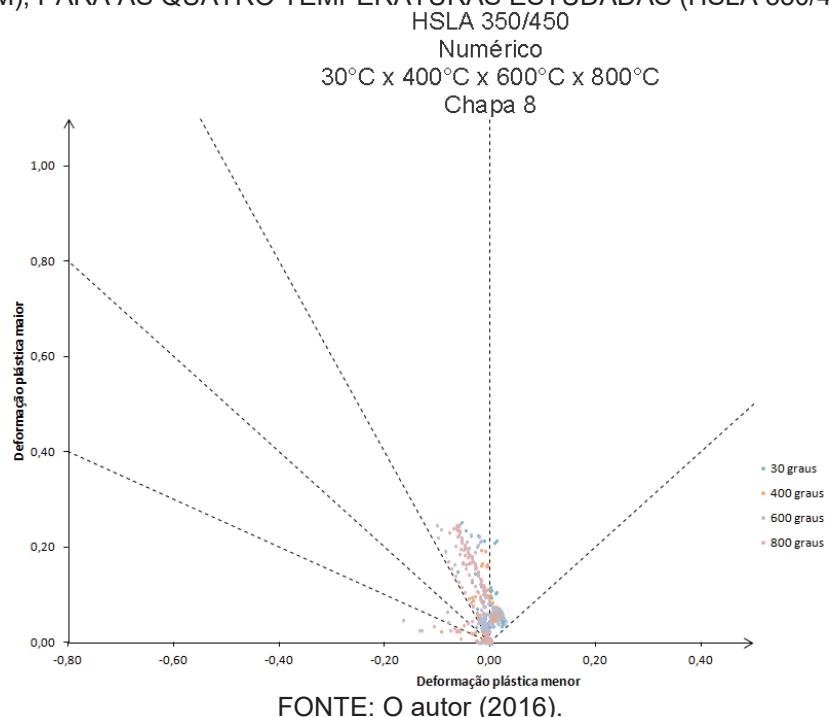
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 122 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (HSLA 350/450)



FONTE: O autor (2016).

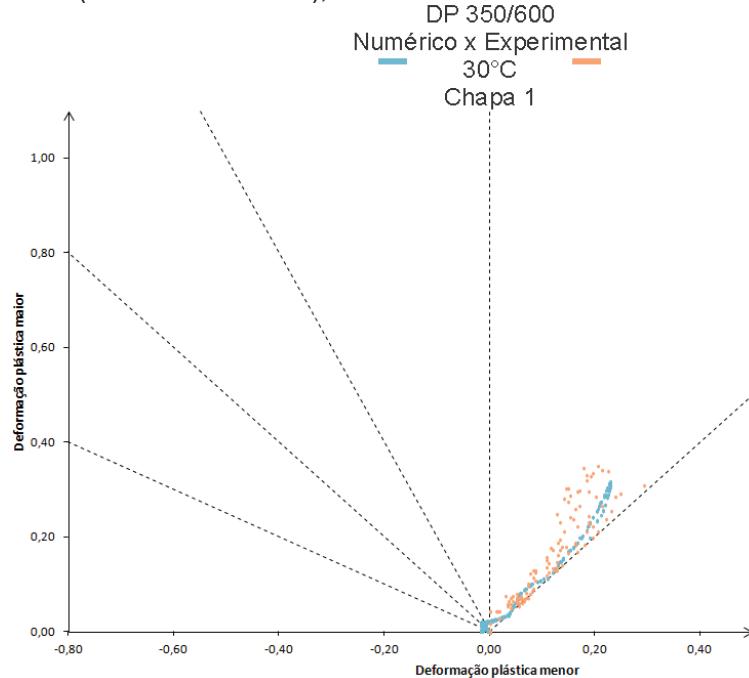
FIGURA 123 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (HSLA 350/450)



FONTE: O autor (2016).

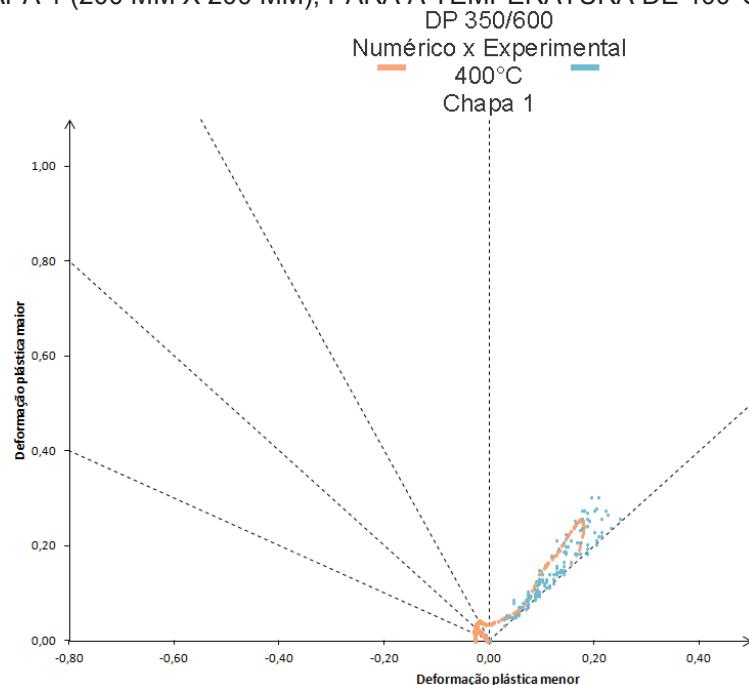
APÊNDICE B – Caminhos de deformação utilizados para construção das CLC experimental e numérica para o aço DP 350/600

FIGURA 124 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)



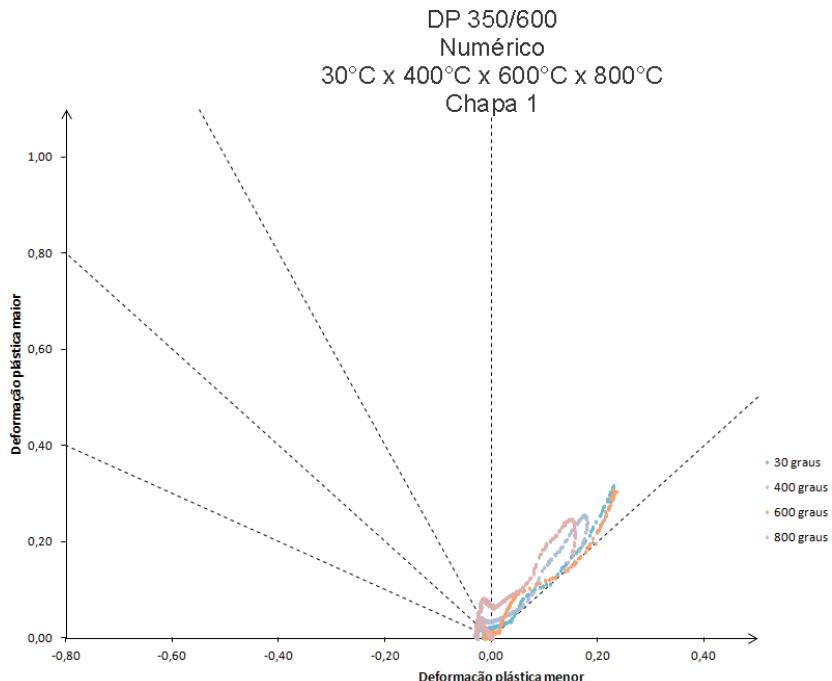
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 125 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600)



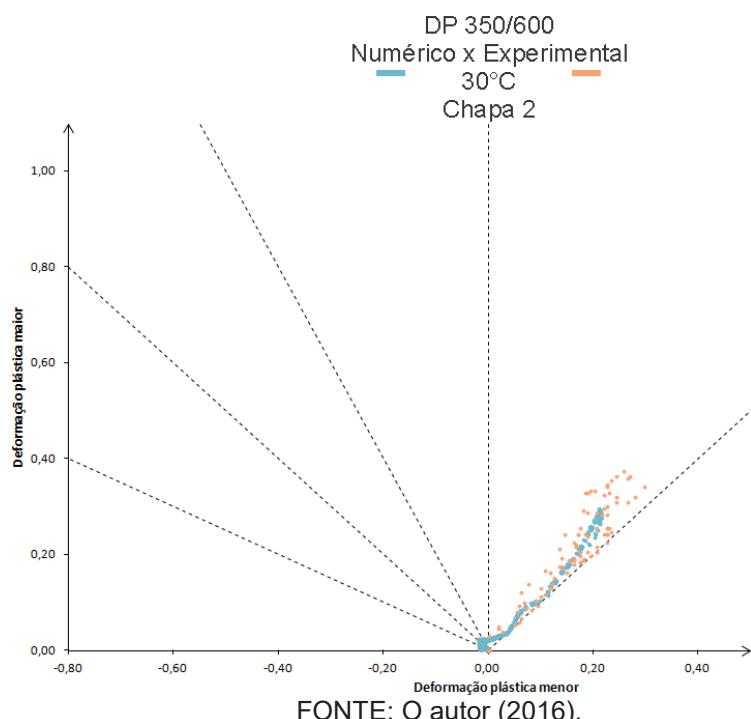
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 126 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 1 (200 MM X 200 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)



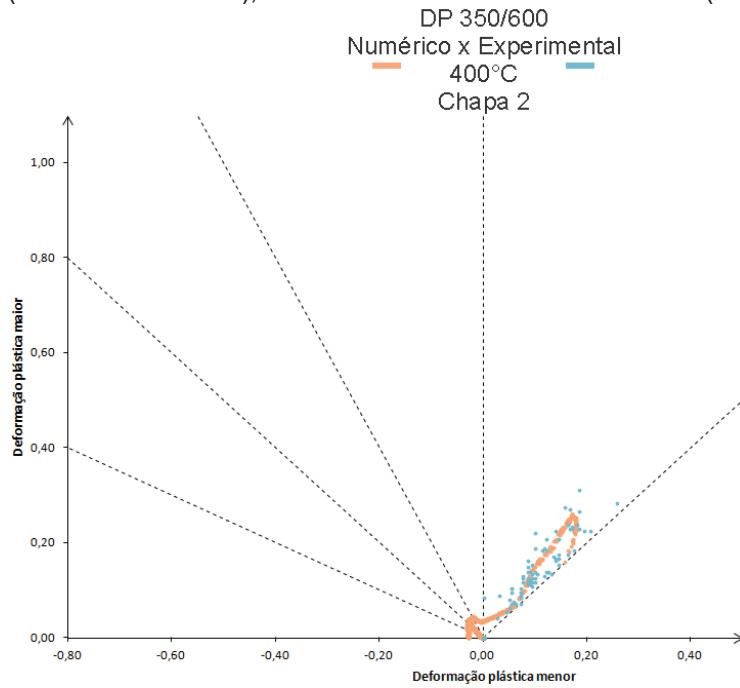
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 127 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)



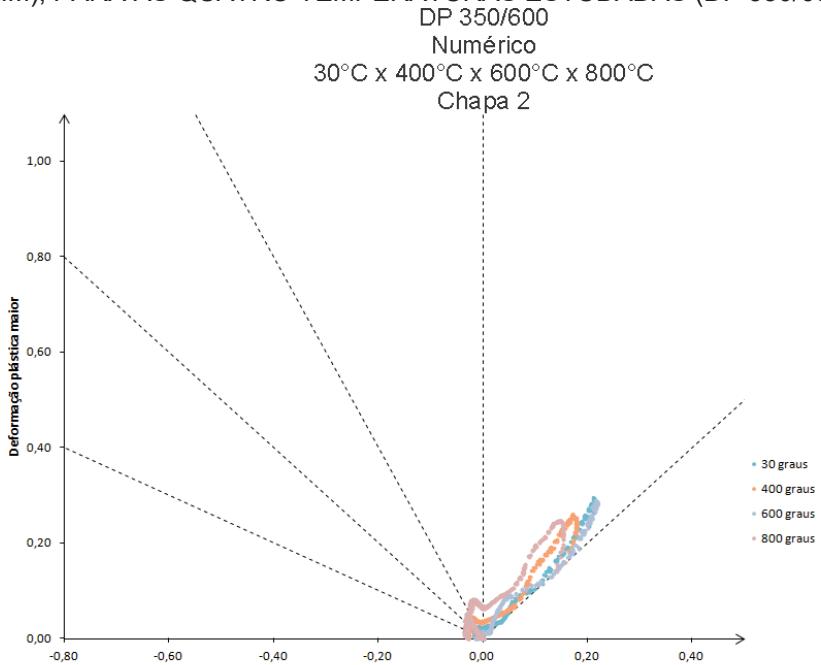
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 128 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600)



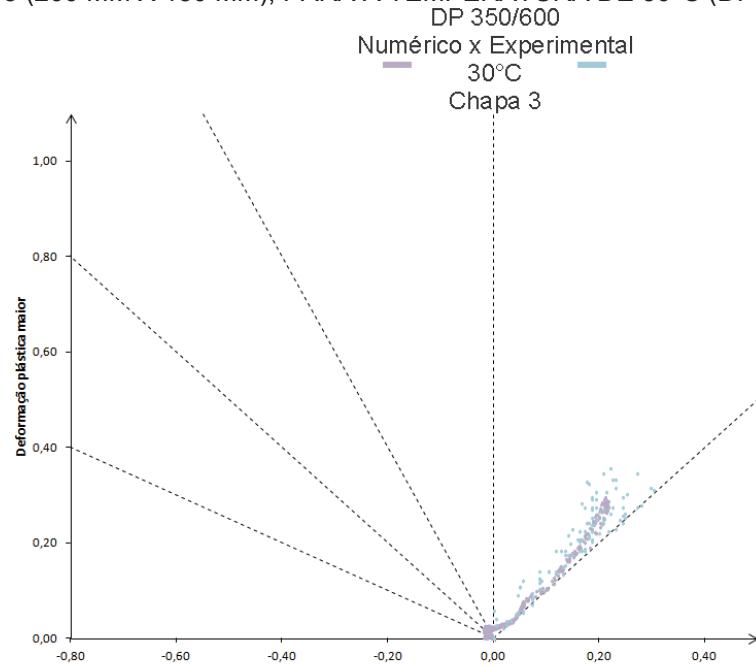
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 129 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 2 (200 MM X 175 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)



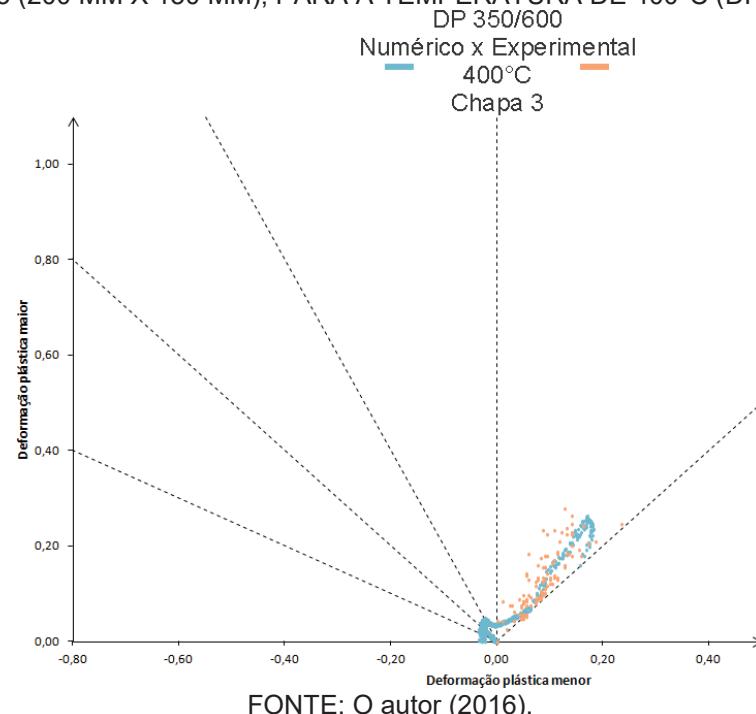
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 130 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 131 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600)



FONTE: O autor (2016).

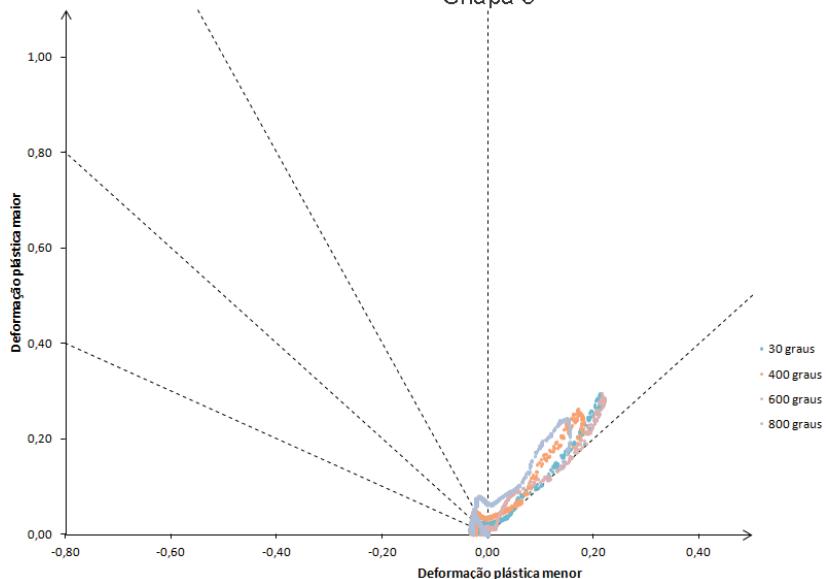
FIGURA 132 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 3 (200 MM X 150 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)

DP 350/600

Numérico

30°C x 400°C x 600°C x 800°C

Chapa 3



FONTE: O autor (2016).

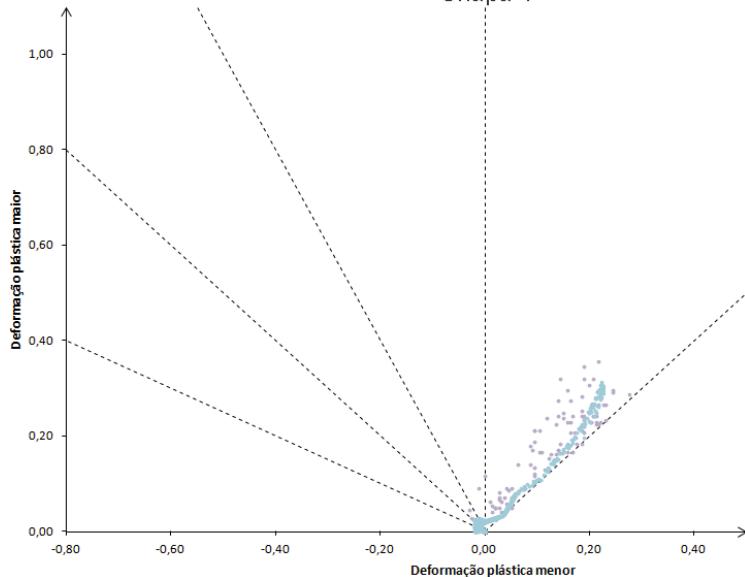
FIGURA 133 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)

DP 350/600

Numérico x Experimental

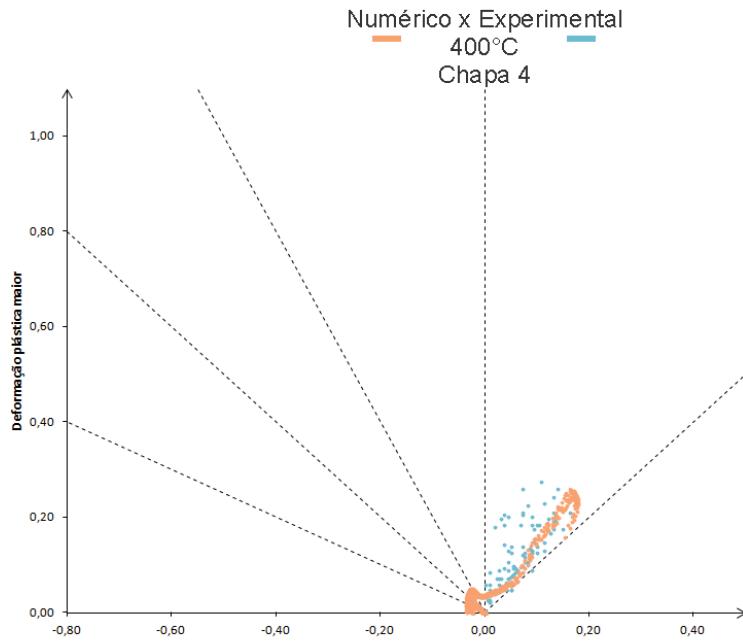
30°C

Chapa 4



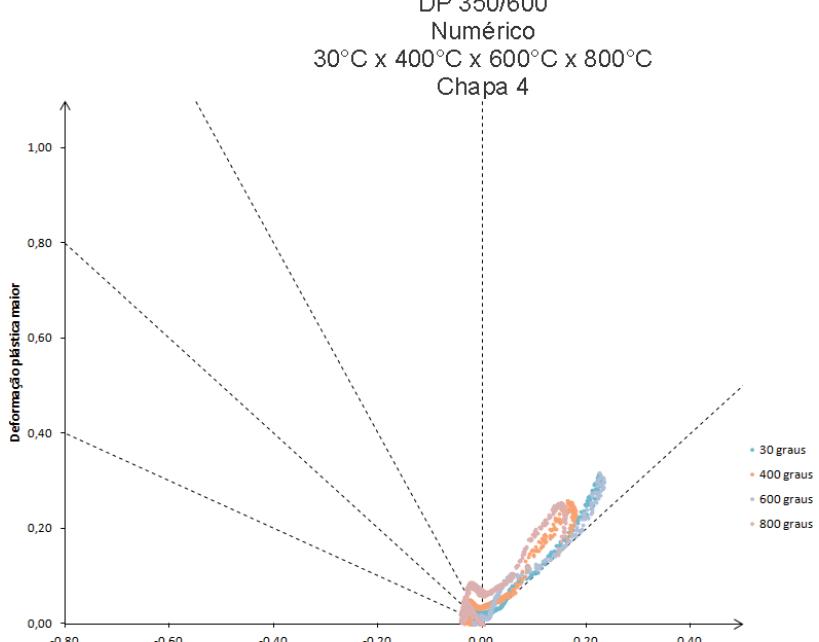
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 134 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600) HSLA 350/450



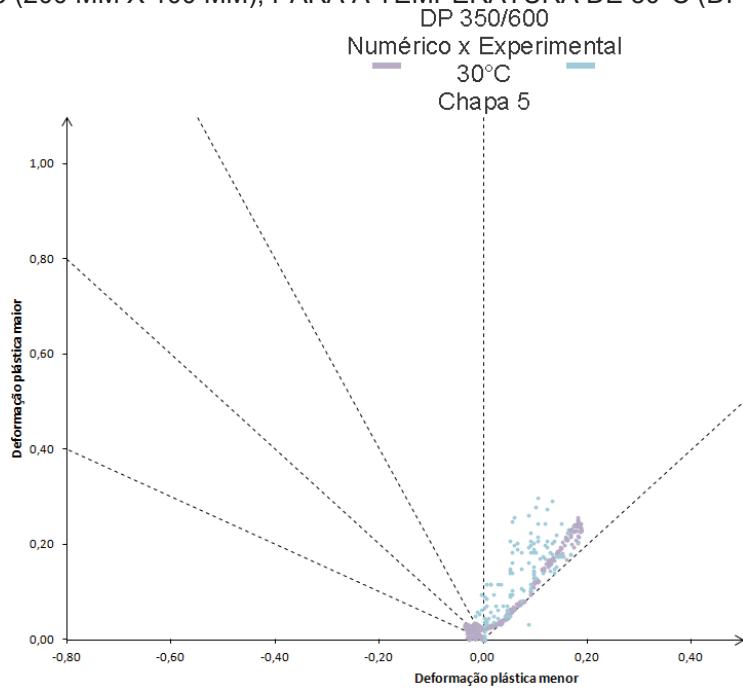
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 135 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 4 (200 MM X 125 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600) DP 350/600



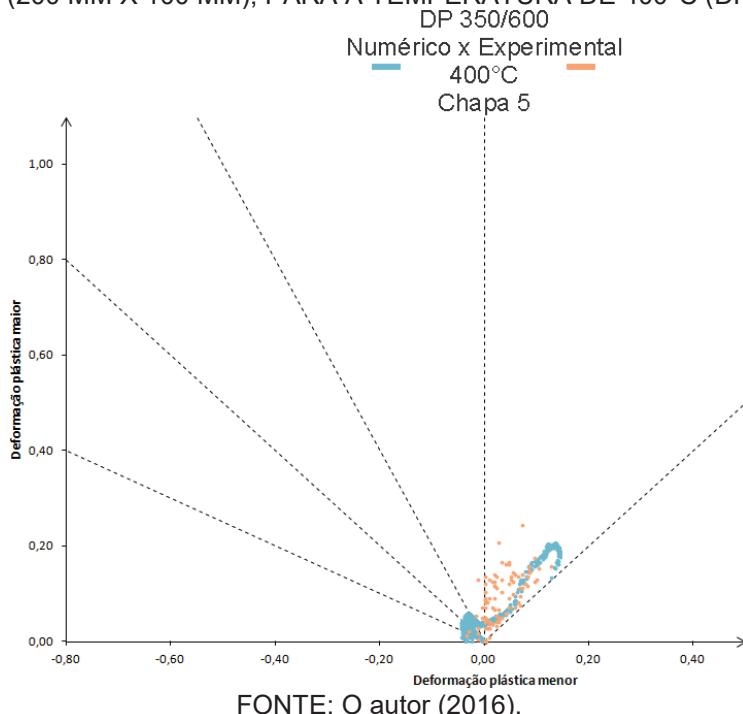
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 136 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 5 (200 MM X 100 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 137 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 5 (200 MM X 100 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600)



FONTE: O autor (2016).

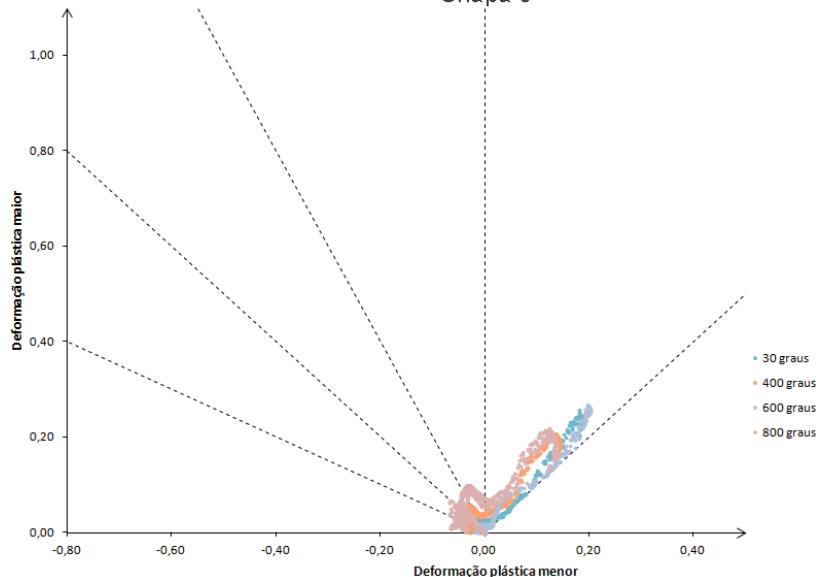
FIGURA 138 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 5 (200 MM X 100 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)

DP 350/600

Numérico

30°C x 400°C x 600°C x 800°C

Chapa 5



FONTE: O autor (2016).

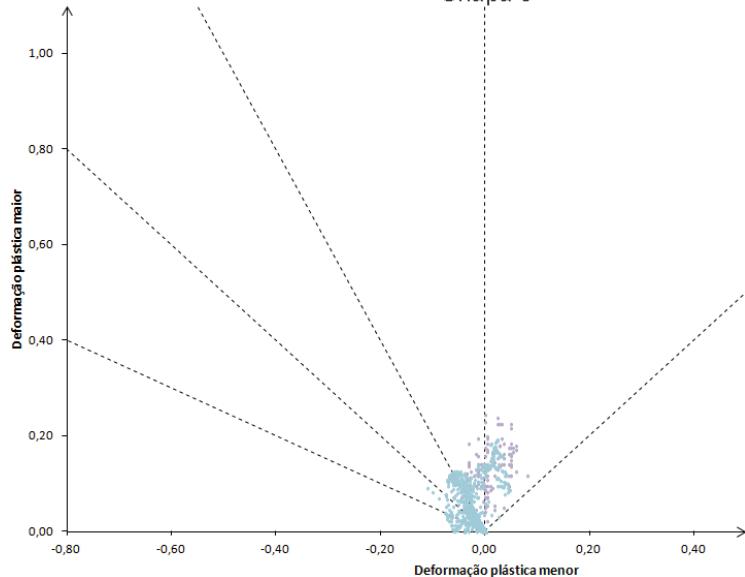
FIGURA 139 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)

DP 350/600

Numérico x Experimental

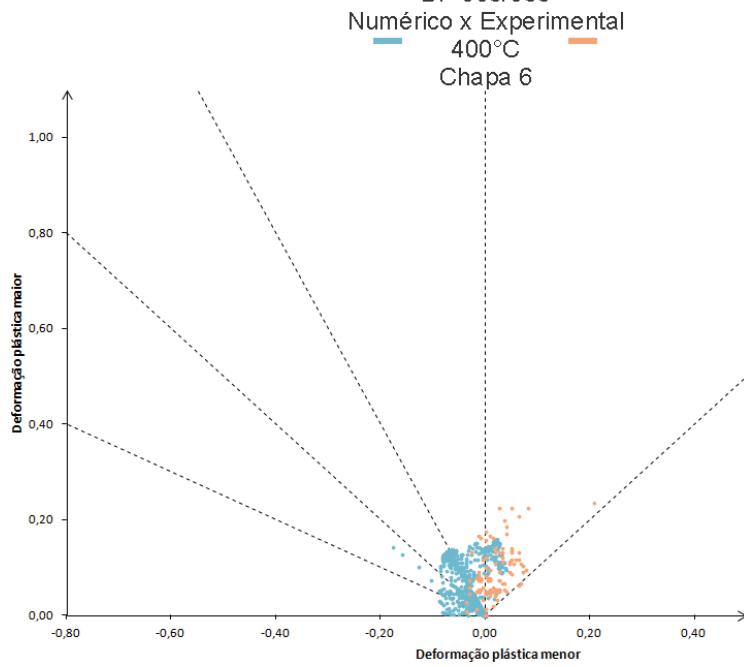
30°C

Chapa 6



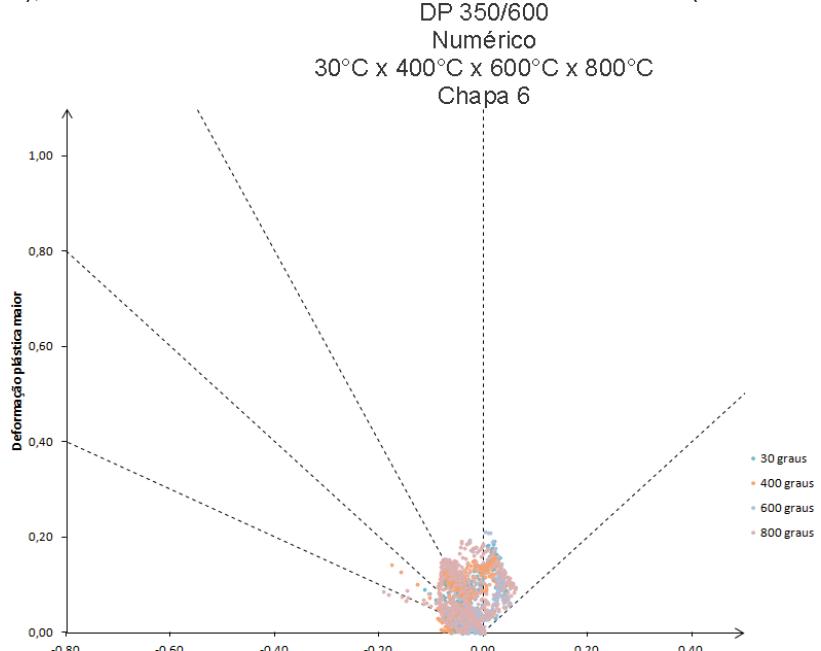
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 140 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600)
DP 350/600



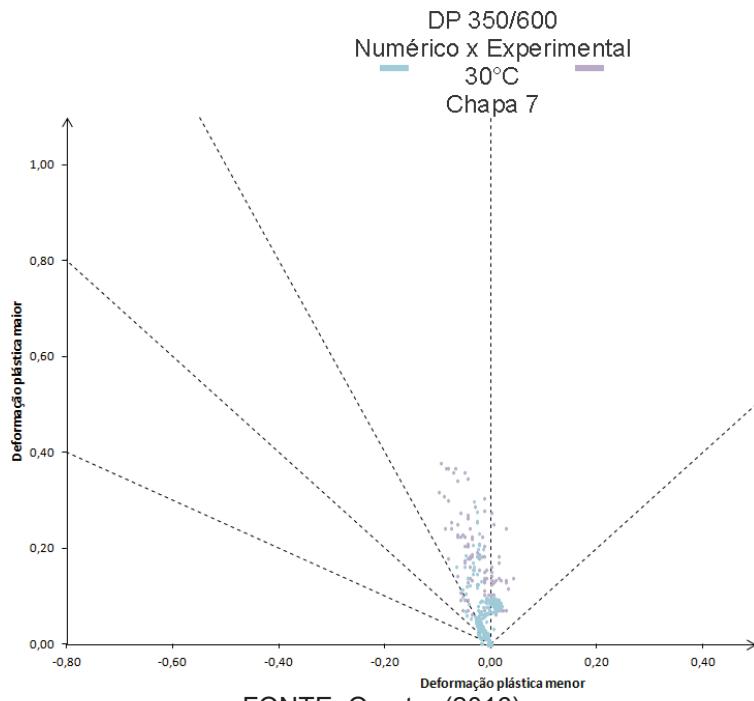
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 141 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 6 (200 MM X 75 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)
DP 350/600



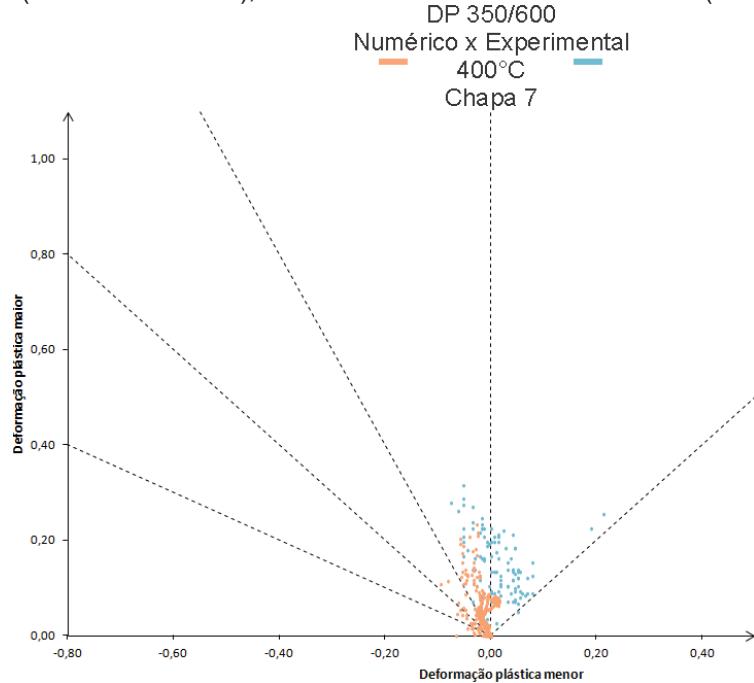
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 142 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 7 (200 MM X 50 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 143 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 7 (200 MM X 50 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600)



FONTE: O autor (2016).

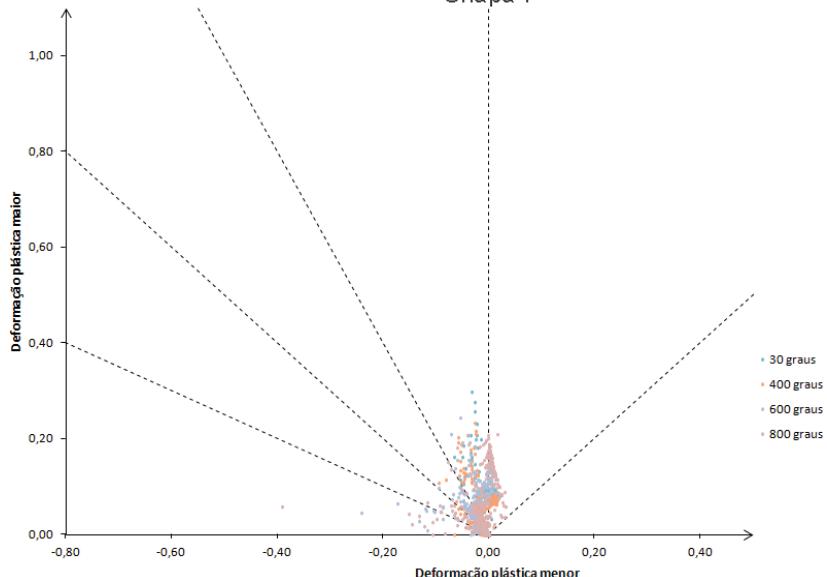
FIGURA 144 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 7 (200 MM X 50 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)

DP 350/600

Numérico

30°C x 400°C x 600°C x 800°C

Chapa 7



FONTE: O autor (2016).

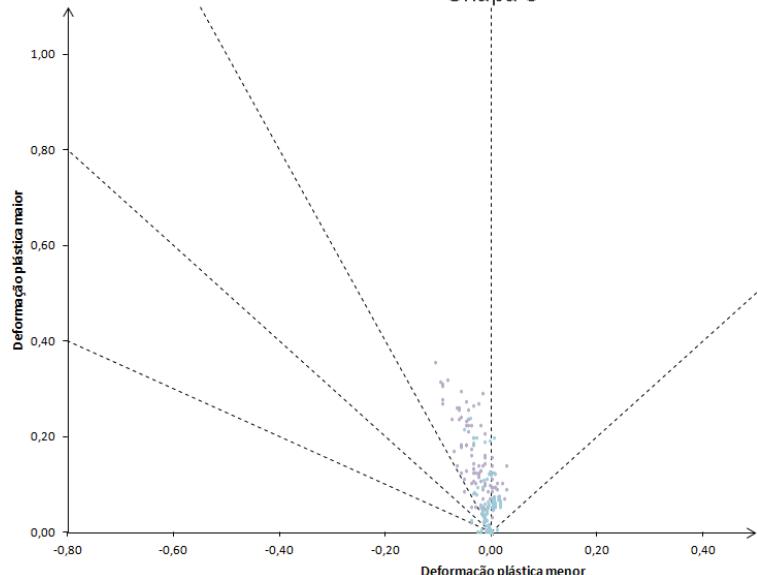
FIGURA 145 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA A TEMPERATURA DE 30°C (DP 350/600)

DP 350/600

Numérico x Experimental

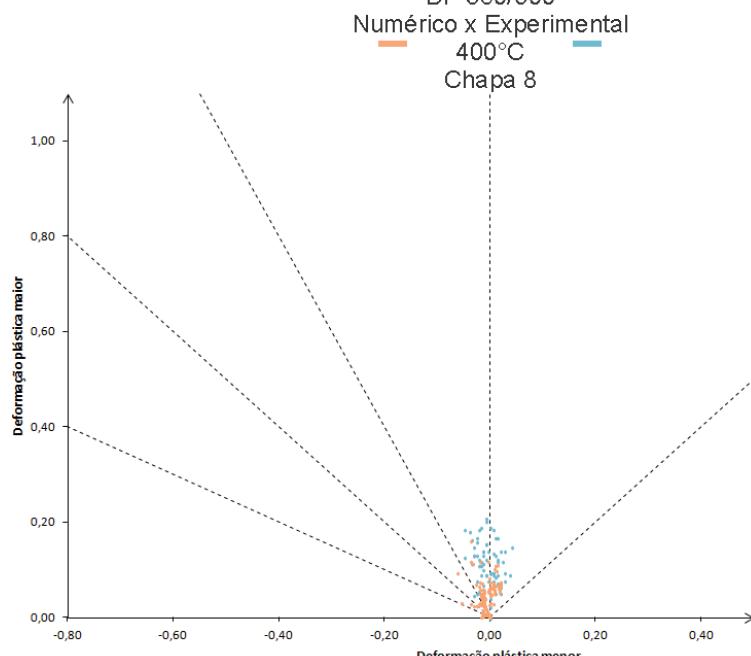
30°C

Chapa 8



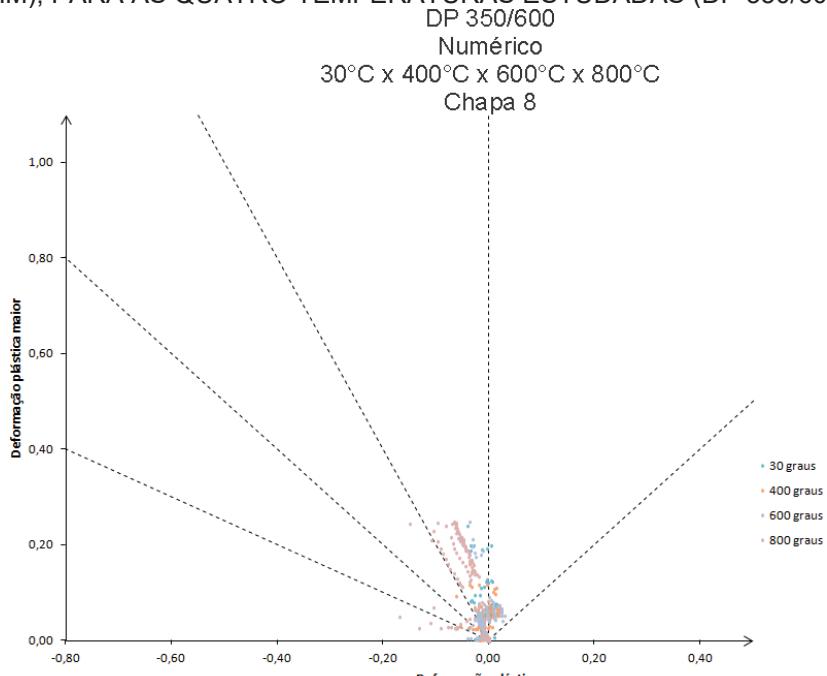
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 146 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NAS CONDIÇÕES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA A TEMPERATURA DE 400°C (DP 350/600)



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 147 – CAMINHOS DE DEFORMAÇÃO NA CONDIÇÃO NUMÉRICA PARA A CHAPA 8 (200 MM X 25 MM), PARA AS QUATRO TEMPERATURAS ESTUDADAS (DP 350/600)



FONTE: O autor (2016).