

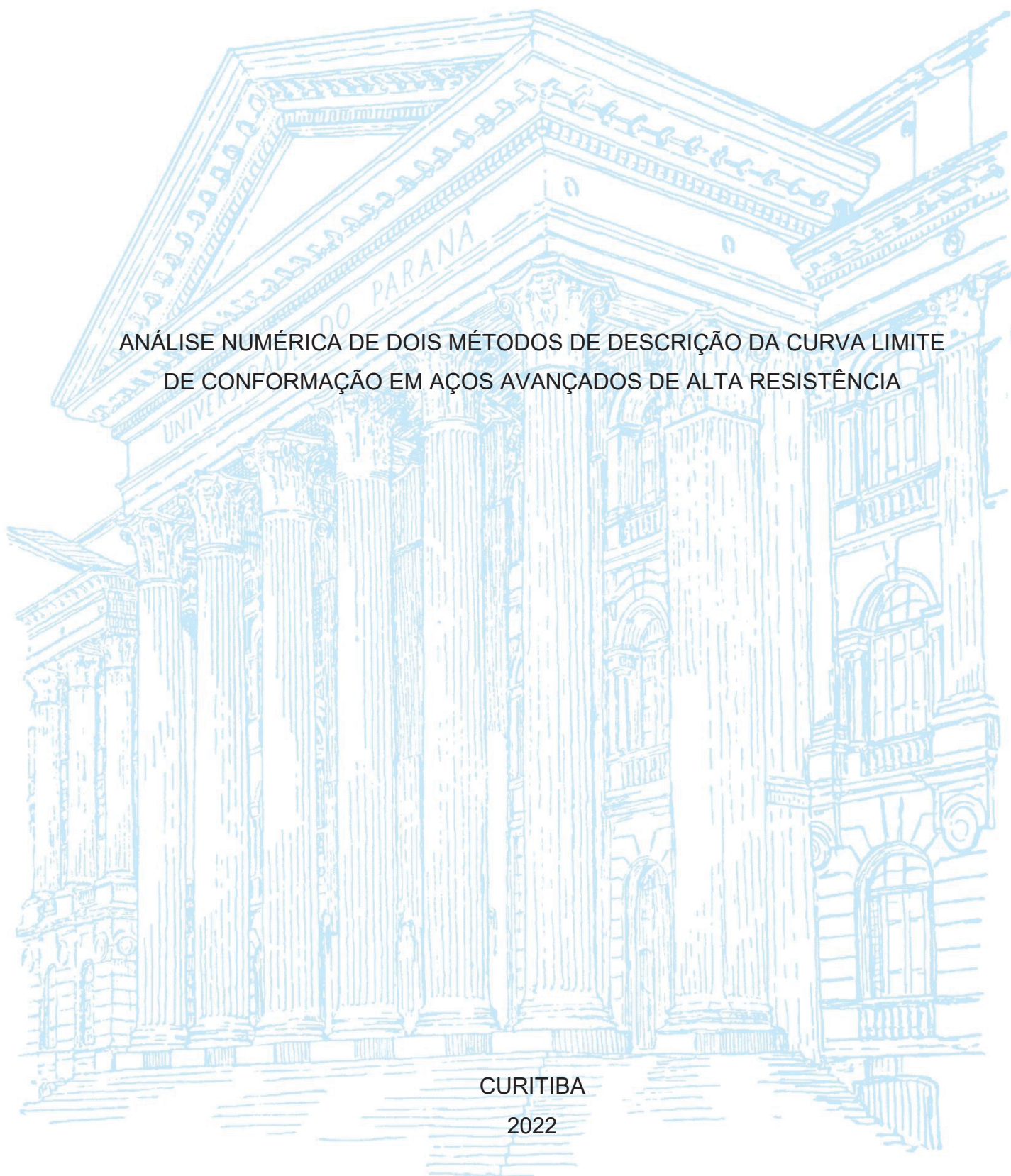
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ROBERTO MATHEUS DE ARAUJO BORNANCIN

ANÁLISE NUMÉRICA DE DOIS MÉTODOS DE DESCRIÇÃO DA CURVA LIMITE
DE CONFORMAÇÃO EM AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA

CURITIBA

2022



ROBERTO MATHEUS DE ARAUJO BORNANCIN

ANÁLISE NUMÉRICA DE DOIS MÉTODOS DE DESCRIÇÃO DA CURVA LIMITE
DE CONFORMAÇÃO EM AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo V. P. Marcondes

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo A. dos Santos

CURITIBA

2022

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

B736a Bornancin, Roberto Matheus de Araujo

Análise numérica de dois métodos de descrição de curva limite de
conformação em aços avançados de alta resistência [recurso eletrônico] /
Roberto Matheus de Araujo Bornancin -- Curitiba, 2022.

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo V. P. Marcondes
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo A. dos Santos

1. Indústria automobilística. 2. Aço - Ductilidade. 3. Chapas de metal. I.
Universidade Federal do Paraná. II. Marcondes, Paulo V. P. III. Santos,
Ricardo A. dos. VI. Título.

CDD 671.3

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Junior CRB9/1797



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
MECÂNICA - 40007016040P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arquição da Dissertação de Mestrado de **ROBERTO MATHEUS DE ARAUJO BORNANCIN** intitulada: **ANÁLISE NUMÉRICA DE DOIS MÉTODOS DE DESCRIÇÃO DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO EM AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA**, sob orientação do Prof. Dr. **PAULO VÍCTOR PRESTES MARCONDES**, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 23 de Fevereiro de 2022.

Assinatura Eletrônica

03/03/2022 16:25:35.0

PAULO VICTOR PRESTES MARCONDES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

03/03/2022 16:43:56.0

ADRIANO SCHEID

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

04/03/2022 19:52:02.0

LUCIANO PESSANHA MOREIRA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE)

Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 81531980 - Tel: 41 3361-3701 - E-mail: pgmec@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SICA-UFPR, com a seguinte identificação única: 157387

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.ppgp.ufpr.br/sica/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 157387

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado saúde, discernimento e sabedoria nos momentos de decisões e desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Paulo Marcondes pela orientação, dicas, apoio e confiança.

Aos meus pais, Roberto e Hosana, e a CAPES pelo apoio financeiro.

Á minha irmã, Anna Bornancin, por todo auxílio antes e durante o ingresso no PGMEC – UFPR

Ao professor Ricardo dos Santos pela coorientação e ter acreditado em mim quando ainda estava na graduação.

Á todos os professores que na graduação, em especial Siedro, Rafael e Ricardo, por meio de dicas e oportunidades na realização de trabalhos científicos foram fundamentais no momento de preparação para ingressar ao PGMEC -UFPR.

Ao Jonatas, secretário do PGMEC, no auxílio das partes burocráticas.

“Confia teus negócios ao Senhor e teus planos terão bom êxito”
(PROVERBIOS 16:3)

RESUMO

A conformação de chapas metálicas é um processo utilizado na manufatura de produtos em diversos segmentos industriais, como o automotivo. Nas últimas décadas, com o aumento de regulamentações governamentais, demandas ambientais, pressão por parte dos consumidores para maior segurança veicular e redução no consumo de combustível, a indústria siderúrgica desenvolveu os aços avançados de alta resistência (AAAR). Contudo, a viabilidade de aplicação destes aços depende do conhecimento de suas propriedades mecânicas em sinergia aos parâmetros de conformação. A curva limite de conformação (CLC) é uma importante ferramenta frequentemente utilizada para avaliar a conformabilidade de chapas metálicas. O presente trabalho buscou adaptar e analisar o método de Banabic aos padrões da DIN EN ISO 12004 por meio da comparação ao ensaio de Nakazima utilizando o aço *Dual-phase* 400, AAAR de 1º geração. Para isto, foi necessário realizar simulações numéricas no software *Abaqus/Explicit* com dados experimentais e verificar as diferenças entre os corpos de prova de ambos os métodos. Os resultados, no geral, demonstraram que o método de Banabic adaptado apresenta maior uniformidade no perfil de força em função do deslocamento do punção e maior deformação entre os corpos de prova quando comparados aos de Nakazima. Assim sendo, o método de Banabic adaptado apresenta vantagens em relação ao teste de Nakazima como induzir um comportamento de ruptura mais próximo da norma, isto é, mais próxima ao polo do punção com mesmas condições de atrito e maior facilidade na usinagem dos corpos de prova.

Palavras-chave: Curva Limite de Conformação. Aços avançados de Alta Resistência. Simulação Numérica. Ensaio de Nakazima. DP400.

ABSTRACT

Sheet metal forming is a process widely used in the manufacture of products, mainly in automotive industry. In the last decades, with the increase of government regulation, pressure to reduce environmental impact, fuel consumption, and safety improvements, the steelmaking industry has developed Advanced High-Strength Steels. However, the application of these steels depends on the knowledge of mechanical properties and parameters of the forming processes. Forming limit curve (FLC) is an important tool used to evaluate the formability of sheet metal. The aims of this study are to modify and analyze the Banabic method to the standards of DIN EN ISO 12004 comparing it to the Nakazima test using first generation Dual-phase 400. For this purpose, numerical simulations with experimental data to verify the differences of both methods were performed. Based on finite element simulations the adapted Banabic method resulted in most uniformity in the force stroke punch and strain profile than Nakazima specimens. Therefore, modified Banabic method has advantages over the Nakazima test, as to induce a fracture behavior closer to the punch pole in the same friction conditions and easier machining of specimens.

Keywords: Forming limit curve. Advanced High Strength-Steels. Numerical analysis. Nakazima test. DP400.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – VARIAÇÃO DO VALOR DE MERCADO DE UMA AÇÃO DA TESLA INC NA NASDAQ EM USD.	22
FIGURA 2 - MÉDIA DE EMISSÃO DE KG DE CO ₂ EMITIDA NA PRODUÇÃO PRIMÁRIA DE CADA KG DOS MATERIAIS APRESENTADOS.	25
FIGURA 3 – COMPOSIÇÃO DA CARROCERIA DO VEÍCULO AUDI A8 DA VERSÃO 2009.	25
FIGURA 4 - COMPOSIÇÃO DA CARROCERIA DO AUTOMÓVEL DO AUDI A8 VERSÃO 2018.	26
FIGURA 5 - MICROGRAFIA DO AÇO DP 800 COM MATRIZ FERRÍTICA (PARTE CLARA) COM AS ILHAS DISPERSAS DE MARTENSITA (PARTE ESCURA).	28
FIGURA 6 - CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO DE ALGUNS AÇOS DP.	28
FIGURA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE O AUMENTO DE RESISTÊNCIA COM A DEFORMAÇÃO DO AÇO DP 350/600 COM O ARBL 350/450.	29
FIGURA 8 – INFLUÊNCIA DO ENCRUAMENTO E DO EFEITO BAKE HARDENING NO AUMENTO DE RESISTÊNCIA NOS AÇOS.	30
FIGURA 9 - MICROESTRURA AÇO TRIP REVELADA COM ATAQUE QUÍMICO POR MEIO DO REAGENTE PROPOSTO POR LEPERA.	32
FIGURA 10 - ESTÁGIOS DO EFEITO TRIP EM QUE CADA COR DOS RESPECTIVOS CÍRCULOS REPRESENTA UMA FASE PRESENTE NESTES TIPOS DE AÇOS.	32
FIGURA 11 - COMPARAÇÃO DO ENCRUAMENTO DO AÇO TRIP 350 COM OS AÇOS DP 350 E ARBL 350.	33
FIGURA 12 – ALONGAMENTO UNIFORME EM FUNÇÃO DA FRAÇÃO DE AUSTENITA RETIDA NOS AÇOS TRIP.	33
FIGURA 13 - TENACIDADE A FRATURA EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE INICIAL DE AUSTENITA RETIDA.	34
FIGURA 14 – TENSÃO ABSORVIDA EM DEFORMAÇÕES ACIMA DE 10% EM RELAÇÃO A TAXA DE DEFORMAÇÃO VERDADEIRA DE DOIS AÇOS TRIP DISTINTOS.	35

FIGURA 15 – INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO DE CARBONO E DE MANGANÊNS NA ENERGIA DE FALHA DE EMPILHAMENTO NOS AÇOS TRIP E TWIP.....	36
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM EM CHAPAS METÁLICAS.	38
FIGURA 17 – OPERAÇÕES DE ESTIRAMENTO DE CHAPAS METÁLICAS.	39
FIGURA 18 – ESTAMPAGEM PROFUNDA POR MATRIZ FLEXÍVEL PELO PROCESSO DE MARFORM.....	40
FIGURA 19 – PRINCIPAIS FORÇAS QUE AGEM NA CHAPA DURANTE O EMBUTIMENTO DE UM COPO.	40
FIGURA 20 – COMPORTAMENTO DE DEFORMAÇÃO NA CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO.	41
FIGURA 21 – INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO NO AUMENTO DE RESISTÊNCIA PARA MATERIAIS DE MESMA TENSÃO DE ESCOAMENTO.	42
FIGURA 22 – COMPORTAMENTO COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO EM RELAÇÃO A DEFORMAÇÃO PARA OS AÇOS TRIP 600, DP 600 E ARBL 350.....	43
FIGURA 23 - MICROGRAFIA DO AÇO DC 06.	44
FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO NA CHAPA DA ANISOTROPIA NORMAL E PLANAR EM FUNÇÃO DA DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO.....	45
FIGURA 25 – ORELHAMENTO NAS DIREÇÕES DE 0°, 45° E 90° EM UM PROCESSO DE EMBUTIMENTO.....	45
FIGURA 26 – ZONAS DO DIAGRAMA LIMITE DE CONFORMAÇÃO.....	47
FIGURA 27 – CÍRCULOS SELECIONADOS PARA MEDIÇÃO NO CORPO DE PROVA.	48
FIGURA 28 – CLC COM AS ELIPSES OU CIRCULOS SELECIONADOS PARA MEDIÇÃO NO CORPO DE PROVA.....	48
FIGURA 29 – COMPORTAMENTO DOS CÍRCULOS COM BASE NO ESTADO DE DEFORMAÇÃO LOCAL DO CORPO DE PROVA.	49
FIGURA 30 – PADRÃO DE FERRAMENTAL DO TESTE DE NAKAZIMA.....	51
FIGURA 31 – PADRÃO DE FERRAMENTAL DO TESTE DE MARCINIAK.	51
FIGURA 32 – INFLUÊNCIA DA LARGURA NO ESTADO DE DEFORMAÇÃO DOS CORPO DE PROVA.	52

FIGURA 33 – DESCRIÇÃO DO CORPO DE PROVA UTILIZADO NESTES ENSAIOS.....	52
FIGURA 34 – CONFIGURAÇÃO UTILIZADA POR PANICH <i>ET AL.</i> PARA O ENSAIO DE NAKAZIMA.....	53
FIGURA 35 – CONFIGURAÇÃO UTILIZADA POR CHEN <i>ET AL.</i> NO TESTE DE MARCINIAK	53
FIGURA 36 – CONFIGURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA APLICADA POR SANTOS NO TESTE DE MARCINIAK.	53
FIGURA 37 – TESTE DE BANABIC <i>ET AL.</i>	54
FIGURA 38 – INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO FURO EM SUA POSIÇÃO NA CLC.....	54
FIGURA 39 – ILUSTRAÇÃO DAS DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO DE BANABIC.	55
FIGURA 40 – COMPARAÇÃO DA CLC OBTIDA PELO ENSAIO DE BANABIC COM O TESTE DE NAKAZIMA PARA A LIGA DE ALUMÍNIO AA6016-T4.	56
FIGURA 41 – VELOCIDADE DE PROCESSAMENTO MÉDIA DOS COMPUTADORES AO LONGO DOS ÚLTIMOS ANOS.	57
FIGURA 42 – MODELOS DE UMA CHAPA COM FURO CENTRAL DE ELEMENTOS GEOMETRIA TRIANGULAR, SEM E COM REFINAMENTO NA MALHA.	58
FIGURA 43 – PERFIL DE DEFORMAÇÃO DE UMA ANÁLISE NUMÉRICA REALIZADA NA OPERAÇÃO DE ESTIRAMENTO SEM E COM REFINO DE MALHA	59
FIGURA 44 – GEOMETRIAS DE ELEMENTOS COMUMENTE UTILIZADAS NA ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS.	60
FIGURA 45 – EXEMPLO DE CONFIGURAÇÕES DE MALHAS QUE PODEM SER EMPREGADAS EM SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.	60
FIGURA 46 – PADRÕES DERESOLUÇÃO COMUMENTE UTILIZADO NA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS POR ELEMENTOS FINITOS.	61
FIGURA 47 - REPRESENTAÇÃO DO MODELO CASCA USADO PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA REPRESENTANDO O FERRAMENTAL DE SWIFT.....	62

FIGURA 48 – MODELO DO TIPO BARRA UTILIZADO NO FERRAMENTAL PARA ANALISAR O RETORNO ELÁSTICO DE CHAPAS NO PADRÃO NUMISHEET'93 NAS REGIÕES DO ÂNGULO DO FLANGE, RAIOS DA CURVATURA DA PAREDE E DO ÂNGULO DA PAREDE.....	62
FIGURA 49 - MONTAGEM DA OPERAÇÃO DE PUNÇONAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO ESTRUTURAL ASSIMÉTRICO EM CONJUNTO AO COM DEFORMAÇÃO NO PLANO.	63
FIGURA 50 – ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DA OPERAÇÃO DE ESTIRAMENTO UTILIZANDO A ESTRUTURA COM PADRÃO CIRCULAR.....	64
FIGURA 51 - PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM NA COMPLEXIDADE DE UM MODELO NUMÉRICO.....	66
FIGURA 52 – INFLUÊNCIA DA ANÁLISE DE UM MODELO COMPUTACIONAL DE UMA OPERAÇÃO DE CONFORMAÇÃO EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES COM O ENSAIO EXPERIMENTAL NAS MESMAS CONFIGURAÇÕES.	67
FIGURA 53 – INFLUÊNCIA DO TIPO DE ELEMENTO UTILIZADO EM UMA MATRIZ DURANTE UMA OPERAÇÃO DE CONFORMAÇÃO.....	68
FIGURA 54 – COMPARAÇÃO GENÉRICA DA ALTERAÇÃO DE RESULTADOS POR MEIO DA VARIAÇÃO DOS PADRÕES DAS MALHAS.	68
FIGURA 55 – INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE ATRITO NO PERFIL DE DEFORMAÇÃO DE UMA CHAPA NA OPERAÇÃO DE CONFORMAÇÃO POR EMBUTIMENTO.....	69
FIGURA 56 – PROCEDIMENTO GERAL UTILIZADO PARA O DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS.....	70
FIGURA 57 – CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO DAS TRÊS DIREÇÕES DE LAMINAÇÃO DO AÇO DP 400.	71
FIGURA 58 - CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO DO AÇO DP 400.....	73
FIGURA 59 – FERRAMENTAL UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA AMBOS MÉTODOS	74
FIGURA 60 – CORPOS DE PROVA DE NAKAZIMA UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.	74
FIGURA 61 – CORPOS DE PROVA DO ENSAIO DE BANABIC ADAPTADO EMPREGADO NAS SIMULAÇÕES.	75

FIGURA 62 - CONFIGURAÇÃO DE POSICIONAMENTO DO FERRAMENTAL E DO CORPO DE PROVA UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.	76
FIGURA 63 – MODELO DE MALHA APLICADO NOS CORPOS DE PROVA.	77
FIGURA 64 – REGIÕES DE ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA.	78
FIGURA 65 – DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 1 DE NAKAZIMA NO MOMENTO DA FALHA DO AÇO DP 400.	79
FIGURA 66 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 2 DE NAKAZIMA NO MOMENTO DA FALHA DO AÇO DP 400.	79
FIGURA 67 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 3 DE NAKAZIMA NO MOMENTO DA FALHA DO AÇO DP 400.	80
FIGURA 68 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 4 DE NAKAZIMA NO MOMENTO DA FALHA DO AÇO DP 400.	80
FIGURA 69 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 5 DE NAKAZIMA NO MOMENTO DA FALHA DO AÇO DP 400.	81
FIGURA 70 – DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 1 DO TESTE DE BANABIC ADAPTADO NO INSTANTE DE RUPTURA DO AÇO DP 400.	81
FIGURA 71 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 2 DO TESTE DE BANABIC ADAPTADO NO INSTANTE DE RUPTURA DO AÇO DP 400.	81
FIGURA 72 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 3 DO TESTE DE BANABIC ADAPTADO NO INSTANTE DE RUPTURA DO AÇO DP 400.	82
FIGURA 73 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 4 DO TESTE DE BANABIC ADAPTADO NO INSTANTE DE RUPTURA DO AÇO DP 400.	82
FIGURA 74 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 5 DO TESTE DE BANABIC ADAPTADO NO INSTANTE DE RUPTURA DO AÇO DP 400.	82
FIGURA 75 – FORÇA EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO DO PUNÇÃO DO CORPO DE PROVA 5 COM CARGA DO PRENSA-CHAPAS DE 200 KN COMPARADO AOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CHEMIN FILHO DE 570 KN, 850 KN E 1275 KN.	83

FIGURA 76 – GRAFICO FORÇA VS DESLOCAMENTO DOS CORPOS DE PROVA DE NAKAZIMA.....	84
FIGURA 77 -GRAFICO FORÇA VS DESLOCAMENTO DOS CORPOS DE PROVA DO MÉTODO DE BANABIC ADAPTADO.....	84
FIGURA 78 - PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DO MÉTODO DE NAKAZIMA.....	85
FIGURA 79 – PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DO MÉTODO DE BANABIC ADAPTADO.	85
FIGURA 80 - PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 1 DOS MÉTODOS DE NAKAZIMA E DE BANABIC ADAPTADO.....	86
FIGURA 81 – PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 2 DOS MÉTODOS DE NAKAZIMA E DE BANABIC ADAPTADO.....	87
FIGURA 82 - PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 3 DOS MÉTODOS DE NAKAZIMA E DE BANABIC ADAPTADO.....	88
FIGURA 83 - PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 1 DOS MÉTODOS DE NAKAZIMA E DE BANABIC ADAPTADO.....	88

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS QUE DISTINGUEM AS GERAÇÕES DOS AAAR.	27
QUADRO 2 - EFEITO DA ADIÇÃO DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA UTILIZADOS NOS AÇOS DP.	31

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - FRAÇÃO INICIAL DE CADA FASE DOS AÇOS TRIP INVESTIGADOS DA FIGURA 13.	34
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUNS AÇOS TRIP e TWIP	36
TABELA 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALGUNS AÇOS COMUMENTE UTILIZADOS NA INDUSTRIA AUTOMOTIVA.....	46
TABELA 4 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA DO TESTE DE BANABIC..	55
TABELA 5 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO DP 400	71

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AAAR	- Aços avançados de alta resistência
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARBL	- Aço de alta resistência e baixa liga
ASM	- <i>American Society of Materials</i>
BH	- <i>Bake Hardening</i>
BI	- Estiramento equi-biaxial
CB	- <i>Carrier blank</i>
CLC	- Curva limite de conformação
CNC	- Comando numérico computadorizado
CP	- Corpo de prova
DIN	- <i>Deutsches Institut für Normung</i>
DP	- <i>Dual-phase</i>
EFE	- Energia de falha de empilhamento
EN	- <i>European Standard</i>
IFPR	- Instituto Federal do Paraná
IM	- Estiramento biaxial intermediário
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
MEV	- Microscópio eletrônico de varredura
NASDAQ	- <i>National Association of Security Dealers Automated Quotations</i>
NBR	- Norma Brasileira
PHS	- <i>Press Hardening Steel</i>
PS	- Deformação plana
PVC	- Policloreto de vinila
SAE	- <i>Society of Automotive Engineers</i>
TE	- Deformação uniaxial
TRIP	- Plasticidade induzida por transformação
TWIP	- Plasticidade induzida por maclação
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
USD	- Dólares Americanos

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{80}	- Alongamento total na direção de laminação em que a CLC foi determinada
A_{80}^{Min}	- Alongamento mínimo total de todas direções de laminação da chapa
Al	- Alumínio
C	- Carbono
CO ₂	- Dióxido de carbono
Cr	- Cromo
D	- Diâmetro do punção
D ₀	- Diâmetro inicial do círculo
D ₁	- Diâmetro maior final da elipse
D ₂	- Diâmetro menor final da elipse
e ₁	- Deformação maior
e ₂	- Deformação menor
Fe	- Ferro
K	- Coeficiente de resistência
kg	- Quilograma
L _f	- Largura final
L _i	- Largura inicial
mL	- mililitro
mm	- Milímetro
Mn	- Manganês
Mo	- Molibdênio
MPa	- Megapascal
n	- Coeficiente de encruamento
Nb	- Nióbio
r	- Fator anisotropia ou Coeficiente de Lankford
r ₀	- Fator anisotropia em 0° em relação a direção de laminação
r ₄₅	- Fator anisotropia em 45° em relação a direção de laminação
r ₈₀	- Fator anisotropia na direção de laminação em que a CLC foi determinada
r ₉₀	- Fator anisotropia em 90° em relação a direção de laminação
r _m	- Coeficiente de anisotropia normal médio
s	- Segundos
Si	- Silício

t	- Espessura
t_f	- Espessura final
t_i	- Espessura inicial
V	- Vanádio
W	- Watts
α	- Ferrita
α_b	- Bainita
γ_r	- Austenita retida
Δr	- Coeficiente de anisotropia plana
ε	- Martensita
ε	- Deformação verdadeira
ε_1	- Deformação maior verdadeira
ε_2	- Deformação menor verdadeira
ε_e	- Variação do alongamento uniforme na espessura
ε_L	- Variação do alongamento uniforme na largura
μm	- Micrometro
σ	- Tensão verdadeira
σ_0	- Tensão de escoamento
$^\circ$	- Graus
%	- Porcento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS.....	23
1.1.1 Objetivo geral.....	23
1.1.2 Objetivos específicos.....	23
2 REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA (AAAR).....	24
2.2 ESTAMPAGEM EM CHAPAS METÁLICAS.....	37
2.2.1 Estiramento.....	38
2.2.2 Estampagem profunda.....	39
2.2.3 Coeficiente de encruamento.....	41
2.2.4 Fator anisotropia.....	43
2.2.5 Curva limite de conformação.....	46
2.2.5.1 Ensaio de Nakazima e de Marciniak.....	50
2.2.5.2 Ensaio de Banabic.....	54
2.3 MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL.....	56
3 MATERIAIS E MÉTODOS	70
3.1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL.....	71
3.2 MÉTODO DE BANABIC ADAPTADO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO COMPUTACIONAL.....	73
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
REFERÊNCIAS	91
ANEXO 1 – DETALHAMENTO DO PROCEDIMENTO UTILIZADO NO MODELAMENTO NUMÉRICO	100

1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística vem apresentando diversas modificações nos materiais utilizados na produção de seus veículos principalmente devido a regulamentações governamentais, competição elevada no setor, preferências dos consumidores e dos mercados financeiros. No geral, estas empresas buscam reduzir o custo de materiais utilizados em sinergia com maior manufaturabilidade, maior absorção de energia durante uma colisão veicular e menor emissão de gases efeito estufa na cadeia produtiva.

Conforme Giansoldati *et al* (2020) e Stahl e Bucko (2019), além dos desafios que os modelos de combustão interna enfrentam, as companhias que produzem veículos elétricos devem enfrentar outros tipos de exigências com o aumento da adesão popular. Dentre esses se destacam principalmente a redução do consumo elétrico, maior autonomia de percurso por meio da melhora do sistema de recuperação de energia cinética, eficiência na produção e aquisição da matéria prima das baterias, as quais possuem atualmente o Lítio como principal elemento, considerado por Harlow (2016) como o “petróleo branco”.

Por exemplo, a Tesla Inc., atualmente líder de mercado no segmento de veículos elétricos apresentou um crescimento de valor em suas ações devido a especulação no mercado financeiro e incentivos financeiros do governo dos Estados Unidos de aproximadamente 11800% desde março de 2013 até outubro de 2021, na NASDAQ, como pode ser visto na FIGURA 1. Esta empresa possui capitalização de mercado de aproximadamente 1 trilhão de dólares americanos (USD), valendo mais que a soma do 9 posições que a precedem nas classes produtoras de automóveis, conforme Companies Market Cap (2021).

FIGURA 1 – VARIAÇÃO DO VALOR DE MERCADO DE UMA AÇÃO DA TESLA INC NA NASDAQ EM USD.



Fonte: TradingView (2021).

Portanto, a classe de veículos elétricos assim como de combustão interna apresenta desafios inerentes à sua produção em sinergia com expectativas da sociedade. No entanto, a redução de peso da carroceria é buscada por ambas as classes. Para promover isso, conforme Keeler *et al.* (2017), a indústria siderúrgica desenvolveu os aços avançados de alta resistência (AAAR), que possuem microestrutura multifásica e em alguns tipos maior conformabilidade do que os aços convencionais como por exemplo o aço de alta resistência e baixa liga (ARBL).

Panich *et al.* (2013) afirmam ser fundamental conhecer as propriedades e os limites de conformação dos AAAR de maneira mais precisa possível, para que sejam reduzidos os problemas de estampagem. Além disso, Abspoel *et al.* (2013) e Banabic *et al.* (2013) corroboram que o uso da curva limite de conformação (CLC) é uma ferramenta importante e amplamente utilizada para determinar os limites de conformação de chapas de aço que são utilizadas em automóveis.

A CLC foi parcialmente desenvolvido por Keeler (1961), que descreveu um mapa de deformações, relacionando as deformações positivas maiores e menores, que possibilitou determinar os limites de conformação da chapa no estado de estiramento em um punção. Posteriormente, a curva foi estendida por Goodwin

(1968), que avaliou a deformação menor negativa, permitindo assim avaliar os estados de embutimento profundo e uniaxial de tensões.

Diversos métodos foram desenvolvidos para determinação CLC de chapas. Dentre os ensaios experimentais, destacam-se os métodos de Nakazima e o de Marciniak, os quais, para testes em laboratório, podem ser determinados seguindo os padrões da norma ISO 12004-2, para fins de comparações e diminuir a variação dos resultados entre testes realizados em laboratórios distintos, causadas, por exemplo, por ações tribológicas.

Banabic *et al.* (2013), com intuito de reduzir os efeitos tribológicos entre o punção e chapa, desenvolveram um novo método experimental baseado no teste de expansão hidráulica, que permite avaliar os estados de deformação em materiais metálicos. Ao contrário do ensaio de Nakazima e de Marciniak em que os corpos de prova são deformados por um punção, no ensaio de Banabic *et al.* (2013) estes são deformados por um fluido hidráulico, semelhante ao teste de expansão hidráulica porém com a adição de um *carrier blank* entre o fluido e o corpo de prova.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Comparar via simulação numérica os métodos de descrição das curvas limite de conformação do aço DP 400 de Nakazima com a modificação do teste Banabic

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar análise por elementos finitos, no software *Abaqus/Explicit*, aplicando os valores da curva limite de conformação do aço DP 400 obtidos pelos testes experimentais de Nakazima no teste de Banabic adaptado;
- Analisar o perfil de deformação, espessura e o deslocamento em função da força do punção para ambos os testes;
- Estudar e Adaptar o teste de Banabic aos padrões da norma DIN EN ISO 12004-2;
- Gerar dados via simulação numérica que facilite o uso do teste de Banabic adaptado em ensaios experimentais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção, serão apresentados os conceitos básicos relacionado aos aços avançados de alta resistência, com ênfase aos aços *dual-phase*. Também serão descritos conceitos básicos sobre conformação de chapas métodos para levantamento da curva limite de conformação e simulação numérica em chapas de aço.

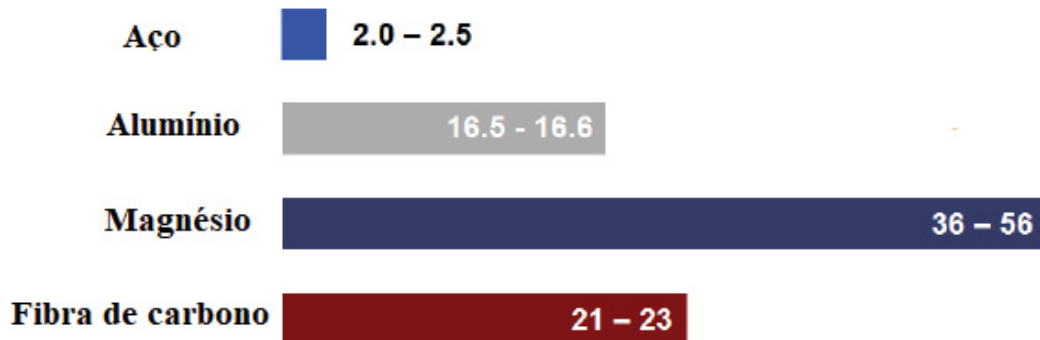
2.1 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA (AAAR)

Segundo Roy *et al.* (2018) e Keeler *et al.* (2017), a indústria automotiva vem sendo severamente pressionada por instituições governamentais e pelos consumidores para a produção de veículos com menor emissão de dióxido de carbono (CO₂), maior segurança em colisões, maior acessibilidade financeira e eficiência energética. Além disso, Demeri (2013) salienta que as indústrias deste segmento apresentam outros desafios, como a busca de materiais com boa manufacturabilidade e baixo custo, sendo que Ashby e Jones (2012), Demeri (2013) e Marcondes *et al.* (2015) corroboram que uma maneira eficiente de reduzir o impacto ambiental oriundos da ineficiência energética é por meio da redução do peso do veículo.

Na perspectiva de Ashby e Jones (2012) uma maneira de reduzir o peso dos automóveis é por meio da substituição de materiais convencionais, por exemplo, aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) por materiais de menor densidade, maior conformabilidade e resistência. Contudo, Keeler *et al.* (2017) apontam que, para atender esses requisitos, é necessário considerar desde a fabricação até a reciclagem do material selecionado para o projeto, pois cada elemento de sua composição química apresenta um gasto energético para sua manufatura e, conseqüentemente, emite uma determinada quantidade de CO₂.

De acordo com Keeler *et al.* (2017), ilustrado na FIGURA 2, os aços apresentam menor emissão de CO₂ na produção primária para cada kg, quando comparados aos demais materiais utilizados para redução de peso em automóveis. Por exemplo, na produção primária de 1 kg de aço é emitido cerca de 2 a 2,5 kg de CO₂, já 1 kg de Alumínio primário produz em torno de 16,5 kg deste gás. Assim, os AAAR, que estão contidos neste intervalo, demonstram ser uma alternativa à redução de peso e emissão de CO₂.

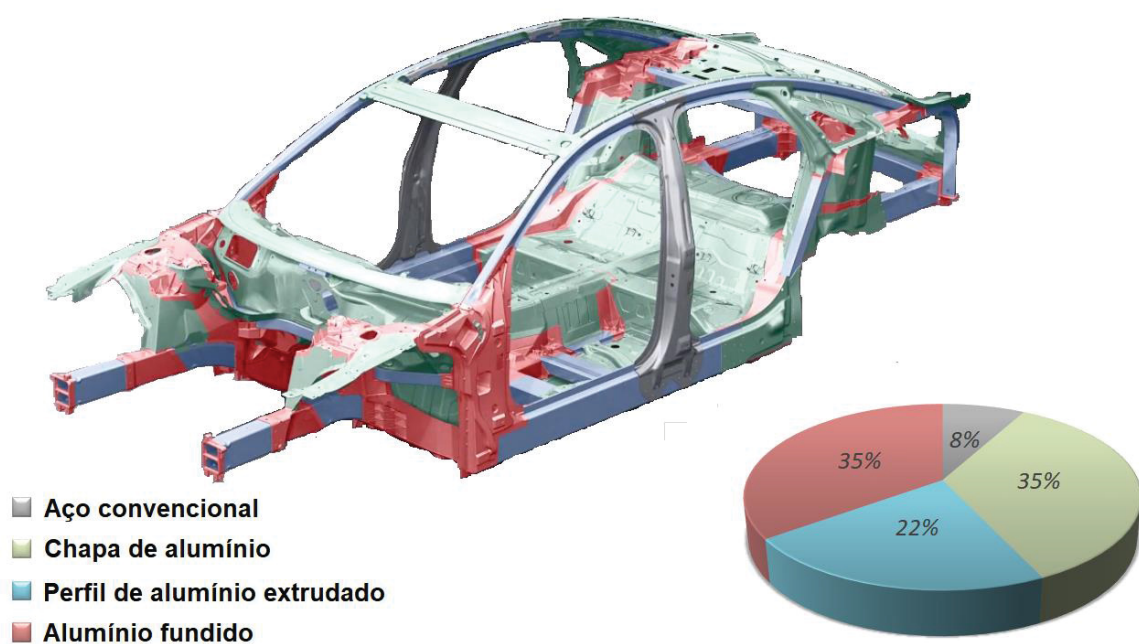
FIGURA 2 - MÉDIA DE EMISSÃO DE KG DE CO₂ EMITIDA NA PRODUÇÃO PRIMÁRIA DE CADA KG DOS MATERIAIS APRESENTADOS.



Fonte: Adaptada de Keeler *et al.* (2017).

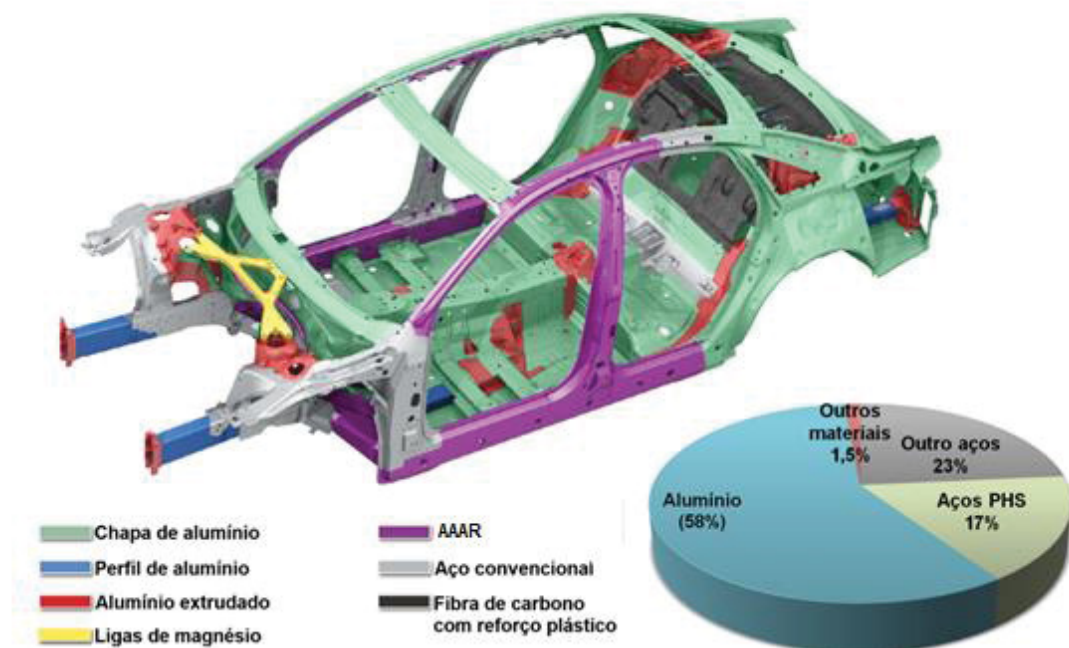
Empresas do ramo automobilístico, como por exemplo a Audi AG, já estão aplicando os AAAR em seus veículos mais recentes. Por exemplo, no modelo Audi A8 2018, quando comparado com a versão 2009, nota-se que ocorreu um aumento significativo de 32,5% na quantidade de aço no peso total da carroceria e uma redução de 34% de ligas de alumínio, com uma pequena adição de outros materiais. Dentre os aços utilizados, o destaque se deu ao tipo *Press hardening steel* (PHS), que constitui 17% dos materiais utilizados da carroceria deste veículo. A FIGURA 3 e a FIGURA 4 apresentam a composição dos materiais das respectivas versões.

FIGURA 3 – COMPOSIÇÃO DA CARROCERIA DO VEÍCULO AUDI A8 DA VERSÃO 2009.



Fonte: Adaptada de Audi Technology Portal (2020).

FIGURA 4 - COMPOSIÇÃO DA CARROCERIA DO AUTOMÓVEL DO AUDI A8 VERSÃO 2018.



Fonte: Adaptada de ArcelorMittal (2020).

Conforme Demeri (2013) e Keeler *et al.* (2017), os AAAR são multifásicos que podem apresentar mais de um mecanismo de deformação. Por exemplo, os aços *Dual-phase* (DP) exibem matriz ferrítica, que geralmente é dúctil, com fase secundária de martensita em formas de ilhas, que apresenta alta resistência e baixa ductilidade, condição que proporciona na conformação maior ductilidade e resistência mecânica quando comparados os aços convencionais.

Apesar de boa conformabilidade e do aumento exponencial do emprego dos AAAR nos últimos anos, os fabricantes enfrentam desafios para produzir e conformar estes aços. De acordo Altan e Tekkaya (2012a), os principais desafios para conformação são:

- Inconsistência das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, tensão de ruptura e escoamento) dos materiais recebidos pela empresa que realizará a conformação, quando comparados aos valores teóricos requeridos;
- Determinação dos limites de conformação;
- Reduzir o desgaste, temperatura e a pressão de contato nas ferramentas;
- Alta carga requerida pela prensa;
- Diminuir o retorno elástico;

- Lubrificação.

Atualmente, os AAAR são classificados em 3 gerações, onde usualmente são distinguidos por suas propriedades mecânicas e características de sua microestrutura, como pode ser visto no QUADRO 1.

QUADRO 1- PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS QUE DISTINGUEM AS GERAÇÕES DOS AAAR.

Geração	Características e propriedades
Primeira	Microestruturas multifásicas com matriz ferrítica
	Maior resistência do que os aços convencionais
Segunda	Fase austenítica estabilizada, devido a elevada quantidade de manganês em sua microestrutura
	Oferece alto alongamento aliado a alta resistência mecânica
Terceira	Propriedades intermediárias entre a 1º e a 2º geração
	Menor custo com elementos de liga em relação aos aços da 2º geração, matriz bainítica e martensítica com austenita retida

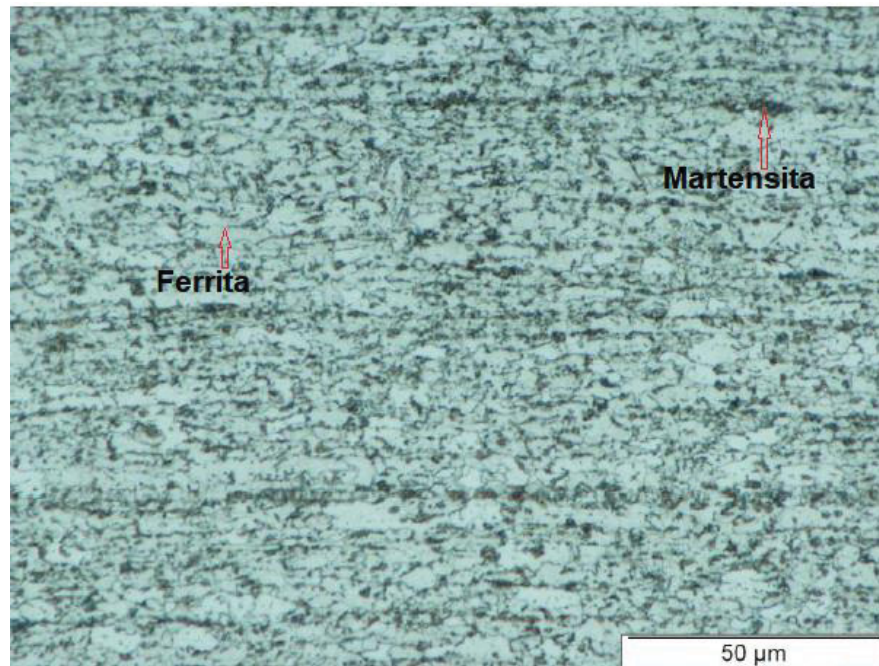
Fonte: Adaptado de Nanda *et al.* (2016) e World Auto Steel (2021).

De acordo Matlock e Speer (2009) e Keeler *et al.* (2017), a primeira geração dos AAAR é composta pelos aços DP, Martensíticos, Plasticidade induzida por transformação (*Transformation Induced Plasticity* -TRIP) e *Complex-phase* (CP). Segundo Matlock e Speer (2009) e Keeler *et al.* (2017), a segunda geração contém os aços de Plasticidade induzida por maclação (*Twinning Induced Plasticity*-TWIP), Aços inoxidáveis austeníticos, e *lightweight induced plasticity*. Keeler *et al.* (2017) e Matlock e Speer (2009) corroboram que os aços da terceira geração são produzidos por meio do processo de têmpera e partição. Além destes, Billur e Altan (2014) adicionam na lista de terceira geração os aços de *Transformation-induced plasticity-aided bainitic ferrite*. Em 2021, World Auto Steel (2021) acrescentou os aços de médio manganês.

Segundo Kuziak *et al.* (2008), os aços DP possuem uma microestrutura de matriz ferrítica e uma fase secundária de martensita, em forma de ilhas, ilustrado na FIGURA 5, que pode variar de 10 a 40% do total do volume. Entretanto, de acordo com Waterschoot *et al.* (2006), estes aços podem apresentar bainita (α_b), austenita retida (γ_r) e perlita em sua microestrutura. Porém estas duas últimas fases, normalmente estão em pequenas quantidades e, conseqüentemente, não alteram as propriedades mecânicas destes aços de forma significativa.

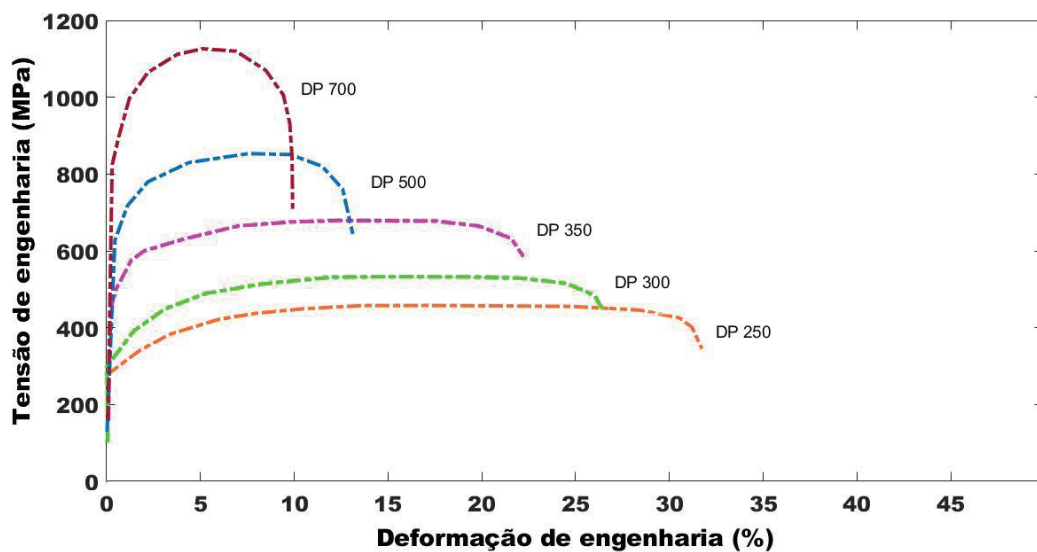
A quantidade de martensita (ϵ) influencia diretamente no comportamento de deformação dos aços DP. Com o aumento do teor de ϵ na microestrutura da liga a resistência mecânica tende a aumentar e o alongamento máximo diminuir, como pode ser visto na FIGURA 6.

FIGURA 5 - MICROGRAFIA DO AÇO DP 800 COM MATRIZ FERRÍTICA (PARTE CLARA) COM AS ILHAS DISPERSAS DE MARTENSITA (PARTE ESCURA).



Fonte: Adaptada de Santos (2013).

FIGURA 6 - CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO DE ALGUNS AÇOS DP.

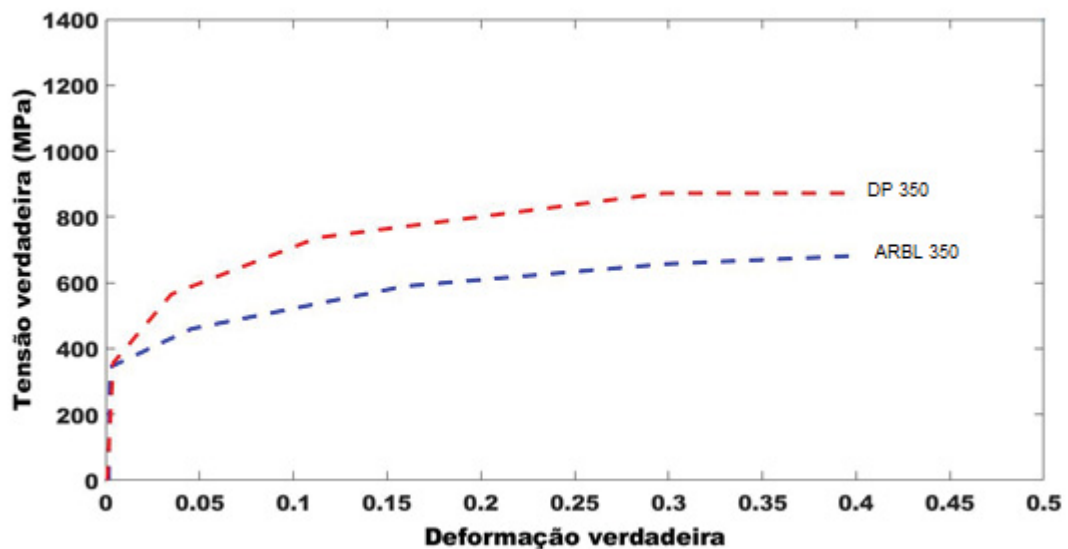


Fonte: Adaptada de Keeler *et al.* (2017).

O tamanho de grão também modifica as propriedades mecânicas dos aços. Bayram *et al.* (1999) reportaram que com o refino da microestrutura dos aços DP, a tensão de escoamento e a tenacidade a fratura aumentam. Além disso, Calcagnotto *et al.* (2010) demonstraram que o coeficiente de encruamento oscila aproximadamente 15 % com a redução do tamanho de grão médio de 12,4 μm para 1,2 μm .

O coeficiente de encruamento (n) é um outro parâmetro importante a ser considerado na conformação de chapas metálicas, quanto maior for seu valor, maior resistência a tração e ao afinamento o *blank* apresentará. Segundo Keeler *et al.* (2017), os aços DP apresentam valores elevados deste coeficiente, quando comparados aos aços convencionais, como ARBL, de mesma tensão de escoamento, segundo FIGURA 7. Esta condição, além de melhorar a estampagem, permite utilizar peças de menor espessura que, por conseguinte, facilita a redução de peso do automóvel, com a substituição por estes aços.

FIGURA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE O AUMENTO DE RESISTÊNCIA COM A DEFORMAÇÃO DO AÇO DP 350/600 COM O ARBL 350/450.

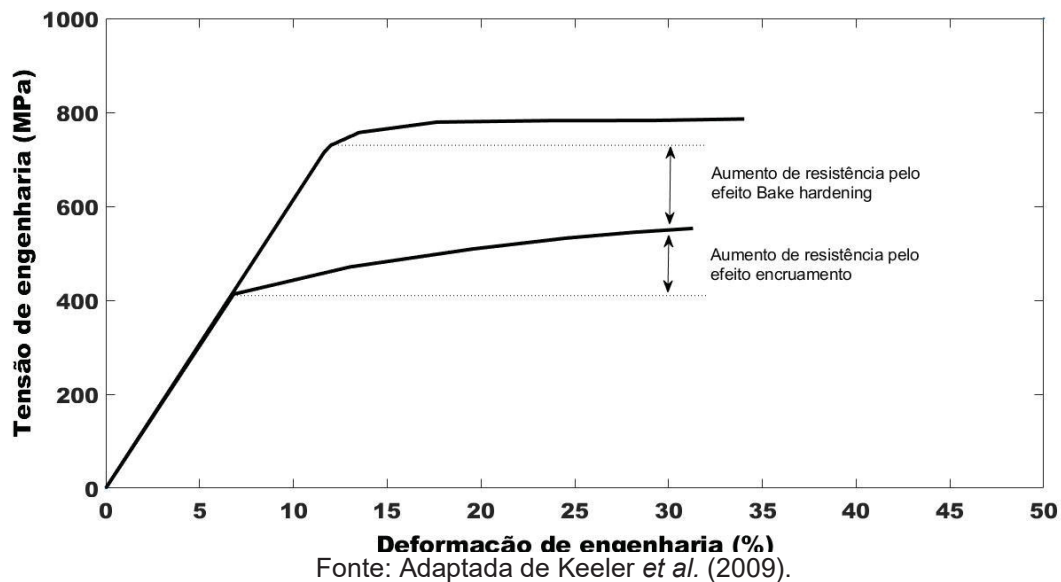


Fonte: Adaptada de ULSAB-AVC (2002).

Conforme o estudo de Zhang *et al.* (2008), os aços DP e TRIP apresentam o efeito *bake hardening* (BH), fator que, de acordo com Keeler *et al.* (2017), proporciona uma vantagem em relação aos aços ARBL. O efeito BH é o aumento da tensão de escoamento de um aço deformado plasticamente que, em seguida, é submetido ao

aquecimento isotérmico. Como ilustrado na FIGURA 8, a sinergia de um elevado valor de n e do efeito BH, proporciona aos aços DP maior resistência mecânica.

FIGURA 8 – INFLUÊNCIA DO ENCRUAMENTO E DO EFEITO BAKE HARDENING NO AUMENTO DE RESISTÊNCIA NOS AÇOS.



De acordo com Demeri (2013), a deformação dos aços DP acontece apenas por deslizamento, onde as ilhas de ϵ dificultam a movimentação das discordâncias. Durante a deformação do material, a deformação é concentrada em maior quantidade na matriz ferrítica. Logo, pela quantidade elevada de α na microestrutura, a fratura tende a ocorrer de maneira dúctil.

A fratura dúctil inicia-se por meio da nucleação em concentradores de tensão durante a deformação plástica do material. De acordo com He *et al.* (1984), para os aços DP, a quantidade de nucleação aumenta a partir de duas formas: a primeira ocorre para baixas deformações, onde as ilhas de ϵ são fraturadas, já a segunda é iniciada durante a estricção do material, em que ocorre rupturas na interface entre as fases de α e ϵ .

Os principais elementos de liga que compõe os aços DP são: manganês (Mn), carbono (C), silício (Si), cromo (Cr), vanádio (V), molibdênio (Mo) e nióbio (Nb). O QUADRO 2 exhibe a faixa adicionada da quantidade e a função dos respectivos elementos na microestrutura.

QUADRO 2 - EFEITO DA ADIÇÃO DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA UTILIZADOS NOS AÇOS DP.

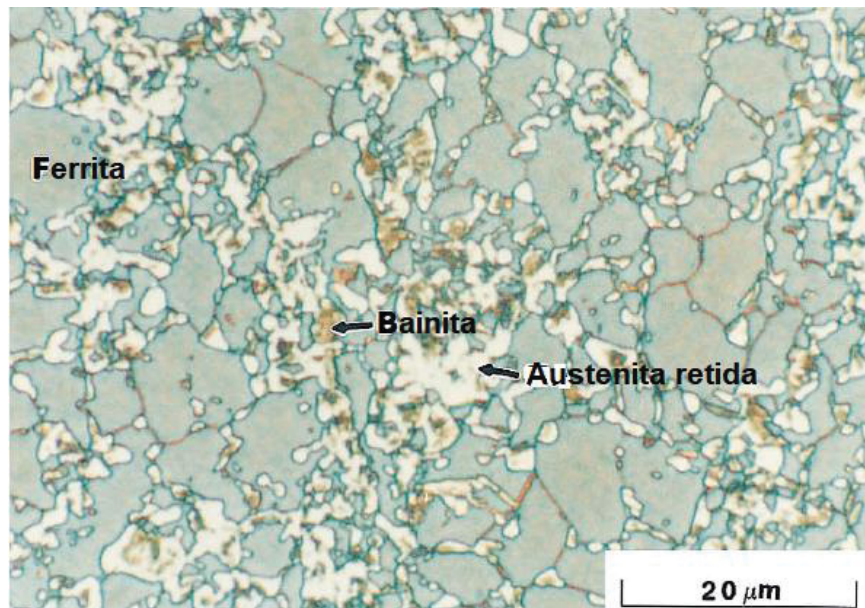
Elemento	Função
C (0,06-0,15%)	Estabilizar a austenita
	Aumentar a resistência da martensita
	Determinar a distribuição das fases
Mn (1,5-3,0%)	Estabilizar a austenita
	Aumentar a resistência da ferrita por solução sólida
	Retardar a formação de ferrita
Si (0,2-0,8%)	Promover a transformação da ferrita
Cr e Mo (acima de 0,4%)	Estabilizar a austenita
	Retardar a formação de perlita e bainita
V (acima de 0,06%)	Estabilizar a austenita
	Aumento de resistência por precipitação
	Refinar a microestrutura
Nb (acima de 0,04%)	Estabilizar a austenita
	Reduzir a temperatura do início da formação de martensita
	Refinar a microestrutura e promover a transformação da ferrita da austenita não recristalizada

Fonte: Adaptado de Kuziak *et al.* (2008).

Segundo Gorni (2009), os aços TRIP apresentam uma microestrutura multifásica composta de 50 a 60% de ferrita (α), 25 a 40% de bainita (α_b) e 5 a 15% de austenita retida (γ_r), ilustrado na FIGURA 9. Entretanto, a microestrutura pode apresentar pequenas quantidades de martensita antes do efeito TRIP, o qual consiste na transformação da γ_r em martensita (ϵ) durante a deformação plástica do material.

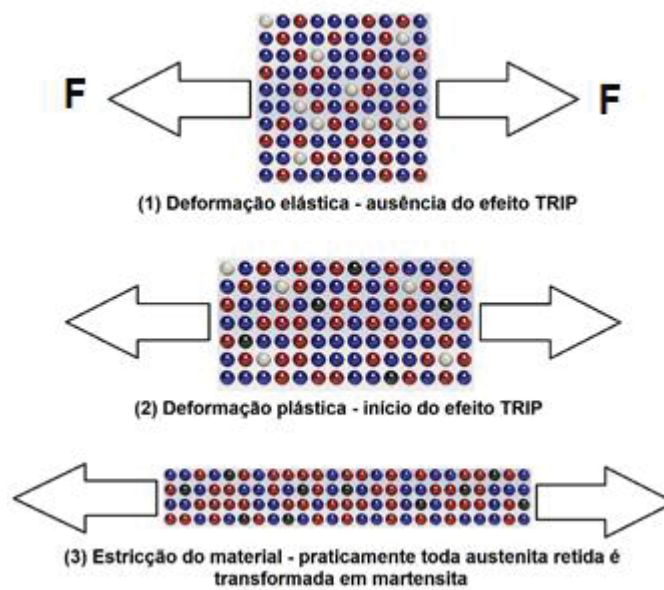
A FIGURA 10 elucida o efeito TRIP na curva tensão deformação em que os círculos de cor branca, preta, azul e vermelho representam as fases γ_r , ϵ , α e α_b , respectivamente. No estágio 1, na deformação elástica, geralmente não ocorre a transformação de fases. Após ultrapassar a tensão de escoamento, estágio 2, a γ_r inicia a transformação para a fase ϵ . Até o fim estrição, que se inicia no estágio 3 até a ruptura, praticamente todo volume de γ_r é transformado em ϵ .

FIGURA 9 - MICROESTRURA AÇO TRIP REVELADA COM ATAQUE QUÍMICO POR MEIO DO REAGENTE PROPOSTO POR LEPERA.



Fonte: Adaptada de Girault *et al.* (1998).

FIGURA 10 - ESTÁGIOS DO EFEITO TRIP EM QUE CADA COR DOS RESPECTIVOS CÍRCULOS REPRESENTA UMA FASE PRESENTE NESTES TIPOS DE AÇOS.

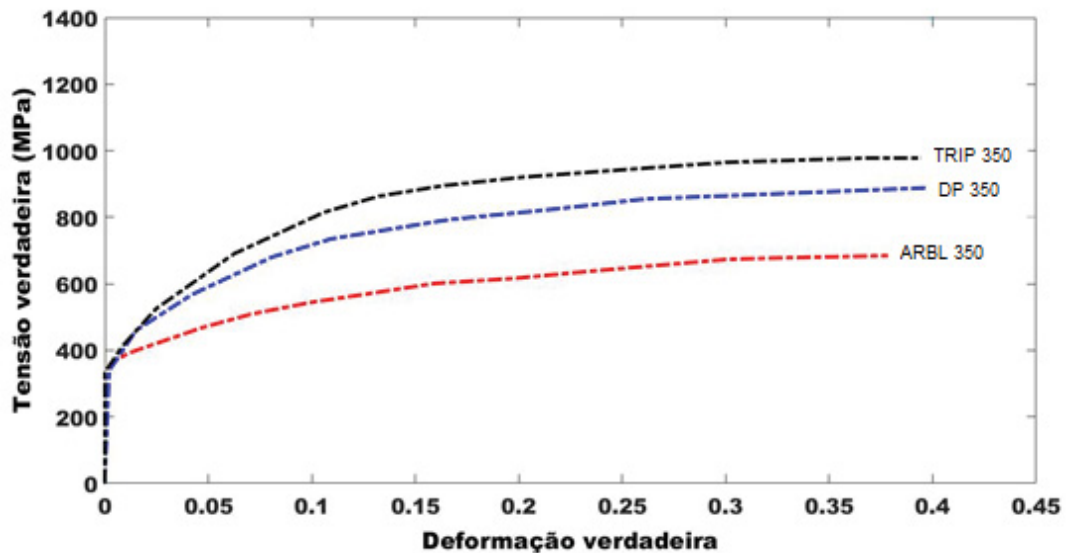


Fonte: O Autor (2022).

De acordo com Keeler *et al.* (2017), devido a esta transformação inerente dos aços TRIP, a taxa de encruamento é maior com o aumento da deformação plástica do que os valores exibidos pelos aços ARBL e DP, ilustrado na FIGURA 11. Segundo Bleck *et al.* (2004), a fração de γ_r pode exercer influência no alongamento uniforme até determinadas quantidades, que após serem ultrapassadas, não promovem

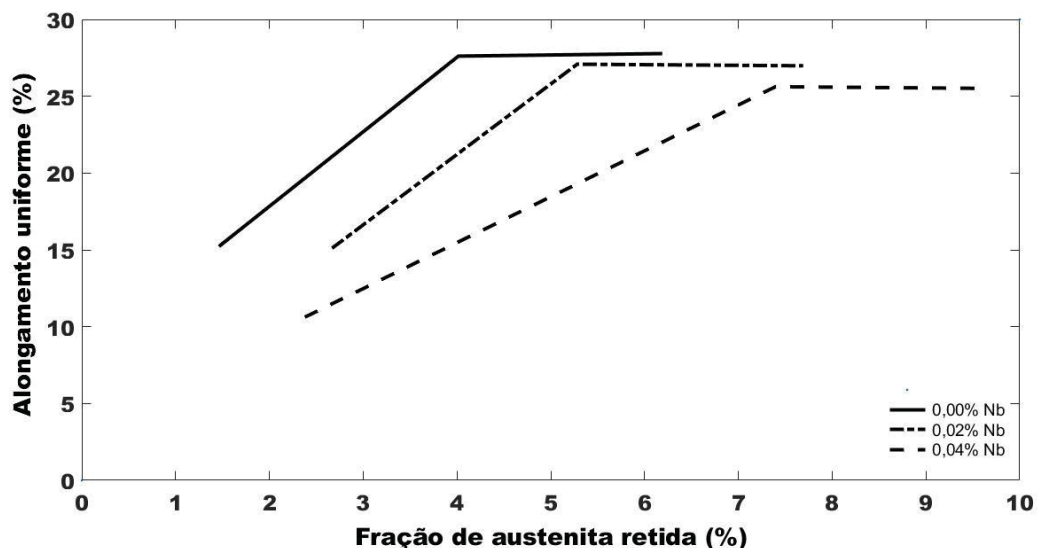
variações significativas. Entretanto, conforme a FIGURA 12, a porcentagem máxima, para que a influência desta fase torne constante no alongamento, podem ser flexibilizadas com a adição de elementos de ligas, por exemplo, o Nb.

FIGURA 11 - COMPARAÇÃO DO ENCRUAMENTO DO AÇO TRIP 350 COM OS AÇOS DP 350 E ARBL 350.



Fonte: Adaptada de ULSAB-AVC (2002).

FIGURA 12 – ALONGAMENTO UNIFORME EM FUNÇÃO DA FRAÇÃO DE AUTENITA RETIDA NOS AÇOS TRIP.

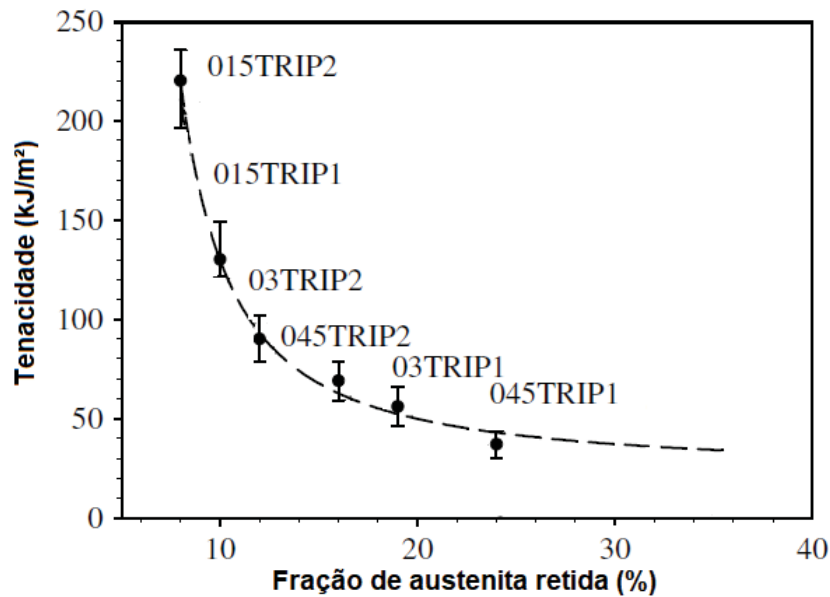


Fonte: Adaptada de Bleck *et al.* (2004).

Conforme Lacroix *et al.* (2008), o mecanismo de fratura dos aços TRIP inicia-se por meio da propagação de trincas na interface das fases α e ϵ , similar aos aços DP, logo a fratura do material ocorre após a transformação da γ_r . Além disso,

reportaram que a tenacidade fratura não é aumentada com a elevação da γ_r acima de 8% nos aços TRIP estudados, conforme FIGURA 13 e TABELA 1, a qual apresenta a composição de cada fase.

FIGURA 13 - TENACIDADE A FRATURA EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE INICIAL DE AUSTENITA RETIDA.



Fonte: Adaptada de Lacroix *et al.* (2008).

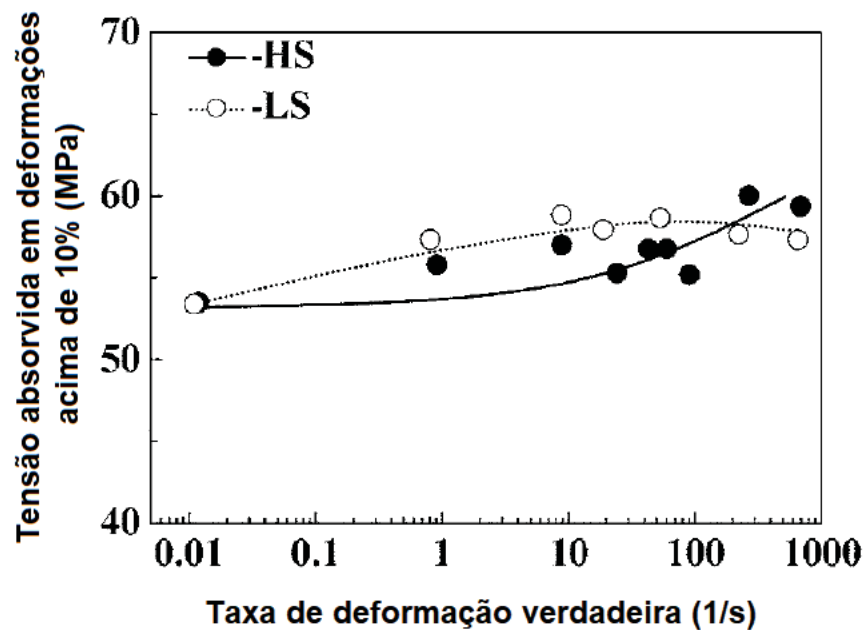
TABELA 1 - FRAÇÃO INICIAL DE CADA FASE DOS AÇOS TRIP INVESTIGADOS DA FIGURA 13.

%	015TRIP1	015TRIP2	03TRIP1	03TRIP2	045TRIP1	045TRIP2
Ferrita	65	64	55	55	27	27
Bainita	25	28	26	32	49	57
Austenita retida	11	8	19	13	24	16

Fonte: Adaptada de Lacroix *et al.* (2008).

Ainda em relação a influência da γ_r na absorção de energia durante a colisão, Choi *et al.* (2006) reportaram que, para os aços TRIP, a tenacidade aumenta de forma proporcional a taxa de deformação. Neste estudo, foi verificado a capacidade de dois aços TRIP de mesma composição química, mas diferentes frações de γ_r e de ϵ , apresentam capacidade absorção de tensão distintas, conforme FIGURA 14. O aço HS é composto por 9,8% de γ_r e 3,6% de ϵ e o aço LS é composto por 9,0% e 5,0% de γ_r e de ϵ , respectivamente.

FIGURA 14 – TENSÃO ABSORVIDA EM DEFORMAÇÕES ACIMA DE 10% EM RELAÇÃO A TAXA DE DEFORMAÇÃO VERDADEIRA DE DOIS AÇOS TRIP DISTINTOS.



Fonte: Choi *et al.* (2006).

Para Bleck *et al.* (2004), para que ocorra o efeito TRIP é necessário estabilizar a γ_r a temperatura ambiente e ajustar os parâmetros do tratamento térmico para evitar a formação de ϵ antes da deformação plástica e, também, obter uma maior ductilidade e coeficiente de encruamento. Segundo Demeri (2013), a estabilização da γ_r é influenciada pela fração de carbono (C) contida no aço. Em baixos níveis de C, a γ_r é instável e, conseqüentemente, o efeito TRIP é potencializado. Em adição, Keeler *et al.* (2017), Suh *et al.* (2009) e Li *et al.* (2018) indicam que o acréscimo de Si, alumínio (Al) e Mn também promovem a estabilização da γ_r na temperatura ambiente, respectivamente.

Segundo Vercammen *et al.* (2004), uma ferramenta que pode ser utilizada para avaliar o mecanismo de deformação que aços que apresentam γ_r em sua microestrutura é por meio da energia de falha de empilhamento (EFE). De acordo com Demeri (2013), baixos valores de EFE, menores que 20 mJ /m², favorecem o efeito TRIP, valores medianos, em torno de 20 a 40 mJ /m², facilitam o efeito TWIP e acima de 40 mJ /m² aumentam a probabilidade de ocorrer apenas deformação por deslizamento.

Conforme Scott *et al.* (2006), além do Ferro (Fe), o C e o Mn são dois elementos importantes no controle da EFE e, por conseguinte, no mecanismo de

deformação do aço, ilustrado na FIGURA 15. Por exemplo, quando comparado a composição química dos aços TRIP 350 e 400 e TWIP 350 e 400, na TABELA 2, é possível notar esta influência, principalmente do Mn, pois é possível notar que os aços que possuem quantidade elevadas deste elemento, tendem a aumentar a EFE e, portanto, diminuir o efeito TRIP e facilitar o efeito TWIP.

FIGURA 15 – INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO DE CARBONO E DE MANGANÊNS NA ENERGIA DE FALHA DE EMPILHAMENTO NOS AÇOS TRIP E TWIP.

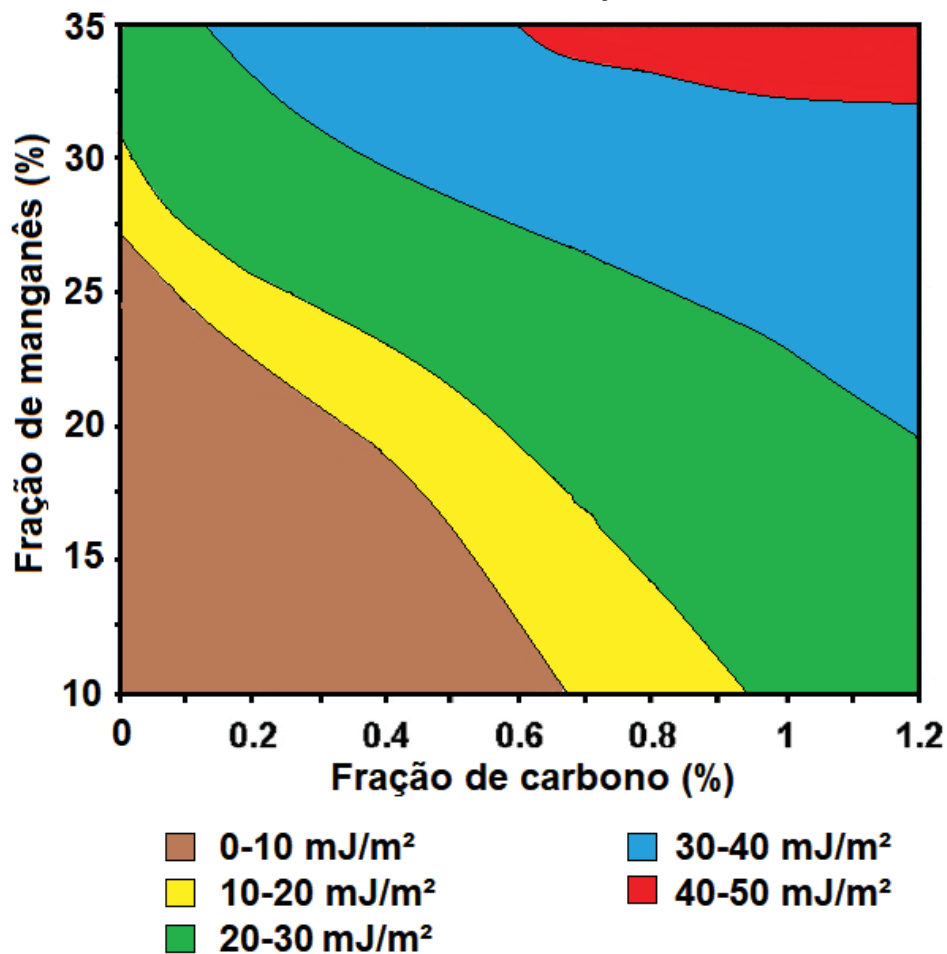


TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUNS AÇOS TRIP e TWIP

Aço	C	Mn	Si	Al
TRIP 350	0,22	1,64	0,001	0,02
TRIP 400	0,27	1,60	2,0	0,021
TWIP 350	0,08	28,0	0,28	1,6
TWIP 400	0,08	25,0	0,24	1,6

Fonte: Adaptada de Curtze (2009), Srivastava *et al.* (2006) e Gu *et al.* (2019).

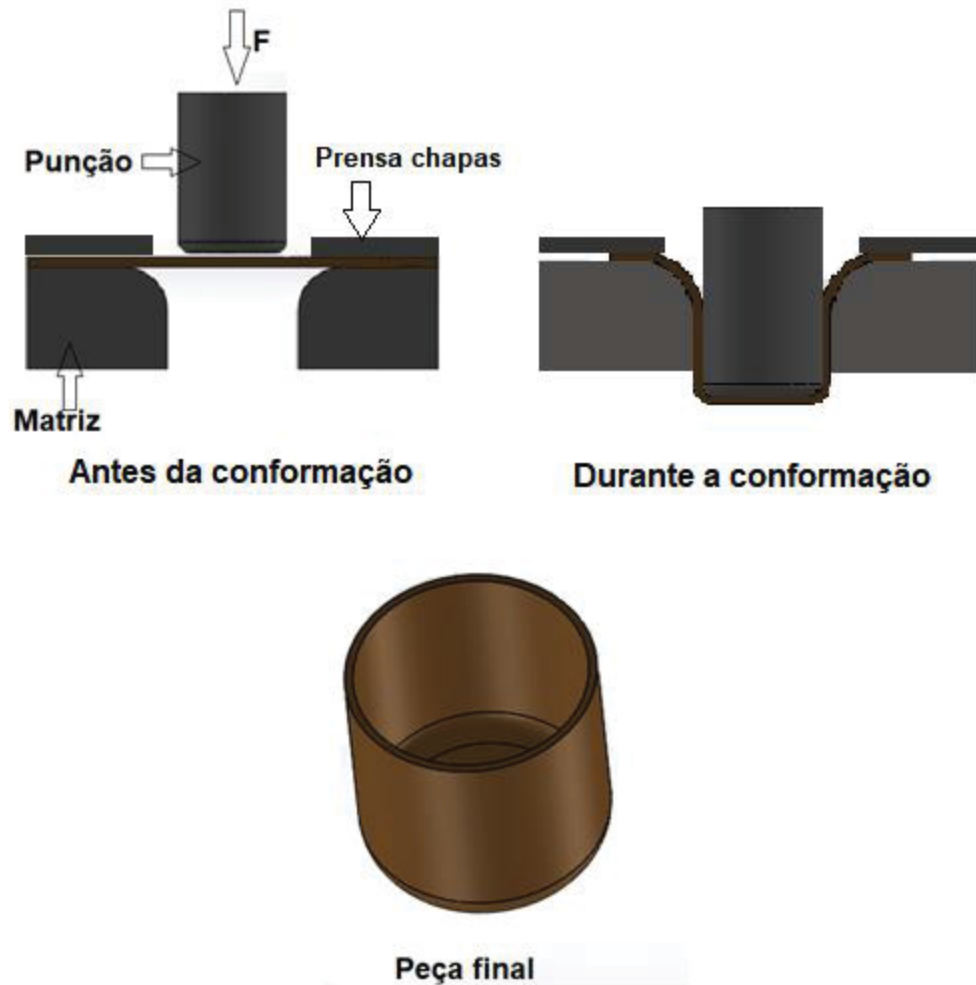
2.2 ESTAMPAGEM EM CHAPAS METÁLICAS

A conformação mecânica por estampagem consiste na deformação de chapas em matrizes por meio de um punção com intuito de obter determinadas geometrias pré-estabelecidas, por exemplo, o formato de um copo, que pode ser visto na FIGURA 15. Estes processos, de acordo com Altan e Tekkaya (2012a), podem produzir peças em um curto espaço de tempo e baixo custo, quando produzidas em médias e elevadas quantidades. No entanto, conhecer as variáveis do processo, para obter as propriedades desejadas após a conformação do *blank*, é fundamental para que os resultados sejam eficientes e eficazes.

Segundo Altan e Tekkaya (2012a), os principais parâmetros são:

- Comportamento plástico e conformabilidade da chapa sobre as condições aplicadas;
- Geometria, material e revestimentos da matriz;
- Atrito e lubrificação;
- Tensões, deformações e forças aplicadas;
- Geometria, tolerância, acabamento superficial e propriedades mecânicas das peças que serão conformadas;
- Efeito do processo no ambiente – poluição, disponibilidade recursos naturais, entre outros.

FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM EM CHAPAS METÁLICAS.

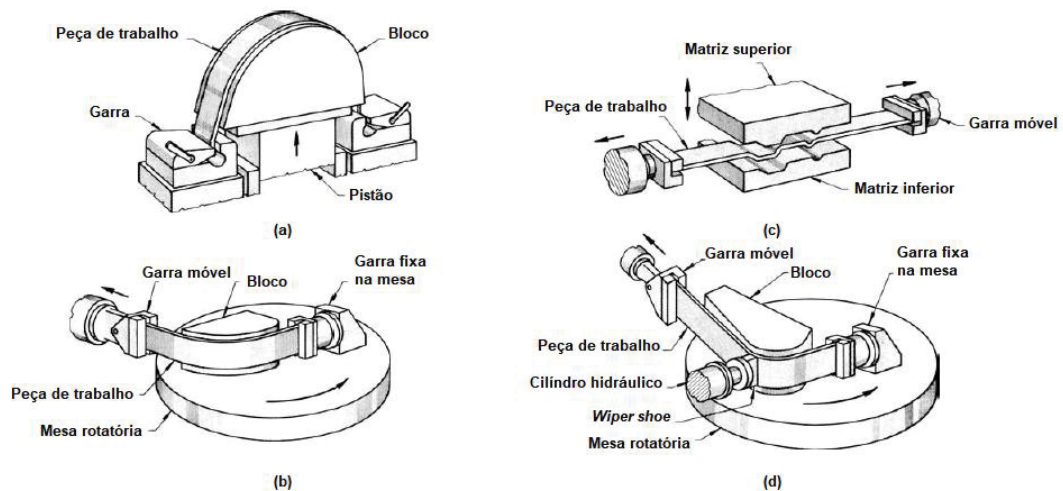


Fonte: O Autor (2022).

2.2.1 Estiramento

Conforme Semiatin *et al.* (2006), o estiramento é um processo em que consiste em deformar chapas sobre uma matriz ou bloco com intuito de obter uma determinada geometria. Para Altan e Tekkaya (2012b), este processo, na indústria automotiva, é comumente utilizado durante o processo de manufatura em portas, tetos, para-choques e outros componentes da carroceria de veículos. A FIGURA 17 apresenta algumas operações de estiramento em chapas metálicas.

FIGURA 17 – OPERAÇÕES DE ESTIRAMENTO DE CHAPAS METÁLICAS.



Fonte: Adaptada de Semiatin *et al.* (2006).

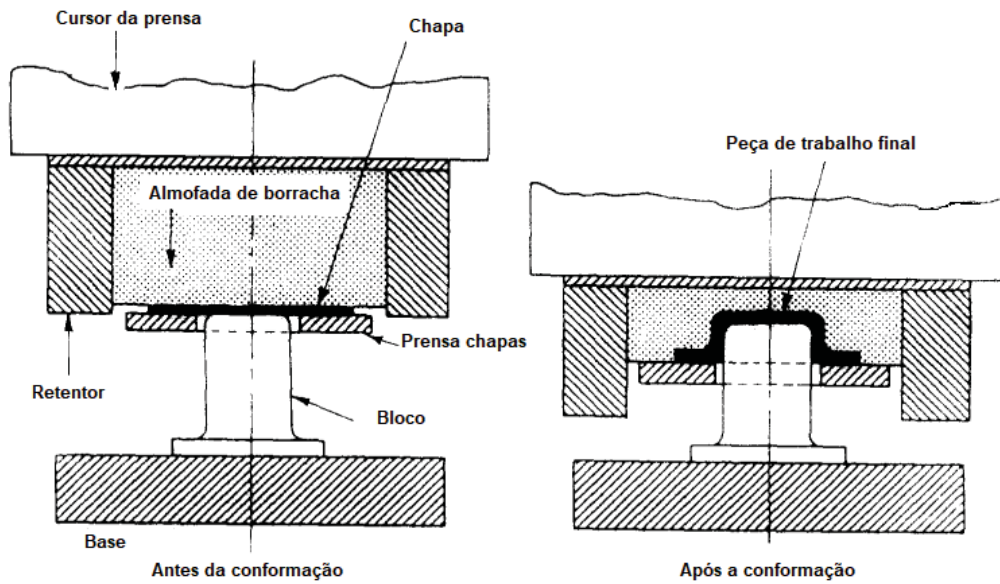
2.2.2 Estampagem profunda

De acordo com Semiatin *et al.* (2006), a estampagem profunda ou embutimento é um processo usado para conformar peças em que um *blank* é preso por prensa chapas e, em seguida, é deformado por um punção para o interior da cavidade da matriz. A FIGURA 16 e a FIGURA 18 apresentam os métodos de embutimento por matriz rígida e por matriz flexível (processo de Marform), respectivamente.

Altan e Tekkaya (2012b) e Semiatin *et al.* (2006) corroboram que durante a estampagem profunda, por exemplo, durante a conformação de um formato de copo, diversas forças agem sobre a chapa, como estiramento na parede e na base, atrito e compressão no flange e dobramento no raio da matriz, ilustrado na FIGURA 19. Conforme Huang e Chen (1996), contudo, a intensidade das forças, citadas anteriormente, podem variar de acordo com a folga do punção com a matriz, lubrificação, raio da matriz e variação da força do prensa chapas.

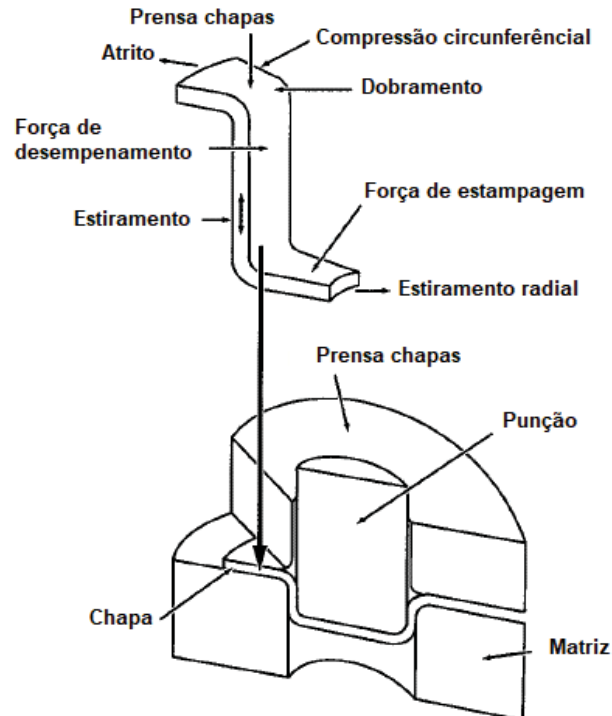
De acordo com Padmanabhan *et al.* (2007), o parâmetro que exerce maior influência no comportamento processo de estampagem de aços inoxidáveis é o raio da matriz, cerca 89,2%, seguido pela força de atrito, em torno de 6,3%, e por último a força do prensa chapas, por volta de 4,5%. Contudo, conforme Raju *et al.* (2010), para chapas de alumínio AA 6061, a influência é alterada para 66,49% e 29,16% para o raio da matriz e para força do prensa, chapas, respectivamente, e o restante para raio de dobramento do punção.

FIGURA 18 – ESTAMPAGEM PROFUNDA POR MATRIZ FLEXÍVEL PELO PROCESSO DE MARFORM.



Fonte: Adaptada de Venkatesh e Goh (1986).

FIGURA 19 – PRINCIPAIS FORÇAS QUE AGEM NA CHAPA DURANTE O EMBUTIMENTO DE UM COPO.



Fonte: Adaptada de Semiatin *et al.* (2006).

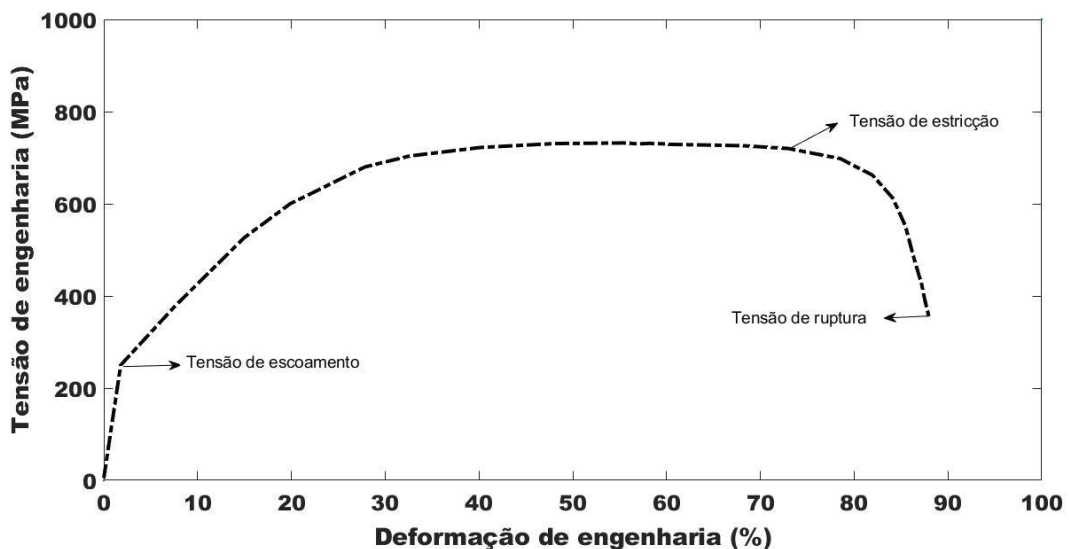
Já para as chapas metálicas, de acordo com Semiatin *et al.* (2006), as seguintes propriedades devem ser consideradas no projeto:

- Composição química – quantidade máxima de inclusões para obter melhor estampabilidade;
- Propriedades mecânicas – alongamento, tensão de escoamento e de estrição, coeficiente de encruamento e fator anisotropia;
- Propriedades físicas – dimensões, geometria, módulo de elasticidade.

2.2.3 Coeficiente de encruamento

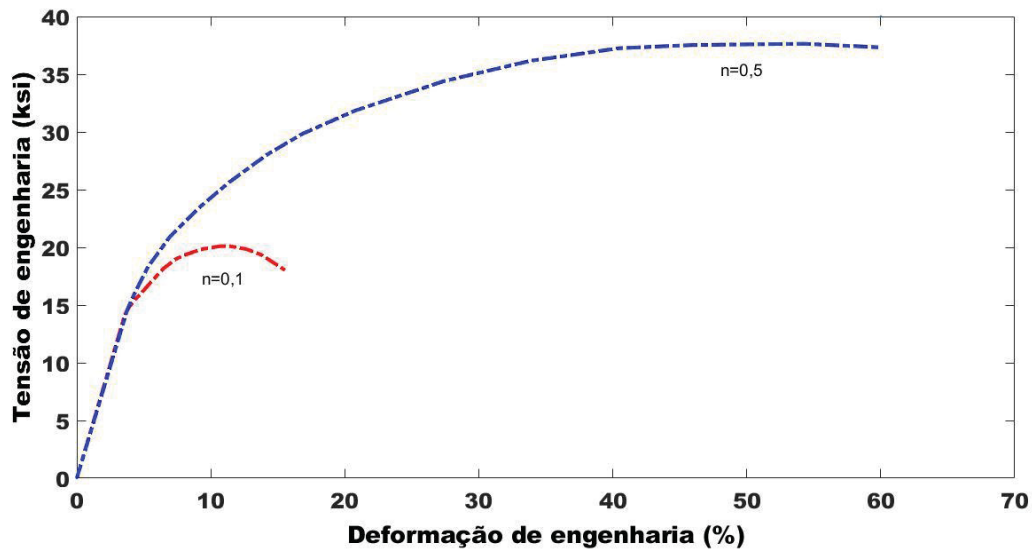
O coeficiente de encruamento (n) é um parâmetro utilizado para mensurar a matematicamente a proporção de aumento da resistência mecânica, por trabalho a frio, causado na zona de deformação plástica do material, ilustrado na FIGURA 20. Segundo Keeler (1968), a inclinação da curva, a partir desta zona, é proporcional ao n do material, conforme FIGURA 21. Em outras palavras, quanto maior for o n maior será a estampabilidade e resistência ao afinamento da chapa para materiais de mesma tensão de escoamento.

FIGURA 20 – COMPORTAMENTO DE DEFORMAÇÃO NA CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO.



Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 21 – INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO NO AUMENTO DE RESISTÊNCIA PARA MATERIAIS DE MESMA TENSÃO DE ESCOAMENTO.



Fonte: Adaptada de Keeler (1968).

Para descrever a curva tensão deformação, geralmente, são utilizadas diversas equações, como de Hollomon (EQUAÇÃO 1), Swift (EQUAÇÃO 2) e a de Ludwik (EQUAÇÃO 3), as quais consideram o n constante. Contudo, em alguns aços de microestrutura multifásica, por exemplo, o DP600 e TRIP600 o n , conforme FIGURA 22, é alterado com o aumento da deformação e, portanto, estas equações não são precisas.

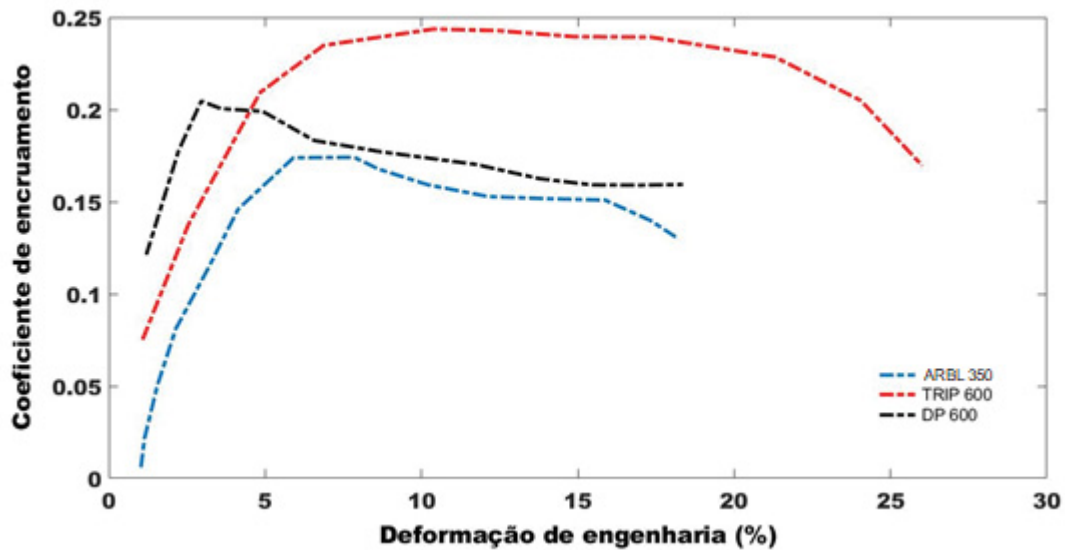
$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

$$\sigma = K(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (3)$$

Onde: σ é a tensão verdadeira, σ_0 é a tensão de escoamento, K é o coeficiente de resistência e ε é a deformação verdadeira.

FIGURA 22 – COMPORTAMENTO COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO EM RELAÇÃO A DEFORMAÇÃO PARA OS AÇOS TRIP 600, DP 600 E ARBL 350.



Fonte: Adaptada de Konieczny (2003).

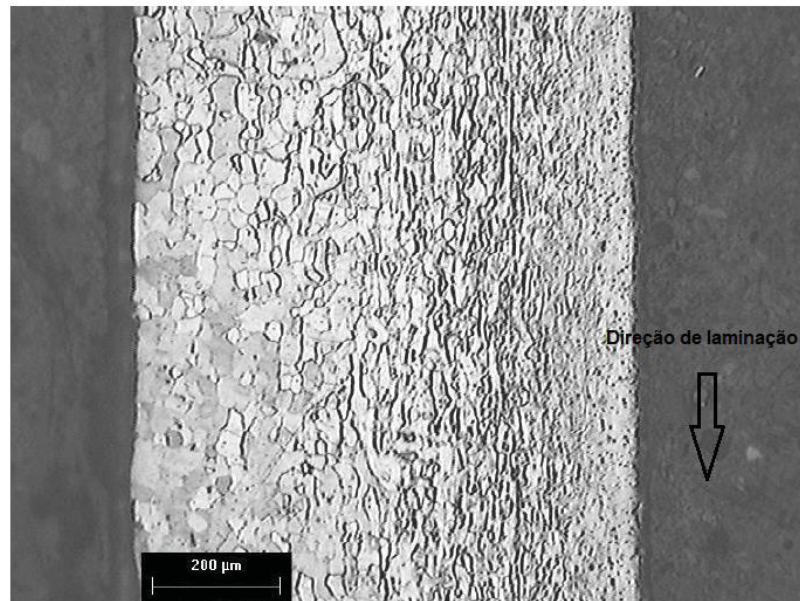
2.2.4 Fator anisotropia

Os aços laminados a frio devido ao encruamento nos grãos em uma direção preferencial causada pelos rolos, conforme FIGURA 23, apresentam variações em suas propriedades mecânicas em diferentes orientações como, por exemplo, tensão de escoamento, alongamento. O fator anisotropia normal (r) ou coeficiente de Lankford, calculado pela EQUAÇÃO 4, mensura a variação do alongamento uniforme na largura (ε_L) em relação ao alongamento uniforme na espessura (ε_e) da chapa, que são obtidos. Nota-se, portanto, que quanto maior for este parâmetro, apresentará maior resistência a afinamento do material.

$$r = \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_e} = \frac{\ln\left(\frac{L_f}{L_i}\right)}{\ln\left(\frac{t_f}{t_i}\right)} \quad (4)$$

Em que: L_i é a largura inicial, t_i é a espessura inicial, L_f é a largura final e t_f é a espessura final da chapa, sendo os dois últimos obtidos por meio do ensaio de tração na direção de laminação selecionada.

FIGURA 23 - MICROGRAFIA DO AÇO DC 06.



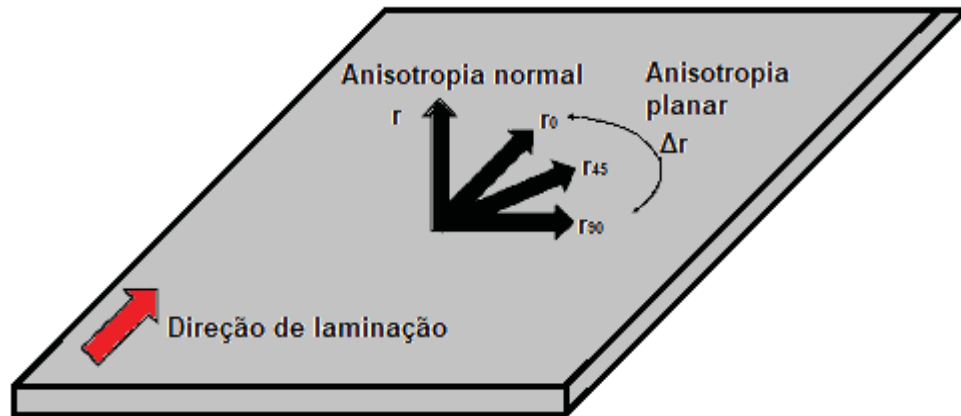
Fonte: Adaptada de Chemin Filho (2004).

Além da anisotropia normal, que mede as variações das propriedades do material em relação a espessura, existe a anisotropia planar que mensura a diferença das propriedades no plano da chapa em diferentes direções. As propriedades nas direções 0°, 45° e 90° em relação a direção de laminação, ilustrado na FIGURA 24, são obtidas, também, por meio ensaio de tração. A anisotropia no plano da chapa é determinada por meio do coeficiente de anisotropia planar (Δr) que é dado pela EQUAÇÃO 5.

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (5)$$

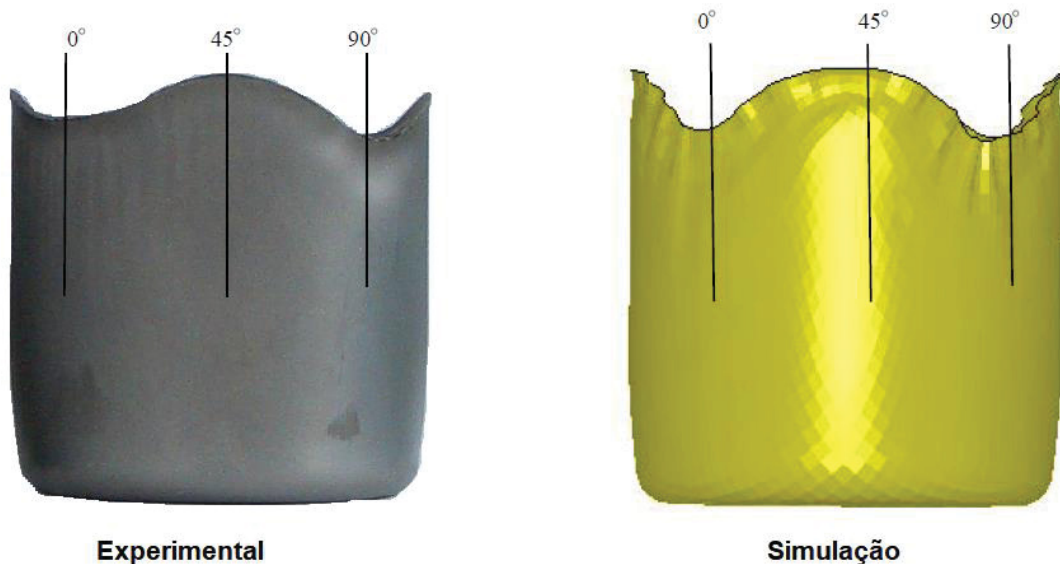
Segundo Hosford e Caddell (2007), se o valor do Δr for menor que zero ocorre o defeito de orelhamento, representado na FIGURA 25, na direção de 45°, contudo se for maior que zero este fenômeno acontece nas direções de 0 e 90°. O orelhamento é indesejável no processo de estampagem, pois, após a operação, é necessário aparar estas rebarbas, condição que aumenta os custos de produção. Portanto, quando mais próximo de zero for o Δr da chapa, maior a tendência de uma estampagem uniforme.

FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO NA CHAPA DA ANISOTROPIA NORMAL E PLANAR EM FUNÇÃO DA DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO.



Fonte: Adaptada de Hosford e Caddell (2007).

FIGURA 25 – ORELHAMENTO NAS DIREÇÕES DE 0°, 45° E 90° EM UM PROCESSO DE EMBUTIMENTO.



Fonte: Ohwe e Kobayashi (2014).

Ainda em relação a anisotropia normal, o coeficiente de anisotropia normal médio (r_m), EQUAÇÃO 6, consiste de um valor médio que leva em consideração o coeficiente de Lankford das três direções de laminação do material em relação a espessura do material. Portanto, assim como o coeficiente de Lankford, quanto maior for valor o coeficiente de anisotropia normal médio, melhor estampabilidade o material apresentará. A TABELA 3 apresenta valores de coeficiente de anisotropia normal médio de alguns aços utilizados na indústria automotiva

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (6)$$

TABELA 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALGUNS AÇOS COMUMENTE UTILIZADOS NA INDUSTRIA AUTOMOTIVA.

Aço	Alongamento total (%)	n (5-15%)	r _m
BH 210	34-39	0,18	1,8
BH 260	29-34	0,13	1,6
DP 280	30-34	0,21	1,0
DP 300	30-34	0,16	1,0
ARBL 350	23-27	0,14	1,1
DP 350	24-30	0,14	1,0
DP 400	19-25	0,14	1,0
TRIP 450	26-32	0,24	0,9
DP 500	14-20	0,14	1,0
CP 700	10-15	0,13	1,0
DP 700	12-17	0,09	0,9
MS 950	5-7	0,07	0,9
MS 1250	4-6	0,065	0,9

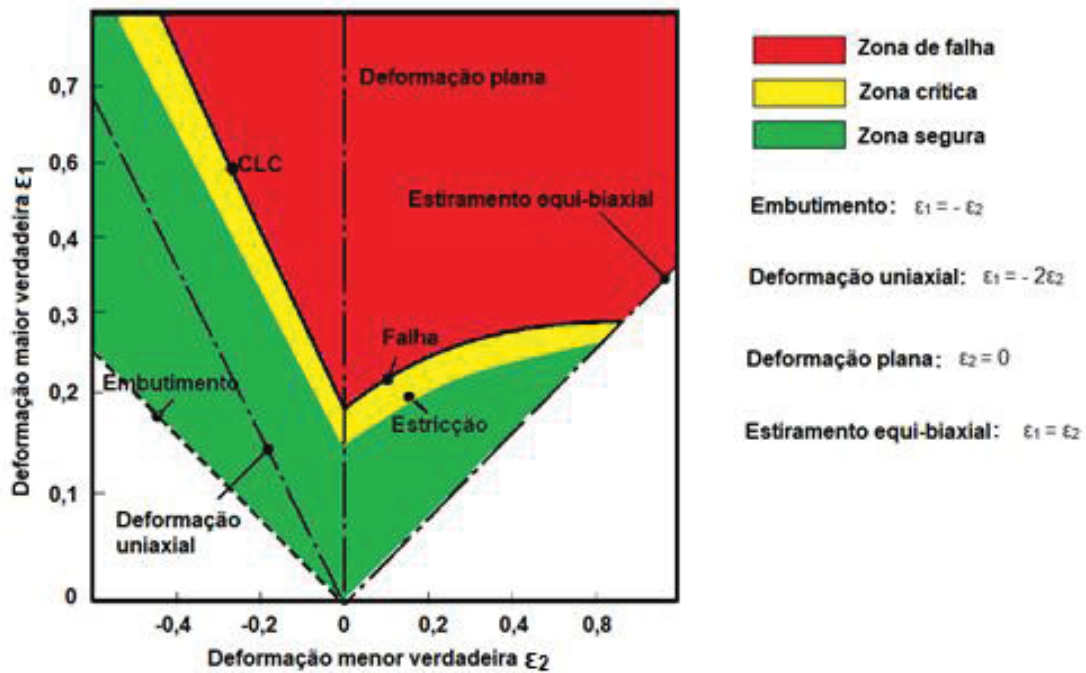
Fonte: Adaptada de Semiatin *et al.* (2006).

2.2.5 Curva limite de conformação

A curva limite de conformação (CLC) indica a quantidade em que um material pode ser deformado até sofrer estrição, com a combinação dos estados de deformação plana, deformação uniaxial, embutimento e estiramento. A CLC possui três zonas de deformação que devem ser analisadas antes da conformação: a zona segura, onde não é esperada a falha durante a conformação; a zona crítica, a qual a probabilidade de estrição é alta; a zona de falha, em que ocorre o aumento da probabilidade de ruptura da chapa. A FIGURA 26 ilustra estas zonas.

A CLC é determinada por meio da medição das deformações no plano ao longo de direções predefinidas, seguida por uma interpolação de dados que permite obter os limites de conformação da chapa, a fim de evitar a estrição. Para evitar defeitos durante a estampagem, Santos (2007) recomenda utilizar uma margem de 10% abaixo da CLC, pois valores acima ou muito próximos da curva aumentam a probabilidade de ocorrerem falhas.

FIGURA 26 – ZONAS DO DIAGRAMA LIMITE DE CONFORMAÇÃO.

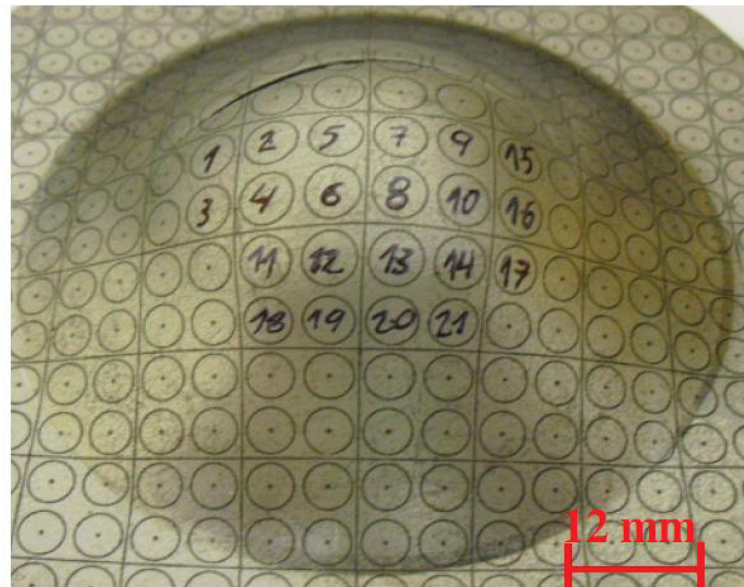


Fonte: O Autor (2022).

As CLCs podem ser descritas por ensaios experimentais, elementos finitos e por deduções matemáticas. Nos ensaios experimentais, como de Nakazima ou de Marciniak, o processo de descrição da CLC é iniciado pela medição dos círculos na malha gravada nos corpos de prova (CP), após a sua ruptura.

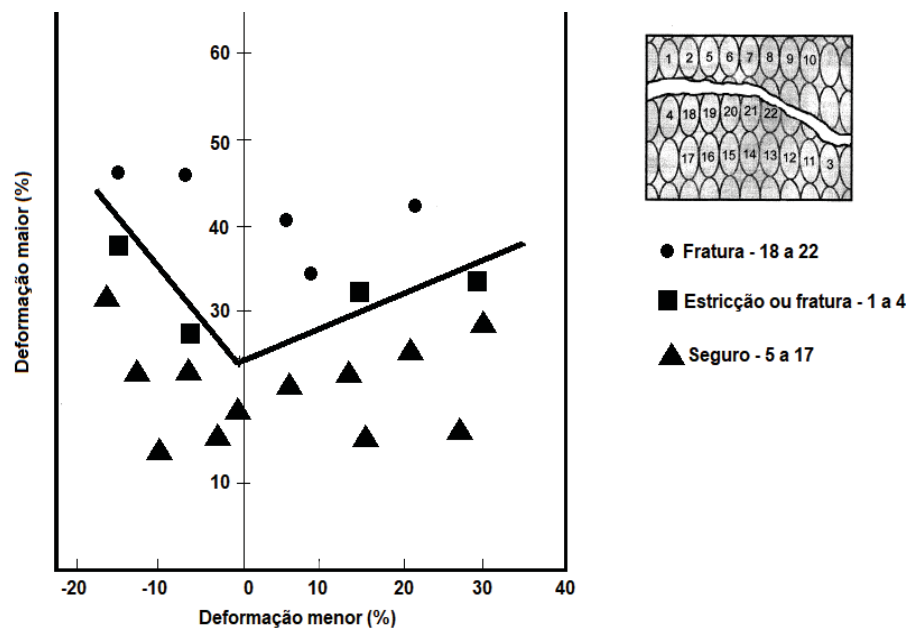
Na bibliografia, existem diversos trabalhos que orientam quais círculos ou elipses, dependendo do tipo do estado de deformação, que devem ser analisados em relação a região de fraturas do CP. Por exemplo, Gipiela *et al.* (2014) realizaram a medição da malha no lado apostado da trinca, conforme os círculos numerados na FIGURA 27, indicando os limites de ruptura do material. No entanto, Hecker (1975) mensura os círculos ou elipses na vizinhança do local de ruptura, condição em que possibilita traçar, além das deformações de ruptura, estricção e os valores considerados seguros na conformação, como pode ser visto na FIGURA 28.

FIGURA 27 – CÍRCULOS SELECIONADOS PARA MEDIÇÃO NO CORPO DE PROVA.



Fonte: Gipiela *et al.* (2014).

FIGURA 28 – CLC COM AS ELIPSES OU CÍRCULOS SELECIONADOS PARA MEDIÇÃO NO CORPO DE PROVA.



Fonte: Adaptada de Banabic (2010) e Hecker (1975).

A medição da malha, após o ensaio, pode ser realizada com paquímetro, escala graduada, microscópio, gabarito e por sistemas ópticos. Por meio do formato final das elipses na malha é possível identificar qual estado de deformação em que o CP está submetido localmente. Os estados de embutimento e deformação uniaxial ocorrem quando aumenta o diâmetro maior final da elipse (D_1) e diâmetro menor final (D_2) é

reduzido em relação ao diâmetro inicial do círculo (D_0), conseqüentemente, aumentando a deformação maior verdadeira (ε_1), EQUAÇÃO 7, e a deformação menor verdadeira (ε_2), EQUAÇÃO 8, respectivamente. Para o estado de deformação plana, D_1 aumenta e D_2 permanece o mesmo do D_0 , logo, tornando o valor ε_2 igual a zero. Já para todos os tipos de estiramento, D_1 e D_2 são ampliados. A FIGURA 29 ilustra as condições citadas anteriormente.

$$\varepsilon_1 = \ln (1 + e_1) \quad (7)$$

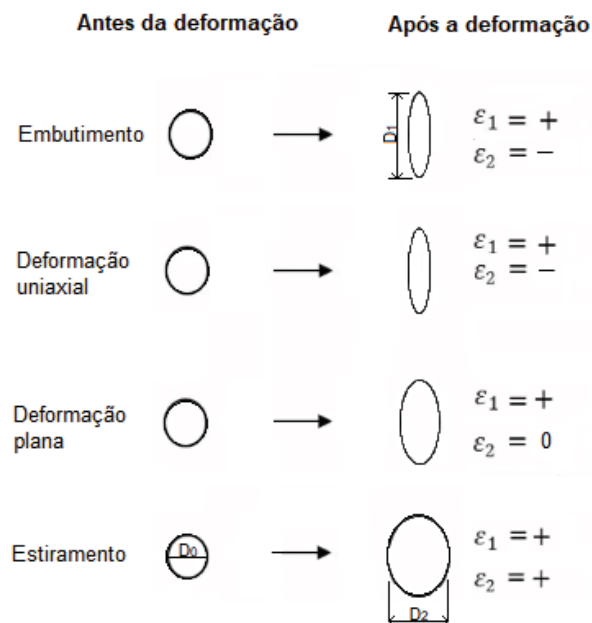
$$\varepsilon_2 = \ln (1 + e_2) \quad (8)$$

$$e_1 = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad (9)$$

$$e_2 = \frac{D_2 - D_0}{D_0} \quad (10)$$

Onde e_1 , EQUAÇÃO 9, e e_2 , EQUAÇÃO 10, é a deformação maior e a deformação menor, respectivamente.

FIGURA 29 – COMPORTAMENTO DOS CÍRCULOS COM BASE NO ESTADO DE DEFORMAÇÃO LOCAL DO CORPO DE PROVA.



Fonte: O Autor (2022).

Segundo a norma DIN EN ISO 12004-2 (2009), que rege os ensaios experimentais de Nakazima e de Marciniak em laboratório, o diâmetro inicial dos círculos gravados na chapa deve possuir de uma a duas vezes e meia a espessura do CP. Para aços a espessura não deve ultrapassar 2,5 mm e para ligas de alumínio 4 mm. Por exemplo, em um CP de aço com 1 mm de espessura o diâmetro máximo dos círculos da malha não pode ultrapassar 2,5 mm de diâmetro, pois, caso contrário, a probabilidade de a medição ser imprecisa aumenta, conseqüentemente, influenciando no resultado.

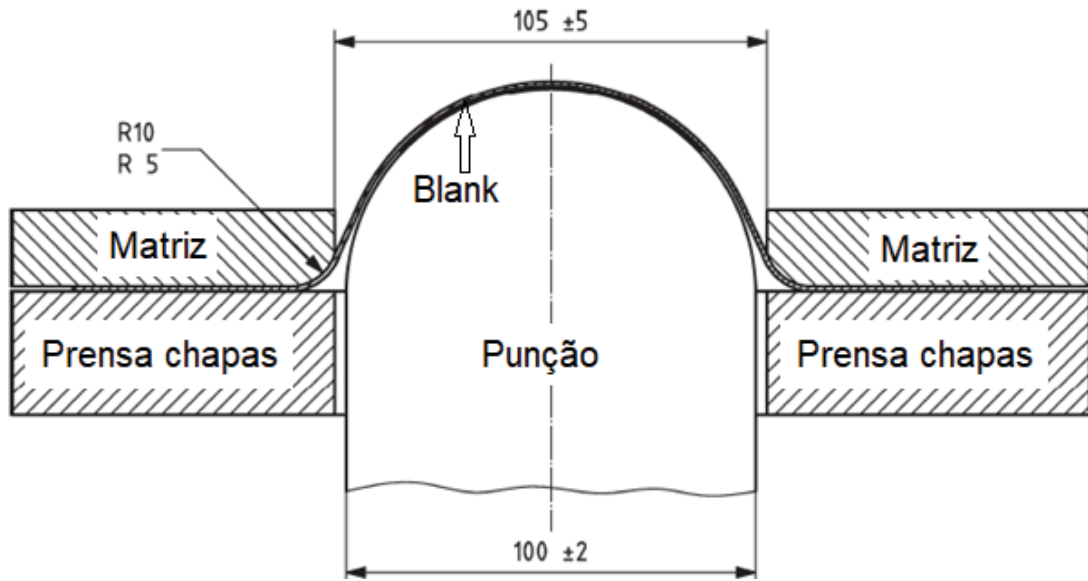
Conforme Lange *et al.* (1985), alguns fatores influenciam nos resultados dos ensaios experimentais dos ensaios para levantamento da CLC, dentre eles estão: espessura da chapa, tipo do lubrificante utilizado, atrito, raio e tipo de punção, diâmetro dos círculos da malha, direção de laminação da chapa, propriedades mecânicas (coeficiente de encruamento e fator anisotropia, por exemplo) do material e tipo de deformação. Em adição, de acordo com Banabic (2010), a velocidade de avanço do punção, força do prensa chapas e pressão hidrostática alteram o resultado final do teste.

Portanto, para diminuir as discrepâncias dos resultados de um laboratório para outro, a norma DIN EN ISO 12004-2 (2009) recomenda utilizar uma velocidade de avanço do punção de 1,5 mm/s e temperatura ambiente do ensaio de 23°C. Além disso, os CPs de aço devem ser cortados de forma perpendicular e para alumínio paralelo a direção de laminação.

2.2.5.1 Ensaios de Nakazima e de Marciniak

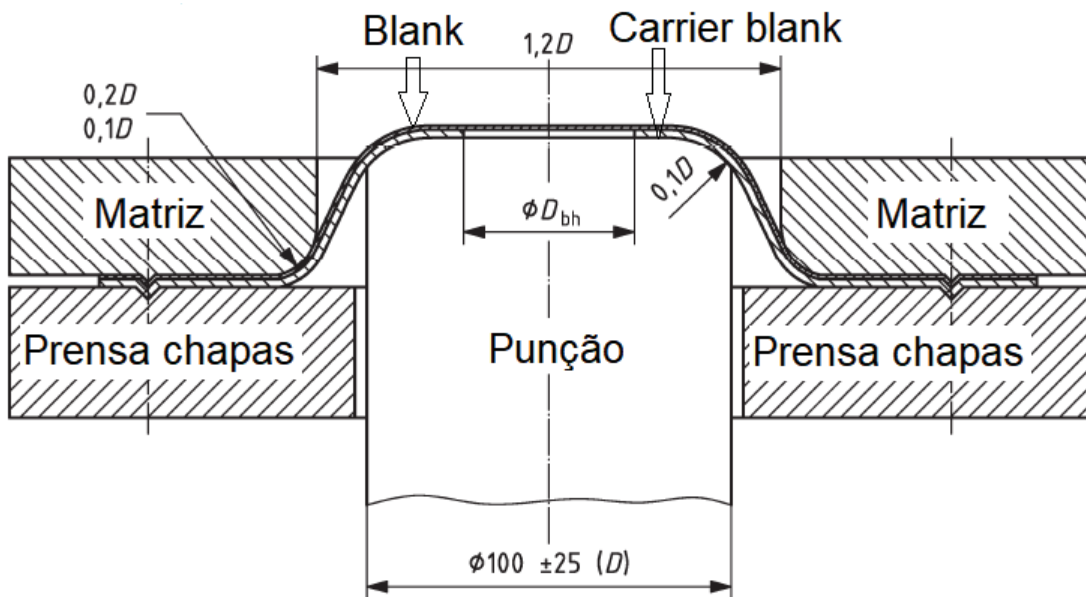
Segundo DIN EN ISO 12004-2 (2009), o teste de Nakazima consiste em um punção hemisférico que varia de 98 até 102 mm de diâmetro, uma matriz com raio no intervalo de 5 a 10 mm, prensa chapas com *drawbead* e a chapa metálica do CP, conforme FIGURA 30. Já o ensaio de Marciniak, é composto por um punção cilíndrico, geralmente, de 100 mm de diâmetro com chanfro de 10 mm, matriz de raio 20 mm, prensa chapas com *drawbead*, *blank* do CP e o *carrier blank* (CB). Na FIGURA 31, nota-se que o diâmetro do punção (D), padrão de referência, influencia diretamente nas dimensões do *clearance* entre o punção e a matriz, raio da matriz e do chanfro do punção.

FIGURA 30 – PADRÃO DE FERRAMENTAL DO TESTE DE NAKAZIMA.



Fonte: Adaptada de DIN EN ISO 12004-2 (2009).

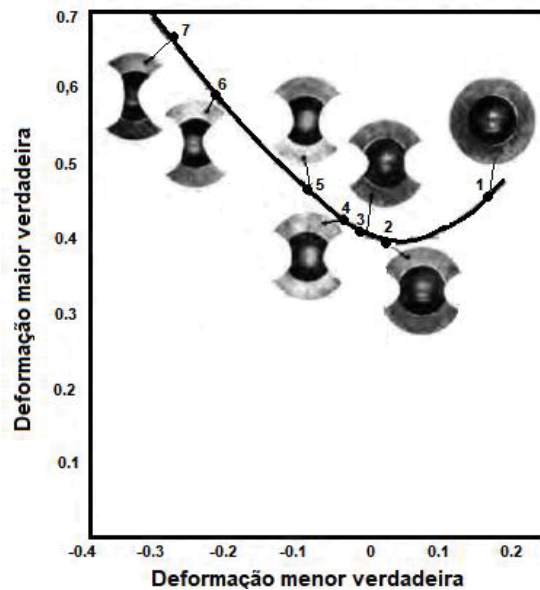
FIGURA 31 – PADRÃO DE FERRAMENTAL DO TESTE DE MARCINIAK.



Fonte: Adaptada de DIN EN ISO 12004-2 (2009).

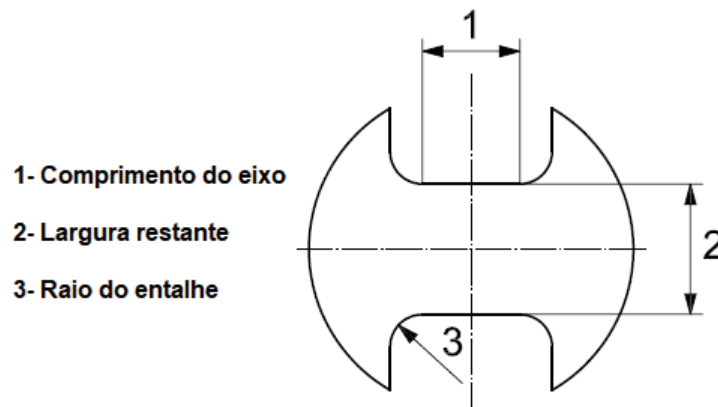
Em ambos os ensaios, são utilizados CPs que possuem de 190 a 200 mm de comprimento, espessura de 0,3 a 4 mm e diferentes larguras, com intuito de verificar os estados de deformação plana, uniaxial, embutimento e estiramento, conforme FIGURA 32. Segundo a DIN EN ISO 12004-2 (2009), a geometria dos CPs, para aços, pode ser circular ou retangular, apresentam um entalhe com raio entre 20 e 30 mm e comprimento de eixo de 25 a 50 mm, conforme FIGURA 33.

FIGURA 32 – INFLUÊNCIA DA LARGURA NO ESTADO DE DEFORMAÇÃO DOS CORPO DE PROVA.



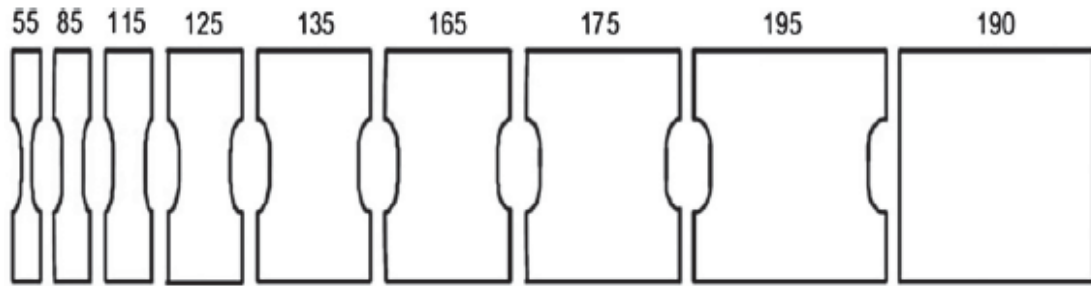
Fonte: Adaptada de Lange *et al.* (1985).

FIGURA 33 – DESCRIÇÃO DO CORPO DE PROVA UTILIZADO NESTES ENSAIOS.

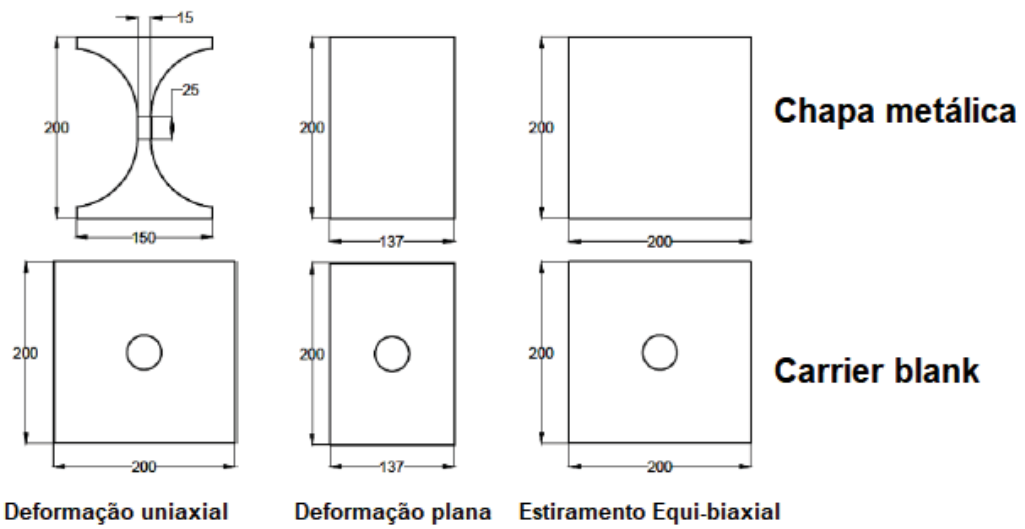


Fonte: Adaptada de DIN EN ISO 12004-2 (2009).

Panich *et al.* (2013), para o aço DP 780, utilizaram para o ensaio de Nakazima um total 9 CPs com 190 mm de comprimento e largura no intervalo de 55 a 190 mm, ilustrado na FIGURA 34. Para o teste de Marciniak, Cheng *et al.* (2017) usaram, apenas, 3 CPs de aço DP 600 com seus respectivos CBs de aço *Interstitial-free*, com furo de 50 mm de diâmetro, conforme FIGURA 35, todos com 200 mm de comprimento. Santos (2007), entretanto, utilizou outra configuração especificada na norma, com CPs de geometria retangular e sem entalhe, com 200 mm de comprimento e largura variando entre 80 e 200 mm, FIGURA 36, e CBs de Al com diâmetro e espessura do furo de 50 mm e 2 mm, respectivamente.

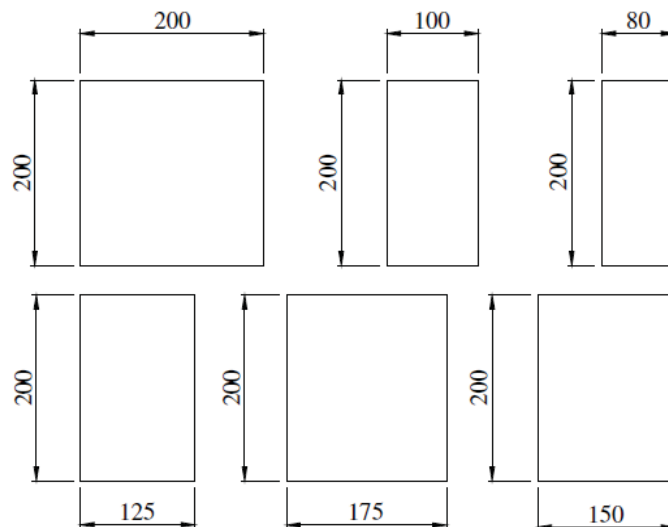
FIGURA 34 – CONFIGURAÇÃO UTILIZADA POR PANICH *ET AL.* PARA O ENSAIO DE NAKAZIMA

Fonte: Panich *et al.* (2013).

FIGURA 35 – CONFIGURAÇÃO UTILIZADA POR CHEN *ET AL.* NO TESTE DE MARCINIAK

Fonte: Adaptada de Cheng *et al.* (2017).

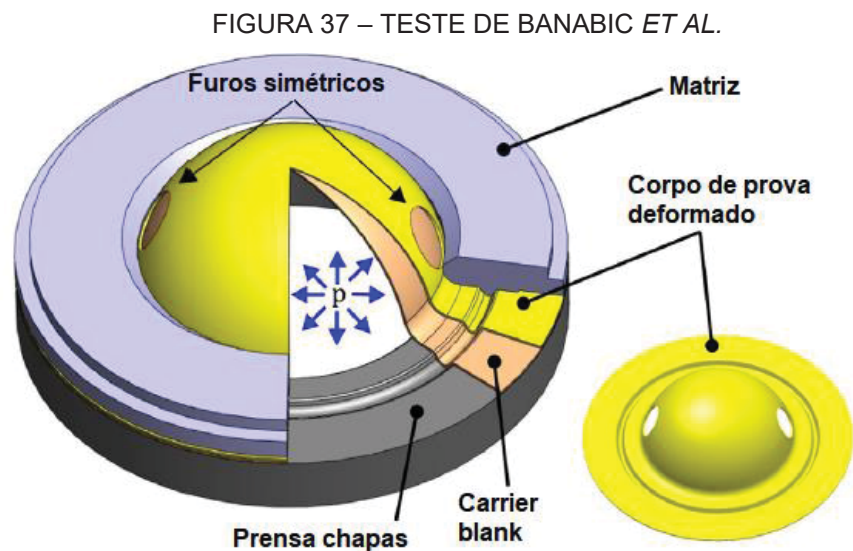
FIGURA 36 – CONFIGURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA APLICADA POR SANTOS NO TESTE DE MARCINIAK.



Fonte: Santos (2007).

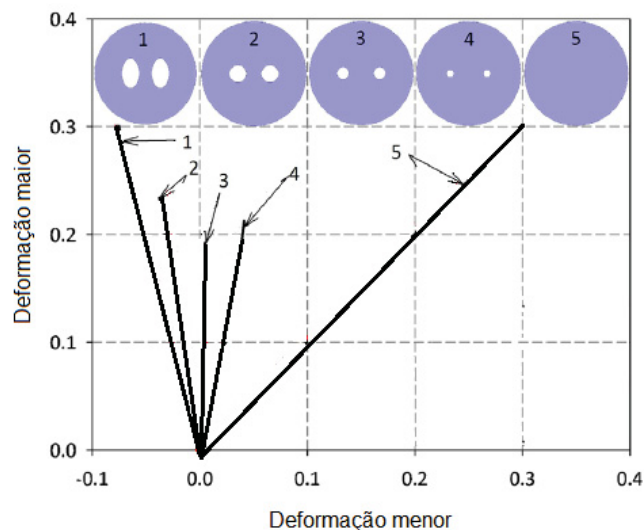
2.2.5.2 Ensaio de Banabic

O teste de proposto por Banabic *et al.* (2013) é composto por um prensa chapas, uma matriz com raio de 6 mm e abertura de 100 mm, CB e o CP, ilustrado na FIGURA 37. Este ensaio descreve cinco pontos na CLC, FIGURA 38, onde o CP e o CB são deformados simultaneamente por um fluido submetido a uma pressão p . Os CPs são deformados até a ruptura e possuem furos simétricos de diferentes dimensões para induzir diferentes estados de deformação, demonstrado na FIGURA 39 e TABELA 4, os quais tem como objetivo reduzir o atrito na região polar e medir o estado de deformação no CP, para posterior descrição da CLC.



Fonte: Adaptada de Banabic *et al.* (2013).

FIGURA 38 – INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO FURO EM SUA POSIÇÃO NA CLC.



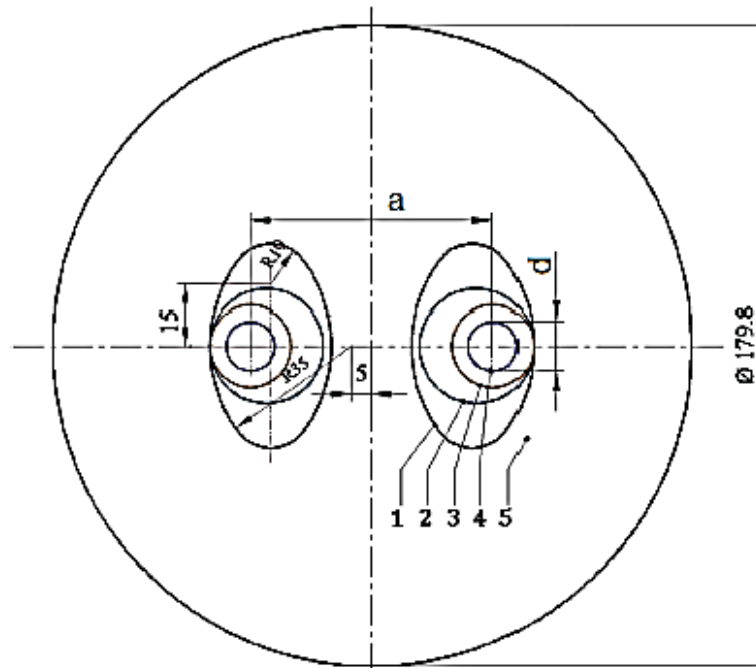
Fonte: Adaptada de Banabic *et al.* (2013).

TABELA 4 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA DO TESTE DE BANABIC.

Número do corpo de prova	1	2	3	4	5
Distância entre centros (a) x diâmetro d (mm)	FIGURA 40	52 x 28	60 x 20	60 x 12	0 x 0

Fonte: Banabic *et al.* (2013).

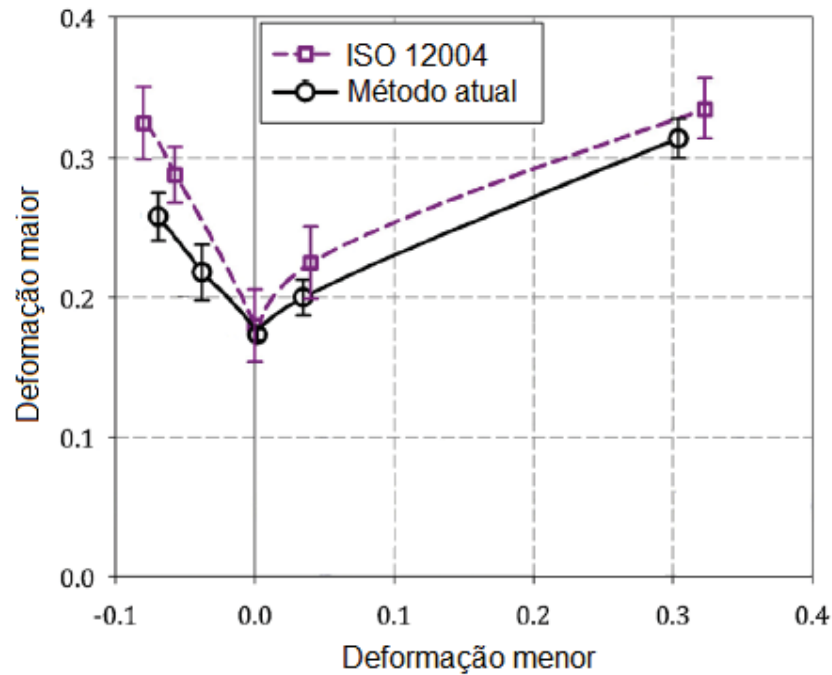
FIGURA 39 – ILUSTRAÇÃO DAS DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO DE BANABIC.



Fonte: Banabic *et al.* (2013).

Os autores realizaram a medição das deformações por meio de um sistema óptico. Para o ensaio foram utilizados CPs de ligas de alumínio AA6016-T4 com 1 mm de espessura e CB de aço DC 06 com 0,85 mm de espessura. Como resultado para a liga de alumínio AA6016-T4, chegaram a resultados próximos ao método de Nakazima, como pode visto na FIGURA 40. Além disso, descreveram, para este material, uma CLC com menor influência tribológica e mais conservadora nas deformações por embutimento e estiramento, em relação ao teste de Nakazima, condição que diminui a probabilidade de causar estricção e ruptura durante a conformação.

FIGURA 40 – COMPARAÇÃO DA CLC OBTIDA PELO ENSAIO DE BANABIC COM O TESTE DE NAKAZIMA PARA A LIGA DE ALUMÍNIO AA6016-T4.

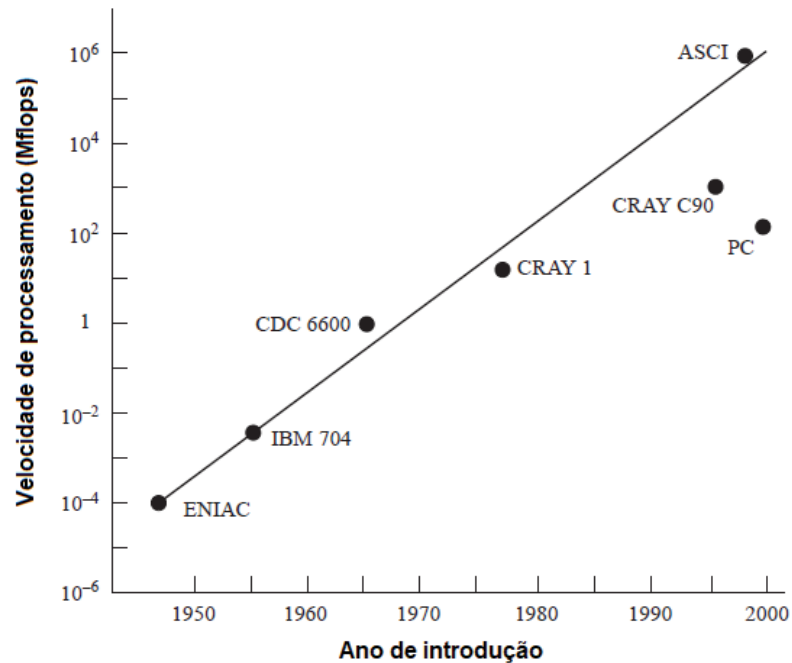


Fonte: Adaptada de Banabic *et al.* (2013).

2.3 MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Diversos comportamentos na área de conformação mecânica podem ser resolvidos por meio de equações diferenciais. Contudo, o tempo dispendido para resolvê-las manualmente pode ser improdutivo ou até inviável dependendo da complexidade do problema. Segundo Reddy (2015), nas últimas 4 décadas, com o aprimoramento da computação eletrônica e aplicação de softwares de simulação numérica, o tempo de análise e a capacidade de resolução de comportamentos complexos foi melhorada de maneira exponencial. A FIGURA 41 apresenta o aumento de velocidade de processamento de computadores com o passar dos anos.

FIGURA 41 – VELOCIDADE DE PROCESSAMENTO MÉDIA DOS COMPUTADORES AO LONGO DOS ÚLTIMOS ANOS.

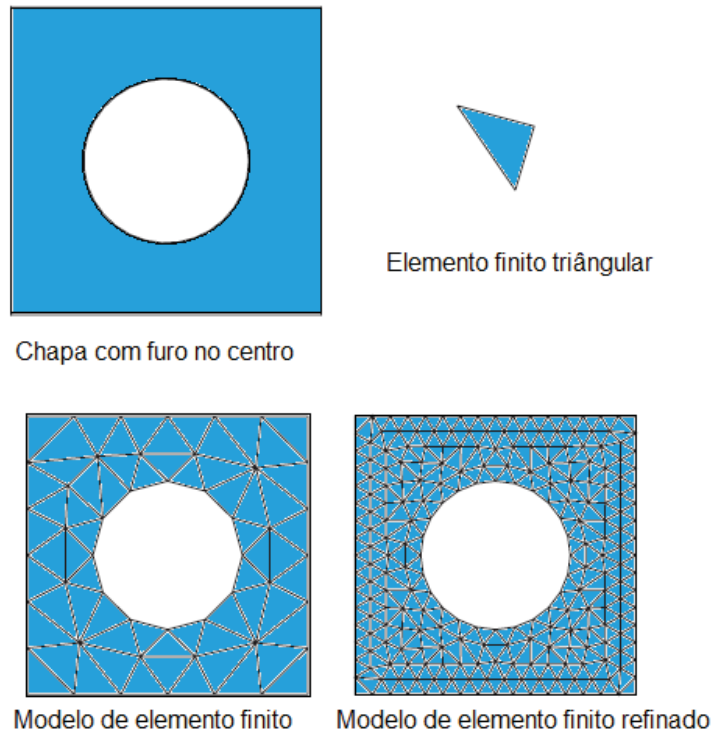


Fonte: Adaptada de Fish e Belytschko (2007).

Existem diversas maneiras para resolução de fenômenos físicos, como por exemplo a resolução pelo método de elementos finitos (MEF). Segundo Reddy (2015), esse método consiste em dividir o sistema físico em diferentes partes permitindo, assim, analisar o resultado em elementos distintos. Conforme Fish e Belytschko (2007), um dos principais objetivos dessa divisão é auxiliar na verificação, durante a análise, de regiões críticas do modelo e na tomada de decisões.

Fish e Belytschko (2007) afirmam que a precisão dos resultados, geralmente é aumentada de forma proporcional ao número elementos contidos na malha do objeto de análise. Por exemplo, na FIGURA 42 é ilustrado a diferença de uma chapa com furo central, de elementos com geometria triangular sem e com refinamento.

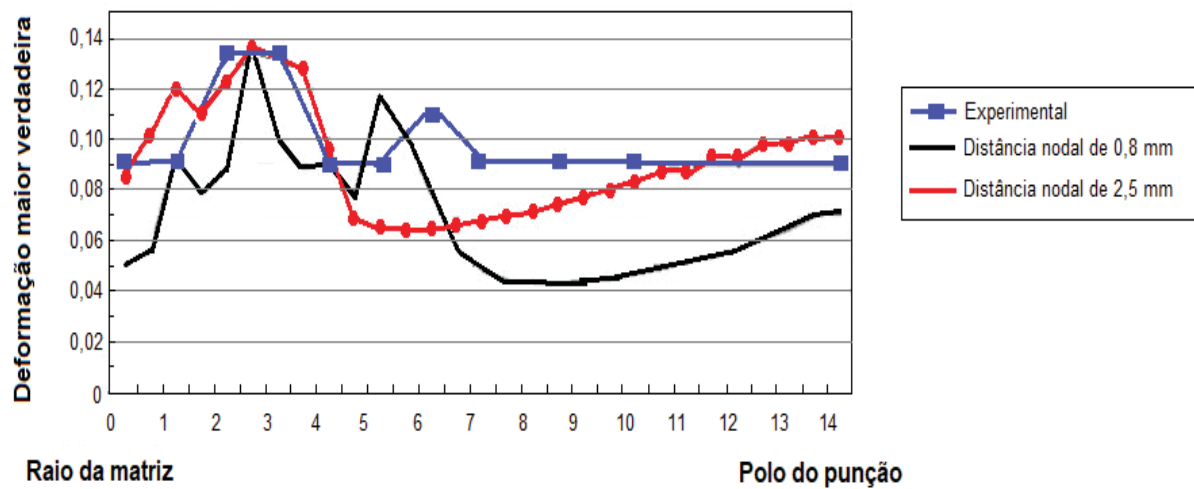
FIGURA 42 – MODELOS DE UMA CHAPA COM FURO CENTRAL DE ELEMENTOS GEOMETRIA TRIANGULAR, SEM E COM REFINAMENTO NA MALHA.



Fonte: Adaptada de Fish e Belytschko (2007).

Contudo, conforme demonstrado por Chemin Filho *et al.* (2009), nem sempre o aumento no número de elementos na malha modifica de forma positiva na precisão do resultado, visto que divisões excessivas do modelo, em alguns casos, podem causar perda de precisão. A FIGURA 43 ilustra este caso, no qual uma comparação entre um ensaio prático com duas malhas distintas foi realizada, em que a mais refinado, de 0,8 mm de distância nodal, apresentou maior discrepância das condições experimentais nas regiões mais próximas ao raio da matriz e do punção do que o modelo grosseiro, de 2,5 mm.

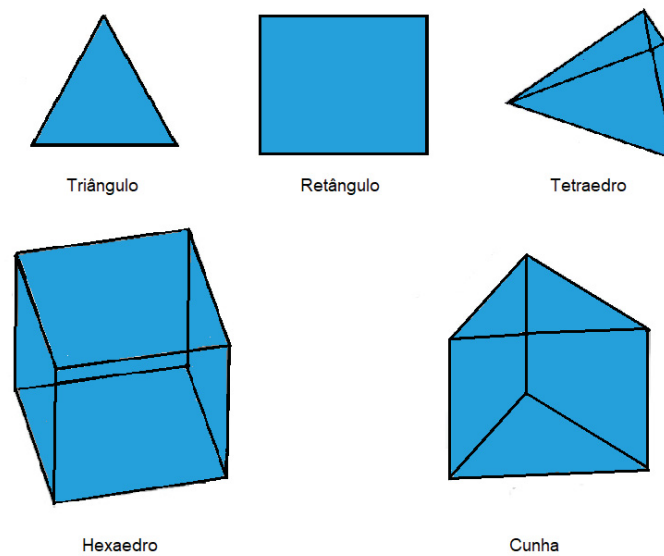
FIGURA 43 – PERFIL DE DEFORMAÇÃO DE UMA ANÁLISE NUMÉRICA REALIZADA NA OPERAÇÃO DE ESTIRAMENTO SEM E COM REFINO DE MALHA



Fonte: Adaptada de Chemin Filho *et al.* (2009).

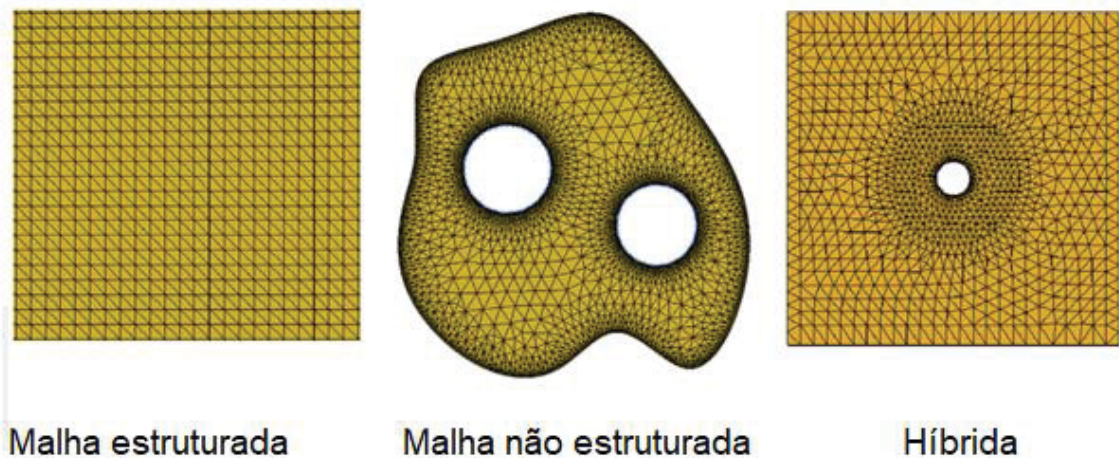
Em relação aos elementos, existem uma ampla gama de configurações de geometria que podem ser utilizados análise numérica por elementos finitos, na FIGURA 44 são ilustrados alguns exemplos. Para análises de chapas nos formatos casca ou deformação plana em duas dimensões, Burchitz (2008) e Zhuming (2017) indicam os elementos quadriláteros, dado que elevam a eficiência computacional aliado a precisão nos resultados. Em adição, Zhuming (2017) aponta que os elementos na malha podem apresentar mais de um tipo, tamanho e configuração quando deseja-se analisar regiões específicas, na FIGURA 45 são demonstrados três exemplos.

FIGURA 44 – GEOMETRIAS DE ELEMENTOS COMUMENTE UTILIZADAS NA ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS.



Fonte: O Autor (2022).

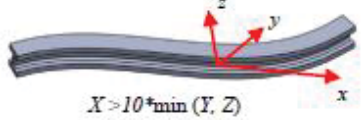

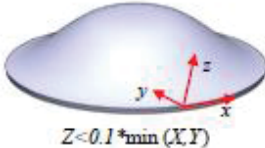
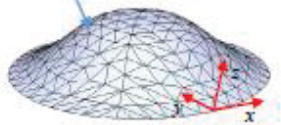
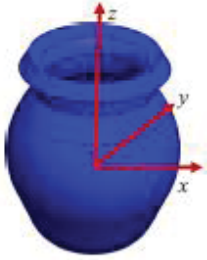
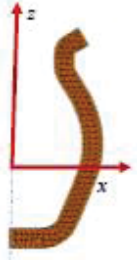
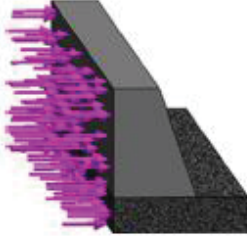
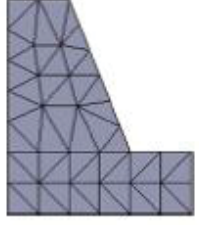

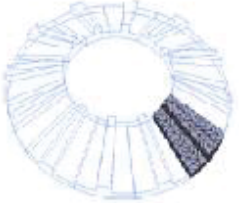
FIGURA 45 – EXEMPLO DE CONFIGURAÇÕES DE MALHAS QUE PODEM SER EMPREGADAS EM SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.



Fonte: Adaptada de Zhuming (2017).

No objeto de análise, na conformação mecânica de chapas, os elementos do tipo casca, assimétrico, plano de deformação e padrão circular, ilustrados na FIGURA 46, são amplamente utilizados. O emprego de um ou mais destas estruturas em conjunto, geralmente, são utilizados para obter maior precisão, menor tempo e força computacional durante as simulações.

FIGURA 46 – PADRÕES DE RESOLUÇÃO COMUMENTE UTILIZADO NA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS POR ELEMENTOS FINITOS.

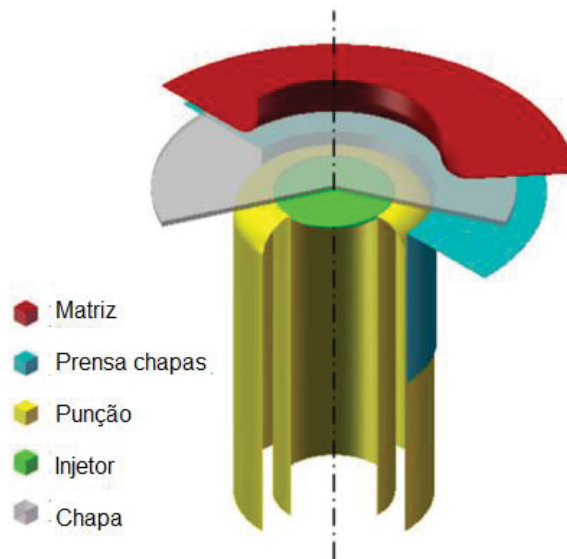
Objeto	Ilustração	Simplificação
Estruturas de treliças ou barras	 <p>$X > 10 * \min(Y, Z)$</p>	<p>Eixo neutro</p> 
Estrutura do tipo casca	 <p>$Z < 0.1 * \min(X, Y)$</p>	<p>Superfície neutra</p> 
Estruturas assimétricas		
Estrutura com tensão/deformação no plano		
Estruturas com padrão circular		

Fonte: Adaptada de Zhuming (2017).

Segundo Zhuming (2017), uma estrutura de elementos do tipo casca é um objeto cuja superfície neutra, no caso o eixo X e Y, são significativamente maiores do que as espessura em geral durante a simulação a carga é aplicada de forma perpendicular, isto é, no eixo Z. Este tipo de elemento pode ser utilizado para obter

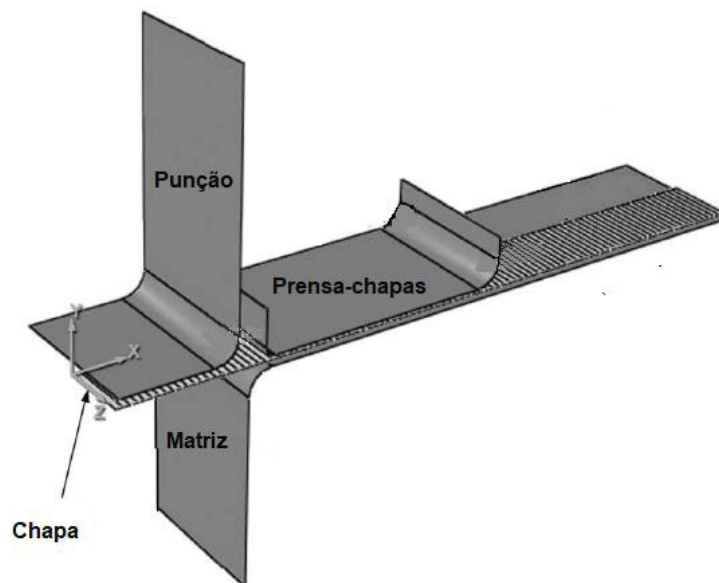
resultados satisfatórios para operações de embutimento, como pode ser visto nos trabalhos de Coer *et al.* (2018), que avaliaram a influência da variação da temperatura no ensaio de Swift, e Lajarin e Marcondes (2013) no retorno elástico utilizando o padrão Numisheet'93, representados nas FIGURAS 47 E 48, respectivamente.

FIGURA 47 - REPRESENTAÇÃO DO MODELO CASCA USADO PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA REPRESENTANDO O FERRAMENTAL DE SWIFT.



Fonte: Adaptada de Coer *et al.* (2018).

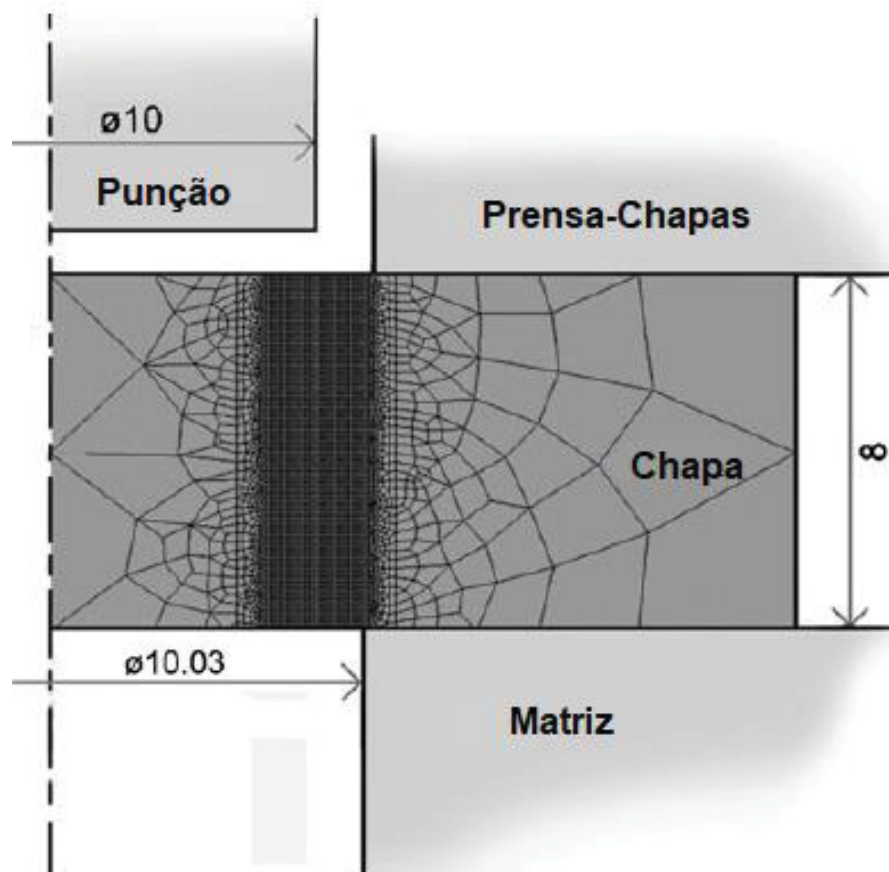
FIGURA 48 – MODELO DO TIPO BARRA UTILIZADO NO FERRAMENTAL PARA ANALISAR O RETORNO ELÁTICO DE CHAPAS NO PADRÃO NUMISHEET'93 NAS REGIÕES DO ÂNGULO DO FLANGE, RAIOS DA CURVATURA DA PAREDE E DO ÂNGULO DA PAREDE.



Fonte: Adaptada de Lajarin (2012).

Segundo Zhuming (2017), um modelo pode ser analisado de maneira assimétrica quando as cargas são aplicadas objeto de análise de maneira simétrica e não há deformação ou tensão aplicada de maneira perpendicular ao eixo de revolução. Já a estrutura de tensão/deformação no plano pode ser aplicada quando não há tensão aplicada fora do plano. Ambos os métodos podem ser usados em AEF, por exemplo, Soares *et al.* (2013) analisaram a influência da folga entre o punção e o prensa-chapas chapa na operação de puncionamento, como pode ser visto na FIGURA 49.

FIGURA 49 - MONTAGEM DA OPERAÇÃO DE PUNCIONAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO ESTRUTURAL ASSIMETRICO EM CONJUNTO AO COM DEFORMAÇÃO NO PLANO.

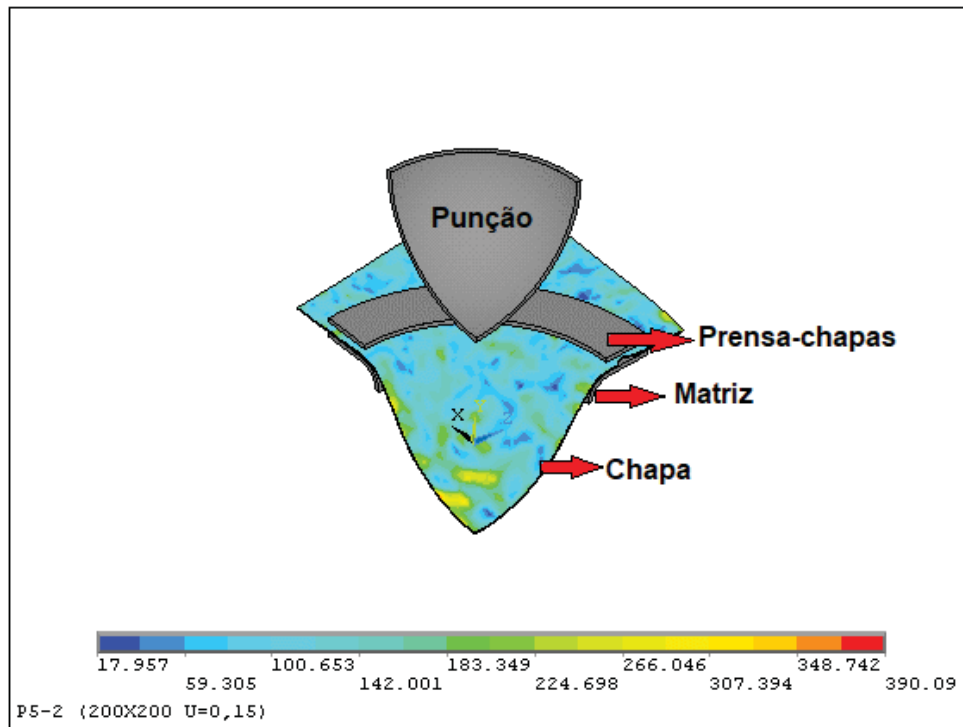


Fonte: Adaptada de Soares *et al.* (2013).

De acordo com Zhuming (2017), a estrutura com padrão circular consiste em analisar apenas uma parte do corpo e obter os resultados como se tivesse utilizado o modelo completo, os requisitos para aplicação dessa estrutura geralmente requerem modelos simétricos aliado a cargas aplicadas de maneira uniforme ao longo do plano. Esta estrutura foi empregada por Santos (2007), o qual analisou diversas variáveis na

operação de estiramento, dentre elas a FIGURA 50 ilustra a distribuição das tensões na chapa.

FIGURA 50 – ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DA OPERAÇÃO DE ESTIRAMENTO UTILIZANDO A ESTRUTURA COM PADRÃO CIRCULAR.



Fonte: Adaptada de a punção Santos (2007).

Segundo Burchitz (2008) os métodos de formulação estática implícita e dinâmica explícita são comumente utilizadas para AEF em chapas metálicas. O método estático implícito pode ser assumido devido a condição de que as chapas nas operações de estampagem geralmente não são impactadas por forças de inércias e, portanto, as equações de equilíbrio estático podem ser utilizadas. Contudo, Tekkaya e Martins (2009) apontam algumas desvantagens dessa abordagem no momento da execução do modelo no software:

- Requer a solução dos sistemas lineares das equações em cada interação;
- Requer alta memória computacional;
- A matriz rigidez é frequentemente mal condicionada, condição que pode causar instabilidade e prejudicar a performance dos softwares utilizados para resolução;
- Dificuldades na resolução de condições de contorno de contatos tribológicos não linear.

Segundo Burchitz (2008), esses efeitos são eliminados com a análise dinâmica explícita, visto que a atualização do estado das variáveis é realizada dada por um *step*, ao invés da estática implícita que é dada por meio da solução da matriz rigidez. Este tipo de análise é baseado nas equações de equilíbrio dinâmico e os efeitos de inércia são considerados. Apesar destas vantagens, conforme Tekkaya e Martins (2009), neste tipo de abordagem também há limitações e desafios como:

- Há a necessidade da utilização de incrementos muito pequenos de tempo por passo;
- O equilíbrio de cada incremento de tempo não é verificado;
- Requer a experiência do usuário para definir a malha, parâmetros de escalas com massa, velocidade e amortecimento. Podendo causar soluções imprecisas para previsão de defeitos, deformações e distribuição de tensões;
- Em análises com retornos elásticos podem ser bastante demoradas e conduzir a erros no resultado

Zhuming (2017) apresenta uma sequência de passos que, após o desenho do modelo, podem ser utilizados para produzir um modelamento computacional para uma análise por elementos finitos. Do passo 1 ao 4 é realizada a fase de pré-processamento, preparação do modelo, no passo 5 é a fase de processamento, na qual o software é executado conforme os dados inseridos, e no passo 6 é a fase de pós processamento, onde o responsável analisa o modelo. Os passos são demonstrados abaixo:

1° Passo – Decomposição: fase de seleção do tipo e da quantidade de elementos com seus respectivos números de nós no objeto de análise, como por exemplo, se os elementos serão no formato casca, sólido, rígido, retangulares, triangulares ou híbridos, etc.;

2° Passo – Desenvolvimento dos elementos: fase de definição das variáveis e das equações responsáveis pelo cálculo diferencial dos elementos, como por exemplo, a definição do método de integração dos elementos, comportamento físico do material, etc.;

3° Passo – Montagem: fase de posicionamento dos corpos e definição do sistema de coordenadas local e global;

4° Passo – Aplicação das condições de contorno e cargas: fase de definição das interações da montagem definida no passo anterior com o ambiente, como por

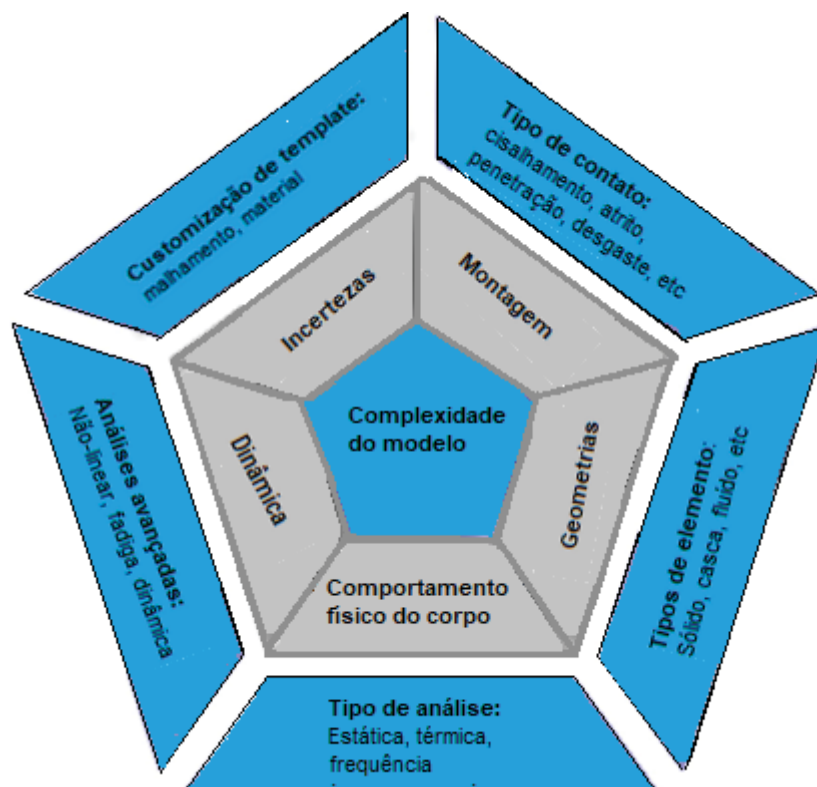
exemplo, restrições de movimentação, aplicação de carga, inserir valores de deformação, etc.;

5° Passo – Resolução do sistema por meio da execução do modelo no software utilizado;

6° Passo – Análise de variáveis dependentes: fase de verificação dos resultados da simulação.

De acordo com Tekkaya e Martins (2009), A complexidade de um problema de na área de conformação que se deseja analisar por elementos finitos pode apresenta diversos desafios, conforme ilustrado na FIGURA 51, no momento da otimização de produtos, qualidade, custo e *know-how*. A resolução de um problema real pode passar por uma série de fases durante validação, sendo necessário diversas vezes redefinir os parâmetros de entrada, como por exemplo o coeficiente de atrito, afim de calibrar com as condições práticas.

FIGURA 51 - PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM NA COMPLEXIDADE DE UM MODELO NUMÉRICO.



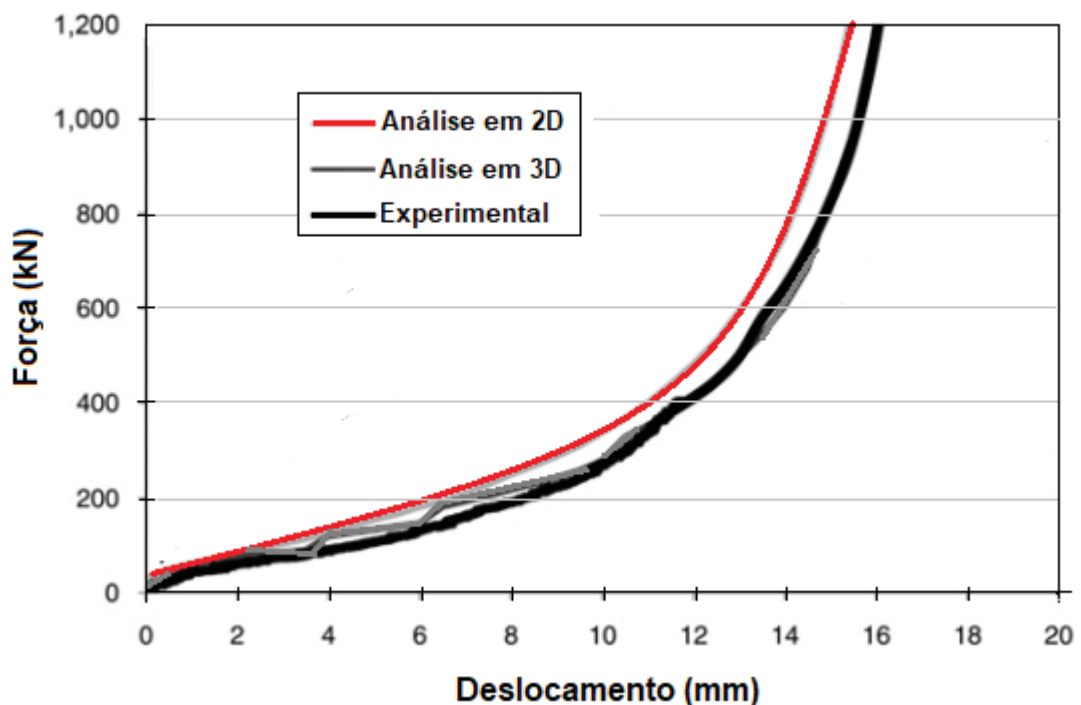
Fonte: Adaptada de Zhuming (2017).

A validação do modelo é dada pela comparação do comportamento prático material com o domínio desenvolvido. Na conformação, segundo Tekkaya e Martins

(2009), a realização do modelamento numérico sem a utilização dos dados experimentais do material do *blank* pode causar defasagem nos resultados.

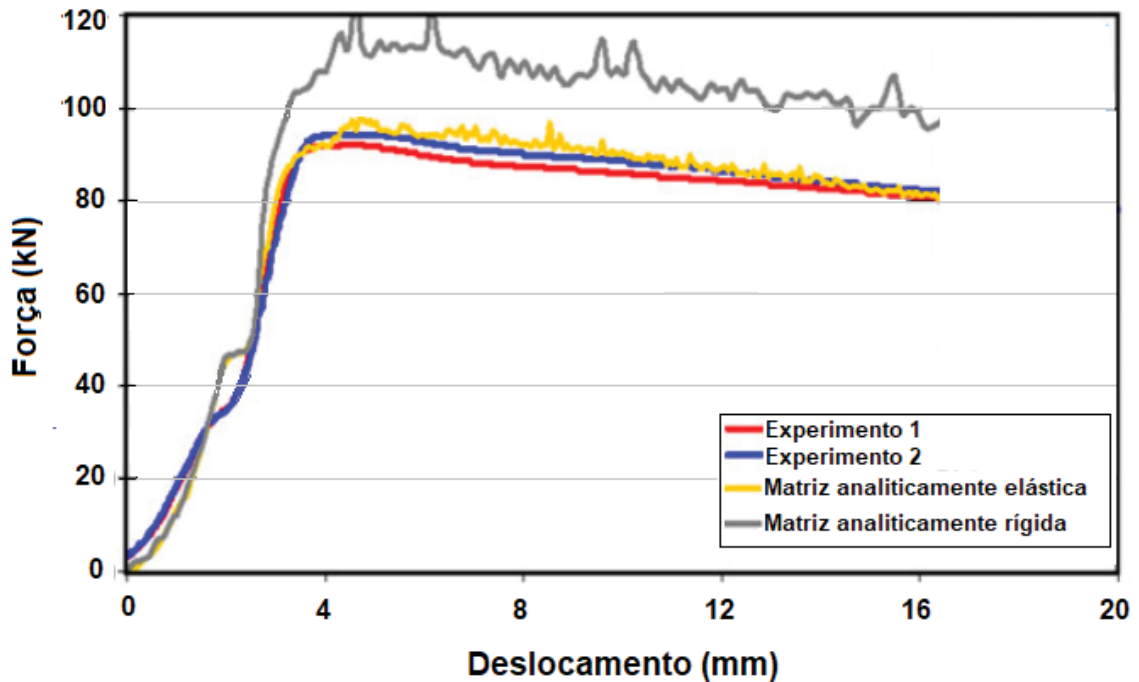
Uma maneira comumente utilizada na conformação de chapas para validação de modelos analisados por elementos finitos é por meio da relação força deslocamento do punção, condição que pode ser encontrada nos trabalhos de Nikhare *et al.* (2008) e Chemin Filho *et al.* (2009). Tekkaya e Martins (2009) também corroboram com essa metodologia, na qual é possível identificar valores errados obtidos por modelos matemáticos imprecisos como no caso tipo de análise, tipo do elemento do ferramental e da malha, como pode ser visto nas FIGURAS 52, 53, 54 e 56, respectivamente.

FIGURA 52 – INFLUÊNCIA DA ANÁLISE DE UM MODELO COMPUTACIONAL DE UMA OPERAÇÃO DE CONFORMAÇÃO EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES COM O ENSAIO EXPERIMENTAL NAS MESMAS CONFIGURAÇÕES.



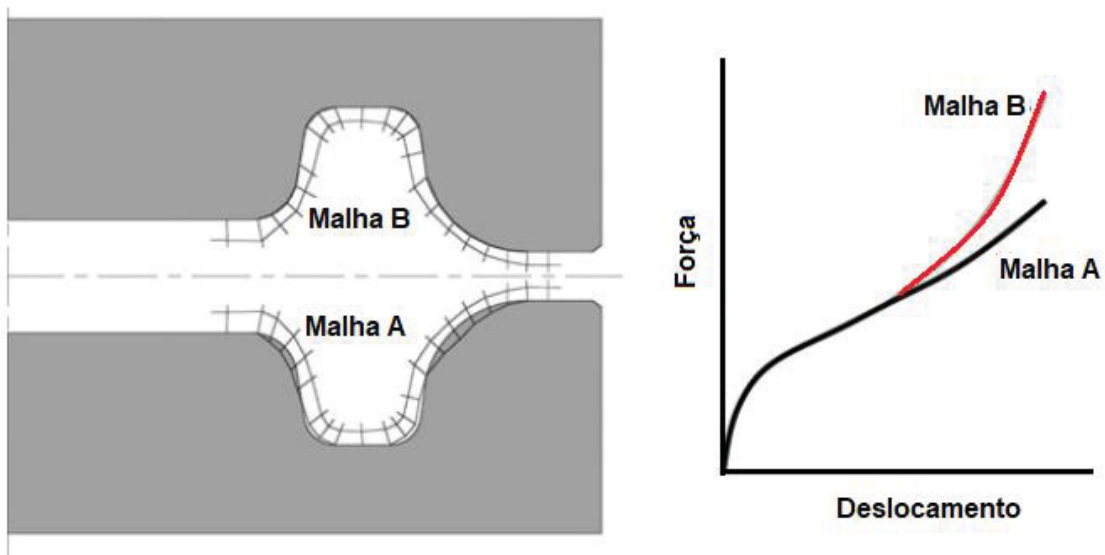
Fonte: Adaptada de Tekkaya e Martins (2009).

FIGURA 53 – INFLUÊNCIA DO TIPO DE ELEMENTO UTILIZADO EM UMA MATRIZ DURANTE UMA OPERAÇÃO DE CONFORMAÇÃO.



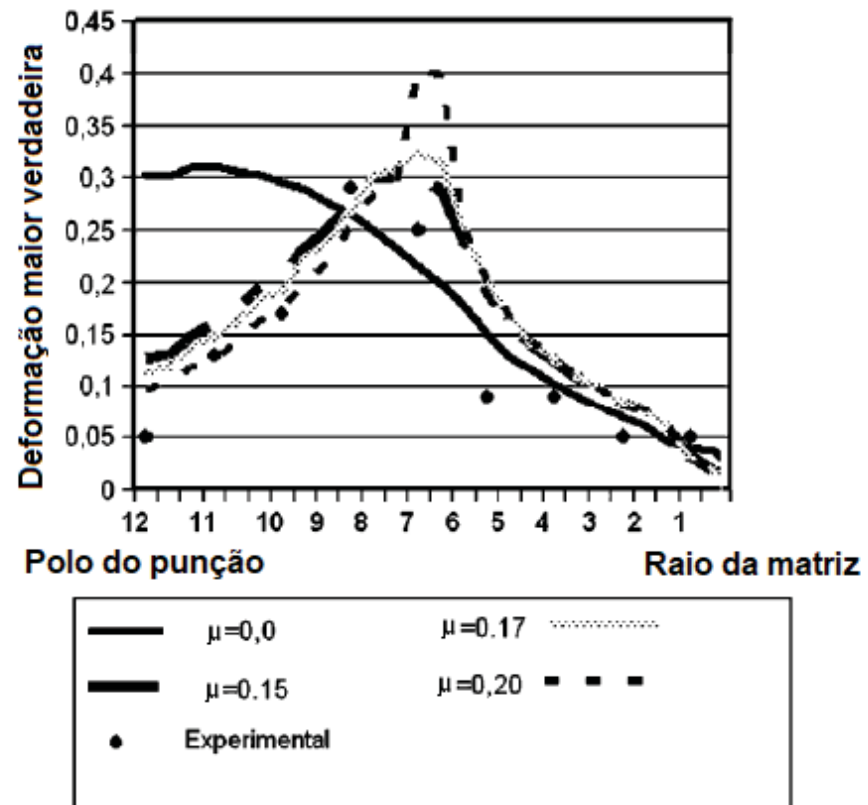
Fonte: Adaptada de Tekkaya e Martins (2009).

FIGURA 54 – COMPARAÇÃO GENÉRICA DA ALTERAÇÃO DE RESULTADOS POR MEIO DA VARIACÃO DOS PADRÕES DAS MALHAS.



Fonte: Adaptada de Tekkaya e Martins (2009).

FIGURA 55 – INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE ATRITO NO PERFIL DE DEFORMAÇÃO DE UMA CHAPA NA OPERAÇÃO DE CONFORMAÇÃO POR EMBUTIMENTO.



Fonte: Adaptada de Chemin Filho *et al.* (2009).

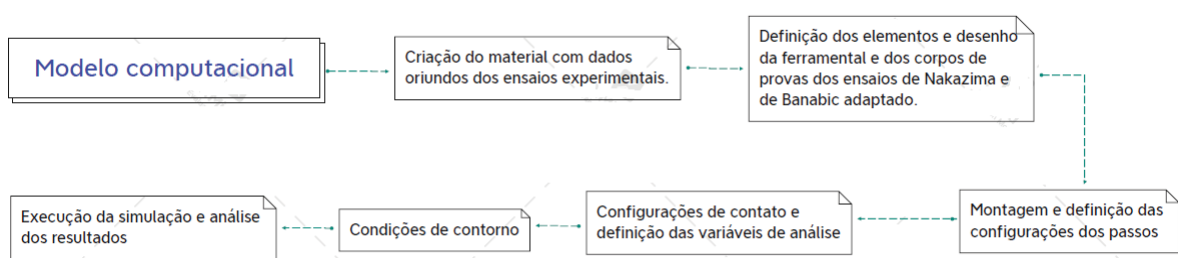
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme já mencionado, o presente trabalho tem objetivo de analisar as diferenças entre os ensaios de Nakazima e de Banabic adaptado, o qual foi adequado, por meio da modificação das geometrias dos corpos, ao ferramental de Nakazima, por meio de análise por simulação numérica no *Abaqus/Explicit*. Esta condição permitiu verificar se a aplicação do teste de Banabic adaptado é viável na prática.

A espessura, 2 mm, assim como todas as propriedades mecânicas do aço DP400 utilizadas neste trabalho, são oriundas dos ensaios experimentais realizados por Chemin Filho (2011). Contudo, nas simulações numéricas, o atrito entre o ferramental e a chapa foi controlado, logo não foi necessário incluir lubrificantes no ensaio de Nakazima e *Carrier blanks* (CBs) no ensaio de Banabic adaptado, condição que em experimentos práticos devem ser usados afim de mitigar os efeitos tribológicos.

Na FIGURA 56 é ilustrado de modo holístico o procedimento utilizado no desenvolvimento dos modelos computacionais de ambos os métodos com seus respectivos corpos de prova. Uma versão detalhada desse fluxograma pode ser encontrada no Anexo 1.

FIGURA 56 – PROCEDIMENTO GERAL UTILIZADO PARA O DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS.



Fonte: O Autor (2022).

3.1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL

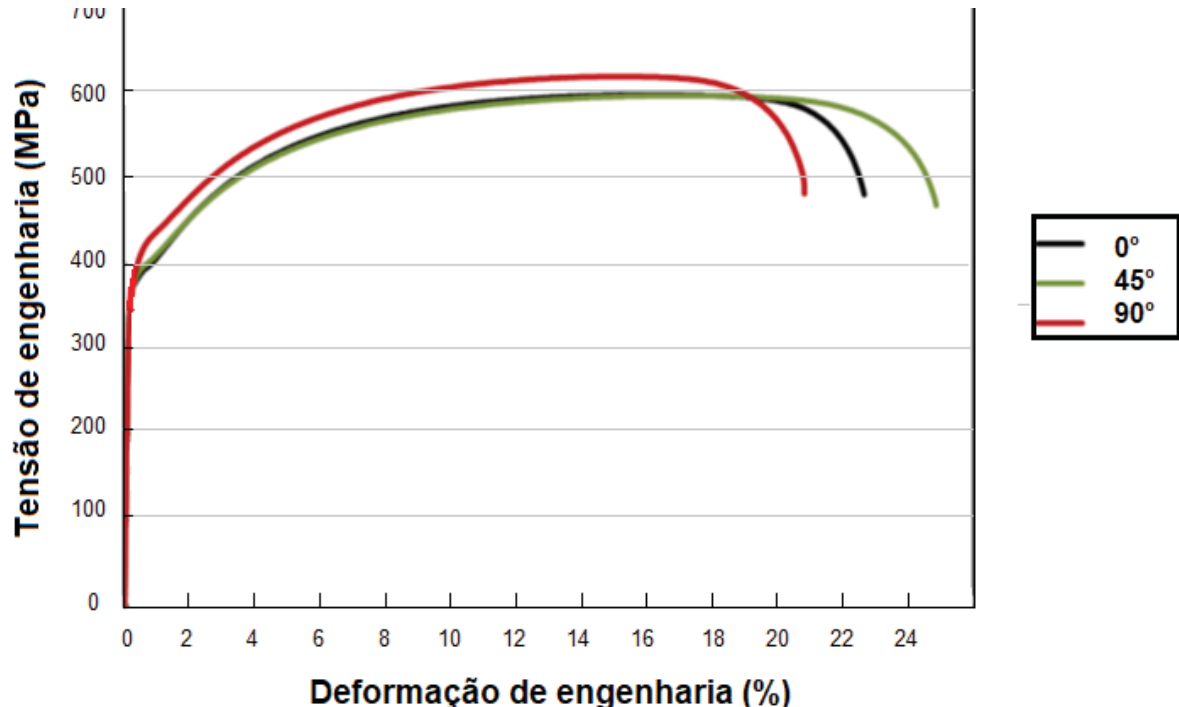
Os ensaios de tração seguiram a norma NBR 6673, com intuito de determinar a curva tensão deformação, coeficiente de encruamento, fator anisotropia, alongamento, tensão limite de escoamento, limite de resistência e tensão de ruptura nas direções de 0°, 45° e 90° em relação a direção de laminação do aço DP 400. A TABELA 5 apresenta as propriedades mecânicas e a FIGURA 57 a curva tensão deformação deste aço.

TABELA 5 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO DP 400

Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)	E (GPa)	n	R0	R45	R90
410	640	28,5	207	0,188	0,6739	1,0354	0,9977

Fonte: Adaptada de Chemin Filho (2011).

FIGURA 57 – CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO DAS TRÊS DIREÇÕES DE LAMINAÇÃO DO AÇO DP 400.



Fonte: Adaptada de Chemin Filho (2011).

Estes dados foram inseridos no *Abaqus* com objetivo de descrever os comportamentos elástico e plástico do material. Contudo, para representar o comportamento anisotrópico plástico do material foi utilizado o critério Hill 48, Equação

11, o qual é influenciado por 6 coeficientes (F, G, H, L, M e N), que por sua vez são determinados pelos coeficientes de anisotropia do material das 3 direções de laminação.

$$f(\sigma) = [A + B + C]^{0,5} \quad (11)$$

$$A = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) ((\sigma_{22} - \sigma_{33})^2) + \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) ((\sigma_{33} - \sigma_{11})^2) \right] \right] \quad (12)$$

$$B = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 \right] + \left[\left(\frac{3}{R_{23}^2} \right) (\tau_{23}^2) \right] \quad (13)$$

$$C = \left[\left(\frac{3}{R_{13}^2} \right) (\tau_{31}^2) \right] + \left[\left(\frac{3}{R_{12}^2} \right) (\tau_{12}^2) \right] \quad (14)$$

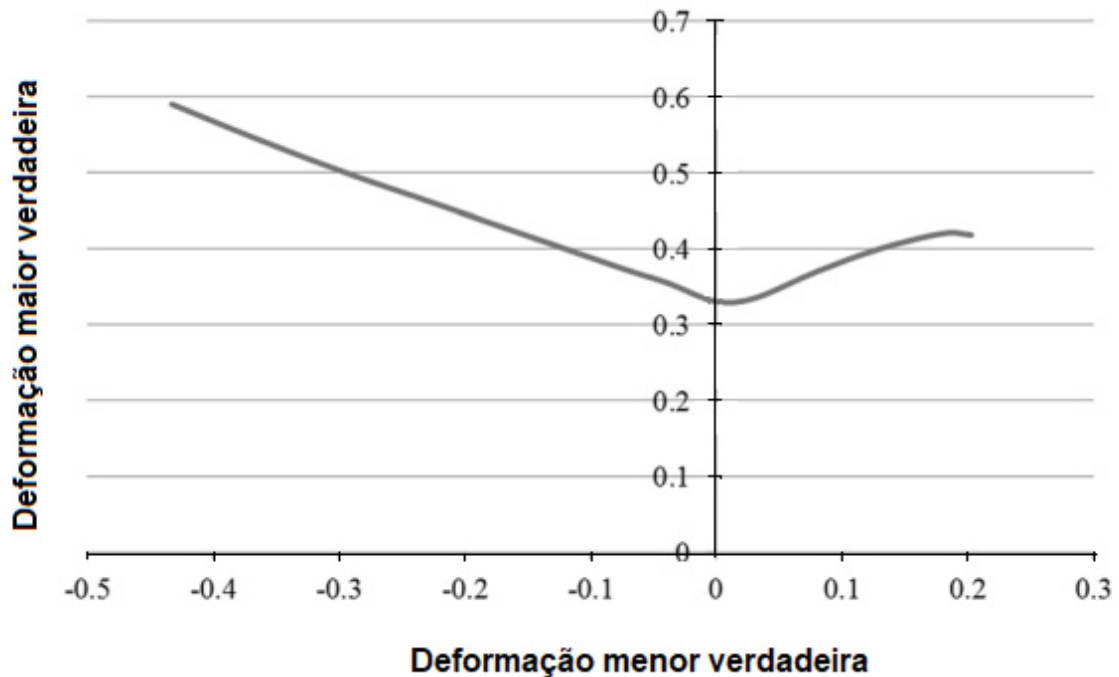
$$R_{12} = \sqrt{\frac{3(r_0+1)r_{90}}{(2r_{45}+1)(r_0+r_{90})}} \quad (15)$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0+1)}{r_0(r_{90}+1)}} \quad (16)$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0+1)}{(r_0+r_{90})}} \quad (17)$$

Para simular do momento da estrição até ruptura dos CPs do aço DP 400 foi utilizado o critério de falha de curva limite de conformação (*FLD criteria*), o qual consiste em definir no software os valores limite de conformação do material obtidos experimentalmente, representados na FIGURA 58. A falha ocorre quando o resultado da Equação 18 é igual a 1, isto é, quando o valor de deformação atinge o mesmo de limite de conformação, portanto causando ruptura.

FIGURA 58 - CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO DO AÇO DP 400.



Fonte: Adaptada de Madi *et al.* (2018).

$$\omega_{FLD} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1^{FLD}} \quad (18)$$

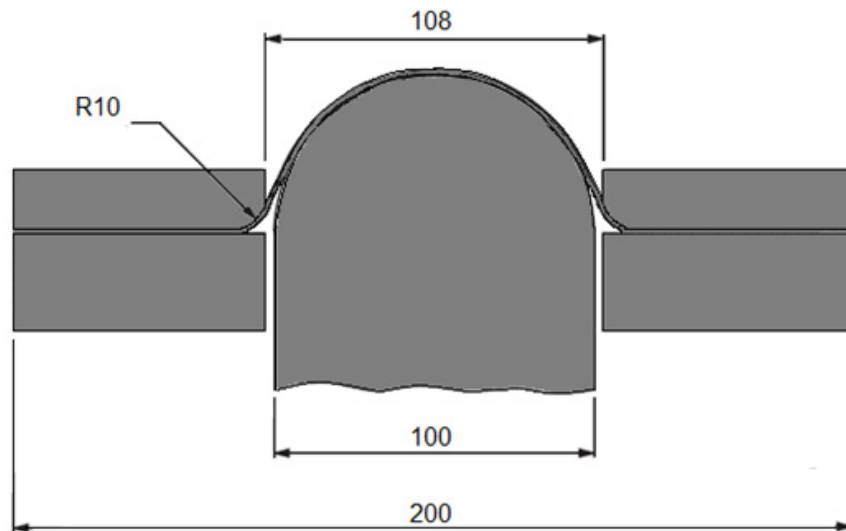
3.2 MÉTODO DE BANABIC ADAPTADO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO COMPUTACIONAL

Embora o ferramental para ambos os métodos analisados seja o mesmo, ilustrado na FIGURA 59, os CPs são distintos. Com objetivo de comparação entre os CPs de Banabic adaptado e de Nakazima, foram utilizados 5 CPs para cada método, os quais são demonstrados nas FIGURAS 60 e 61, respectivamente. Em relação aos CPs de Banabic, para viabilidade de emprego neste ferramental, todas as dimensões das geometrias foram aumentadas de maneira proporcional, com base nas originais, na banda de 5 a 6% para arredondar os valores e facilitar a usinagem ou recorte em futuros ensaios práticos.

O método de Banabic que foi adaptado pelo presente trabalho é baseado nos ensaios experimentais de Nakazima e de Banabic *et al.* Os CPs, foram desenvolvidos nas simulações com base no ensaio de Banabic *et al.* (2013), que possuem dois furos

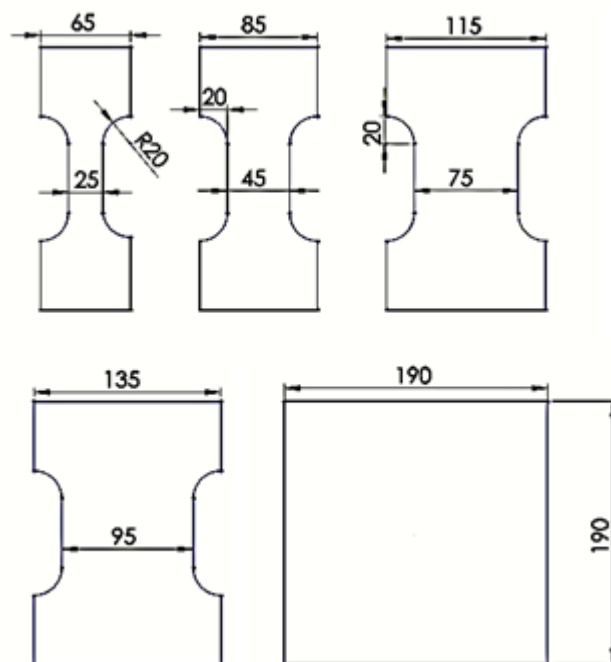
simétricos, em que de acordo com seu diâmetro permitem medir os limites de conformação de um estado de deformação predominante na região de ruptura.

FIGURA 59 – FERRAMENTAL UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA AMBOS MÉTODOS



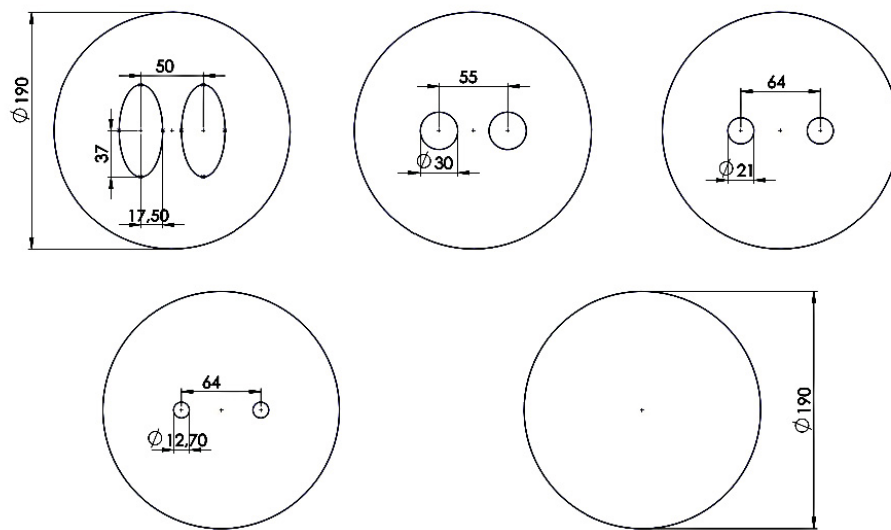
Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 60 – CORPOS DE PROVA DE NAKAZIMA UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.



Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 61 – CORPOS DE PROVA DO ENSAIO DE BANABIC ADAPTADO EMPREGADO NAS SIMULAÇÕES.



Fonte: O Autor (2022).

No caso de aplicação prática em laboratório, condição que não foi utilizada no presente estudo, são utilizados 5 tipos CPs com 3 unidades cada, que permitem mensurar os limites de conformação para as condições de embutimento, deformação uniaxial, deformação plana, estiramento biaxial intermediário e estiramento equibiaxial. Além disso, os CBs são posicionados abaixo dos CPs, similar ao teste de Marciniak, para melhorar a distribuição da força transmitida pelo punção e apresentam ausência de furos com seção circular com diâmetro externo de 190 mm.

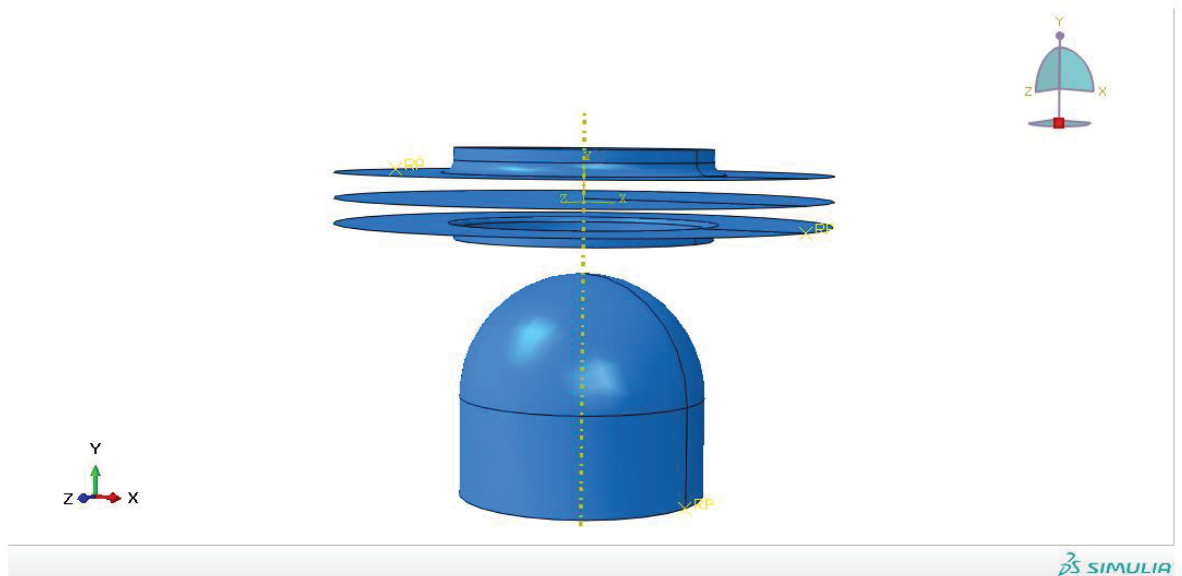
As condições ensaio experimentais devem ser desenvolvidas com base na norma DIN EN ISO 12004-2, ou seja, os CPs são deformados até a sua ruptura, o diâmetro dos círculos da malha devem estar entre 1 e 2,5 vezes a espessura do CP, o CB deve ter no mínimo 80% a espessura do CP. Para aços, os CPs devem ser cortados no sentido perpendicular a direção de laminação, a velocidade de avanço do punção é de 1,5 mm/s, a temperatura de ensaio deve ser próxima de 23°C, o CB não pode romper antes do CP, o local da ruptura deve ser próxima ao topo do CP, a medição das deformações podem ser feitas por meio de uma câmera, microscópio óptico ou outros dispositivos de medição, como por exemplo, paquímetro.

Dada a descrição desta adaptação e da definição das propriedades do aço DP 400 no *Abaqus*, 2 modelos distintos foram desenvolvidos, com intuito de representar as condições práticas, sendo o primeiro analisar o comportamento do material no ensaio de Nakazima e o segundo o de Banabic adaptado. Foram

analisados a relação força e deslocamento do punção e para os CPs seus respectivos perfis de deformação, espessura e deformação maior verdadeira.

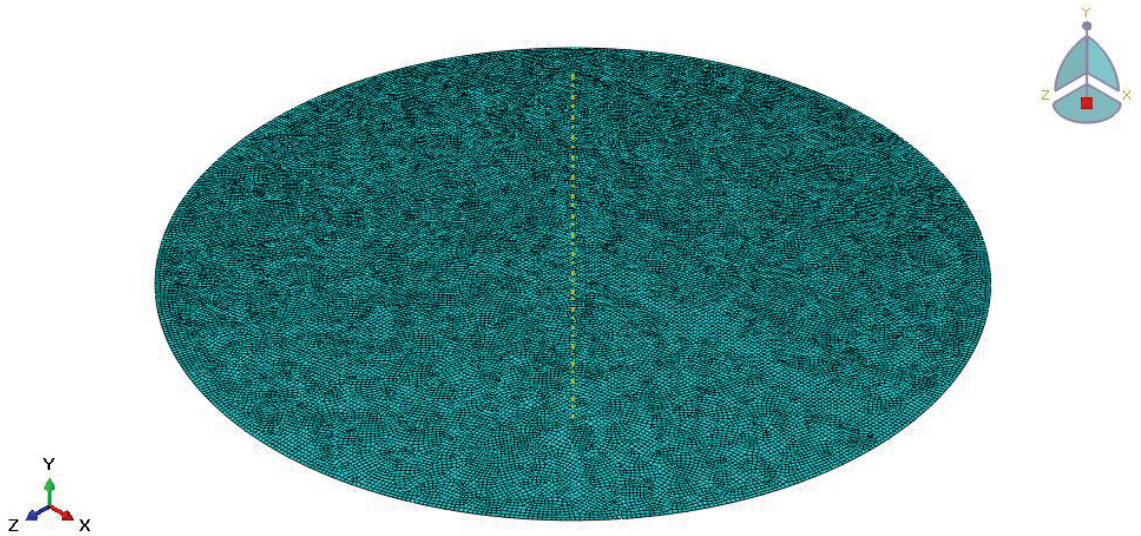
Assim sendo e retomando ao modelamento, com intuito de diminuir o tempo de processamento computacional, todo o ferramental foi desenvolvido no modo casca, sendo o prensa-chapas, o punção e a matriz como analiticamente rígido e a chapa como deformável, o posicionamento destes elementos são ilustrados na FIGURA 62. Em todos os CPs de Nakazima e de Banabic adaptado, foram empregados 5 pontos integração na espessura, a malha de formato quadrado com distancia nodal de 1mm com integração reduzida por 4 pontos - S4R, conforme FIGURA 63 Para condições tribológicas de contato entre os corpos, foi definido o coeficiente de atrito no valor de 0,12.

FIGURA 62 - CONFIGURAÇÃO DE POSICIONAMENTO DO FERRAMENTAL E DO CORPO DE PROVA UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.



Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 63 – MODELO DE MALHA APLICADO NOS CORPOS DE PROVA.

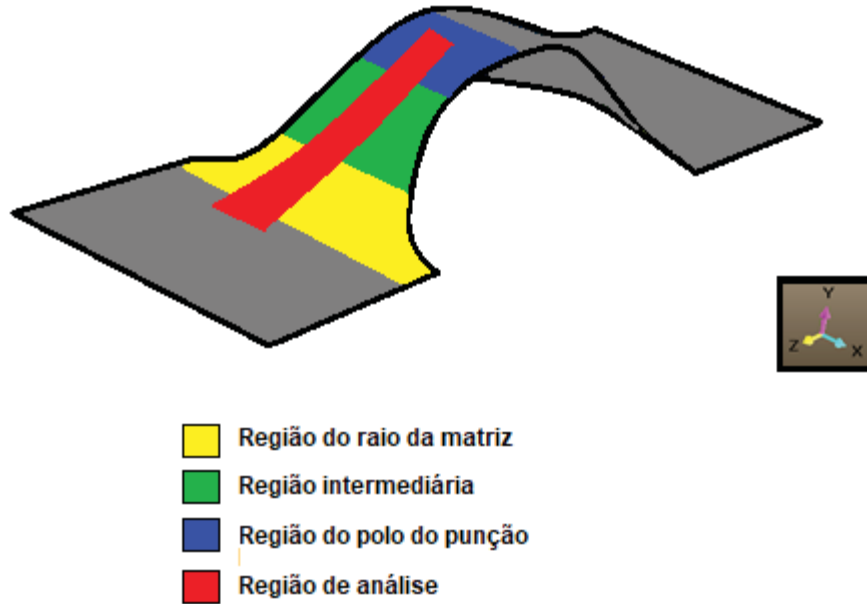


Fonte: O Autor (2022).

Cada simulação foi constituída por 3 passos, com configuração dinâmica explícita, sendo o primeiro para o prensa-chapas avançar e aplicar a carga de 200 kN, o segundo para acionar o avanço do punção e o terceiro que consistiu em interromper o avanço punção imediatamente após o critério de falha, da Equação 18, atingir o valor igual a 1. No punção e no prensa-chapas foram aplicadas restrições de movimentação nas direções x e z e a matriz foi engastada.

As regiões de análise foram empregadas para facilitar no momento de identificação das regiões do perfil de deformação de cada CP, como pode ser visto na FIGURA 64. Em amarelo foi definido como região do raio da matriz, azul a região do polo do punção, verde região intermediária entre ambas. No centro, em vermelho, foi definido como banda de análise afim de mensurar os valores de deformação ao longo da chapa, método similar ao utilizado por Chemin *et al.* (2009).

FIGURA 64 – REGIÕES DE ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA.

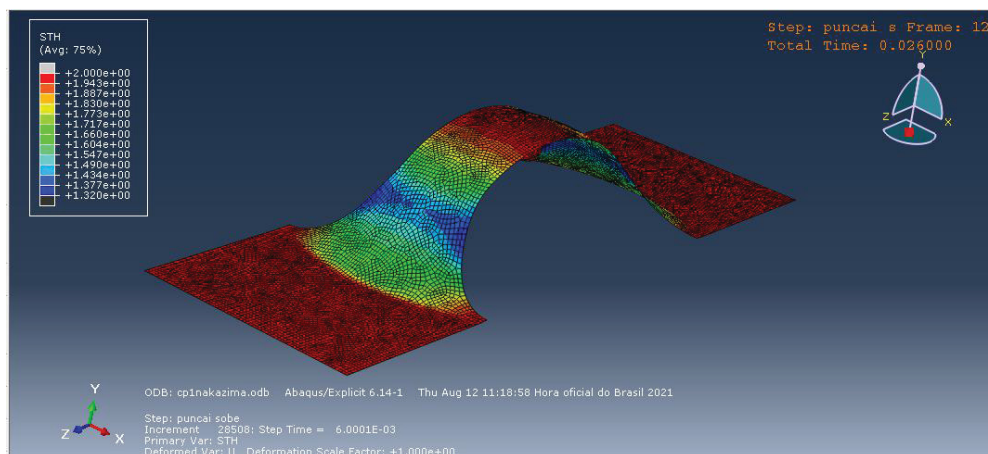


Fonte: O Autor (2022).

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

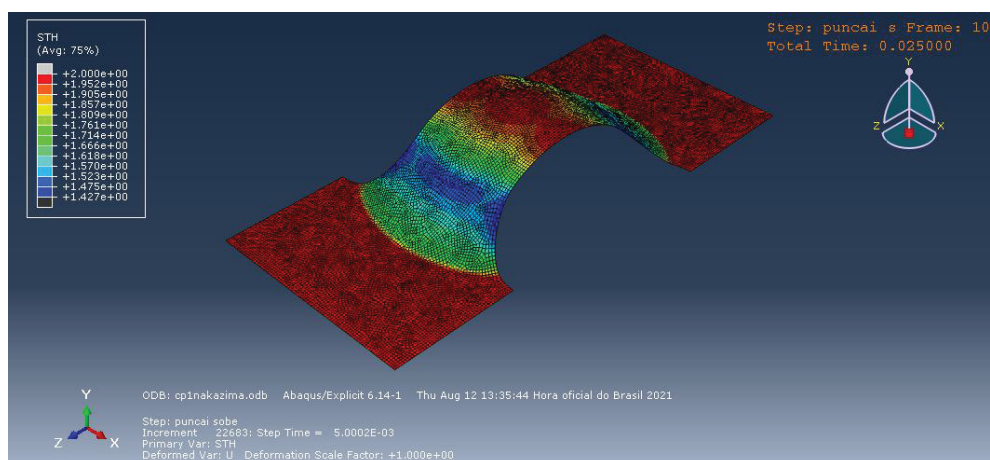
Os dados do perfil de deformação de cada corpo de prova (CP) de cada são ilustrados no momento de ruptura, os quais ocorreram quando a equação 18, do critério de falha FLD, no *Abaqus* atingiu o valor de 1. Nas FIGURAS 65 a 69, apresentam a espessura no momento da falha em conjunto ao comportamento anisotrópico dos CPs dos métodos de Nakazima. A mesma condição pode ser vista da FIGURA 70 a 74 para o método de Banabic adaptado.

FIGURA 65 – DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 1 DE NAKAZIMA NO MOMENTO DA FALHA DO AÇO DP 400.



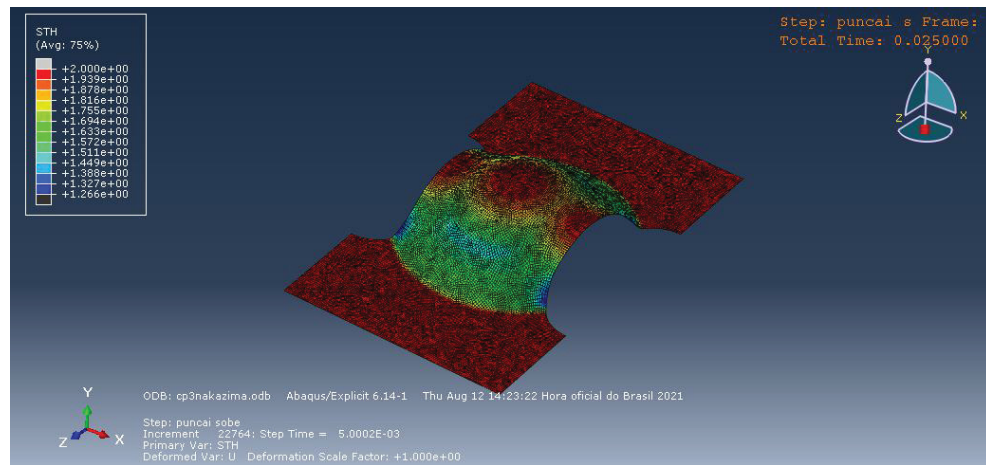
Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 66 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 2 DE NAKAZIMA NO MOMENTO DA FALHA DO AÇO DP 400.



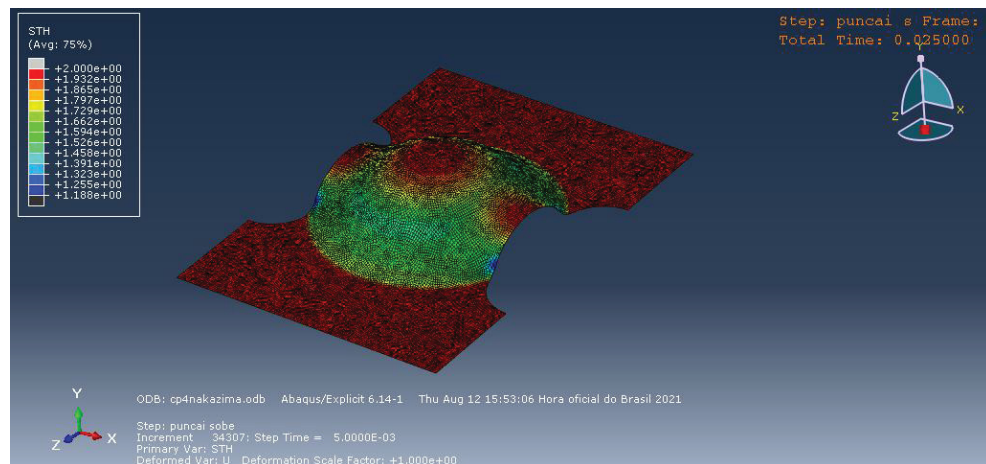
Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 67 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 3 DE NAKAZIMA NO MOMENTO DA FALHA DO AÇO DP 400.



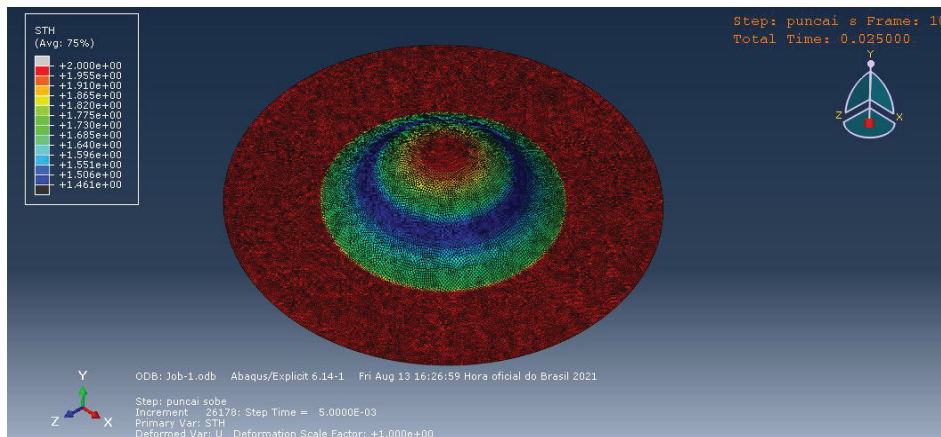
Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 68 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 4 DE NAKAZIMA NO MOMENTO DA FALHA DO AÇO DP 400.



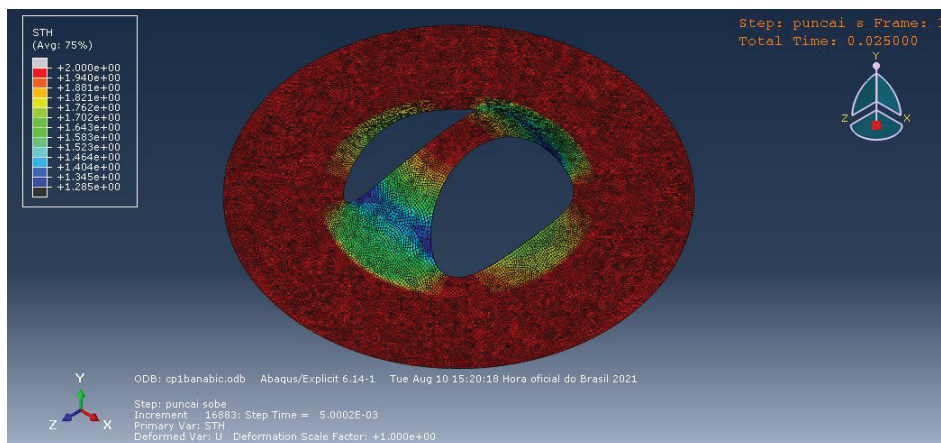
Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 69 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 5 DE NAKAZIMA NO MOMENTO DA FALHA DO AÇO DP 400.



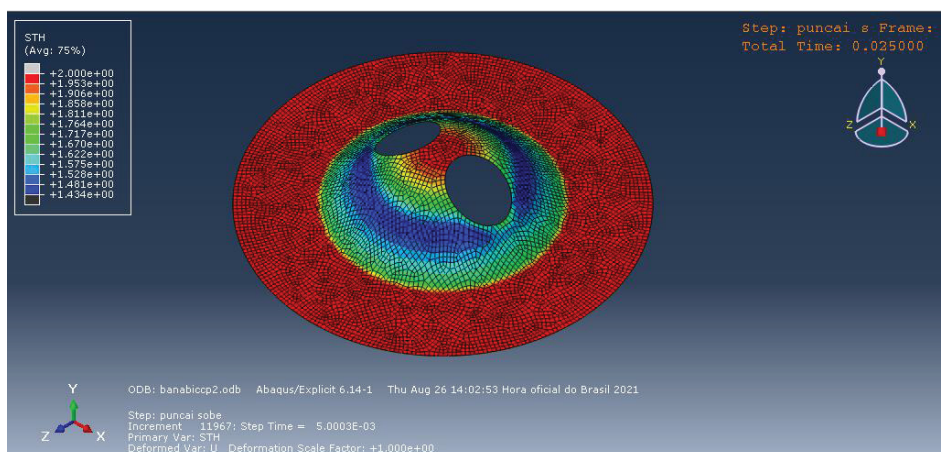
Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 70 – DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 1 DO TESTE DE BANABIC ADAPTADO NO INSTANTE DE RUPTURA DO AÇO DP 400.



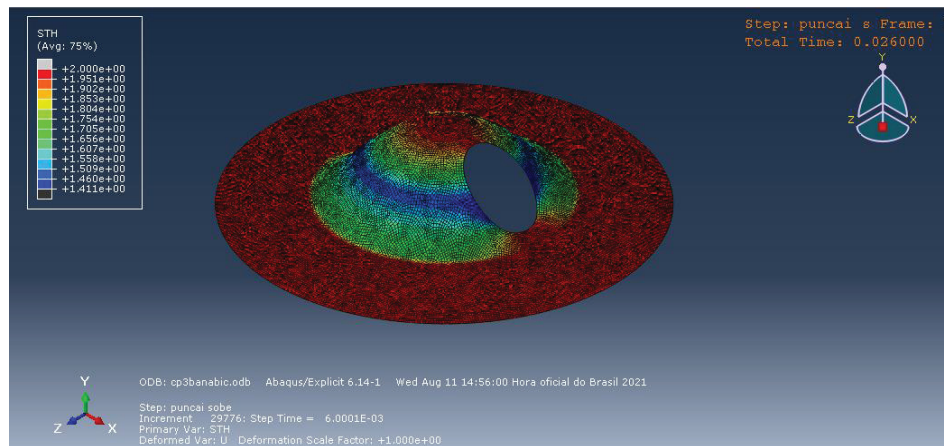
Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 71 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 2 DO TESTE DE BANABIC ADAPTADO NO INSTANTE DE RUPTURA DO AÇO DP 400.



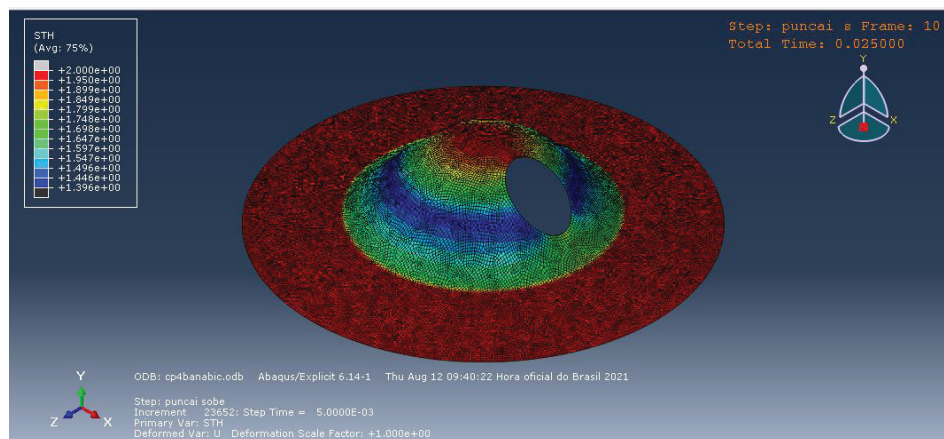
Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 72 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 3 DO TESTE DE BANABIC ADAPTADO NO INSTANTE DE RUPTURA DO AÇO DP 400.



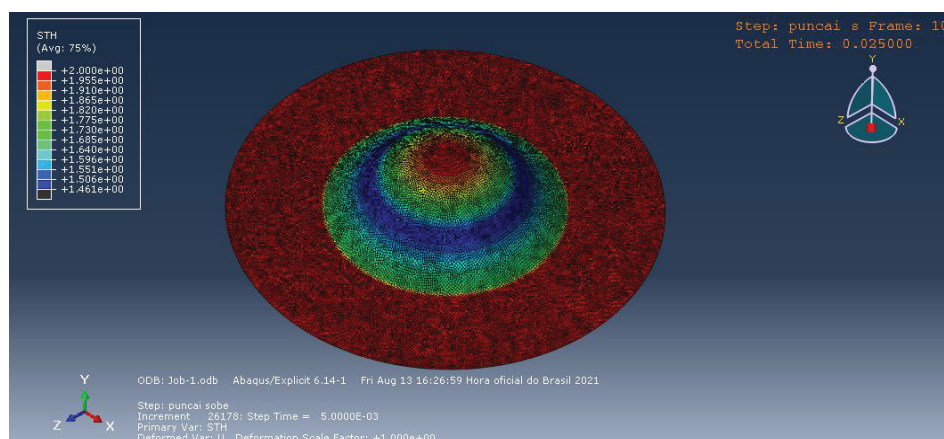
Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 73 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 4 DO TESTE DE BANABIC ADAPTADO NO INSTANTE DE RUPTURA DO AÇO DP 400.



Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 74 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA DO CORPO DE PROVA 5 DO TESTE DE BANABIC ADAPTADO NO INSTANTE DE RUPTURA DO AÇO DP 400.

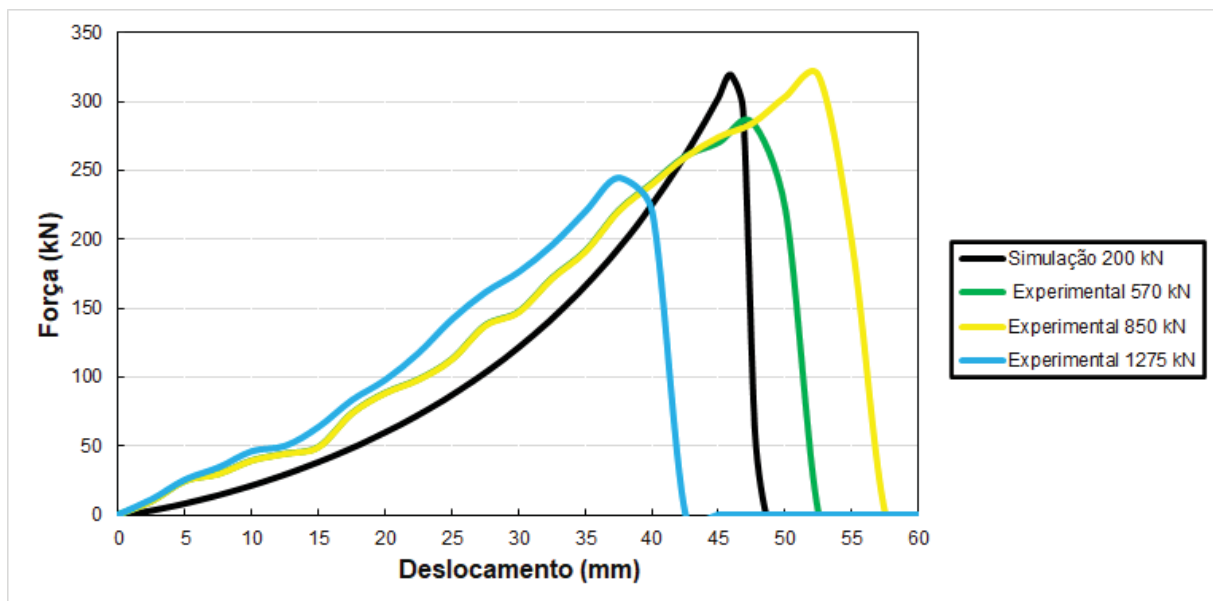


Fonte: O Autor (2022).

A FIGURA 75 apresenta o deslocamento em função da força do punção dos CPs de estiramento resultantes dos ensaios experimentais realizados por Chemin Filho (2011) para as forças de prensa-chapas de 570 kN, 850 kN e 1275 kN e da simulação realizada no *Abaqus* com CP 5 com 200 kN. Nota-se que o perfil do CP 5 ficou próximo aos demais em relação ao padrão até a ruptura em com a força e deslocamento máxima.

Apesar disso, as divergências apresentadas entre o CP 5 com os restantes analisados podem ter ocorrido devido a comportamentos plásticos experimentais inerentes do aço DP que não são descritos pelo software *Abaqus* com a configuração atual, como por exemplo a variação do coeficiente de encruamento e anisotropia.

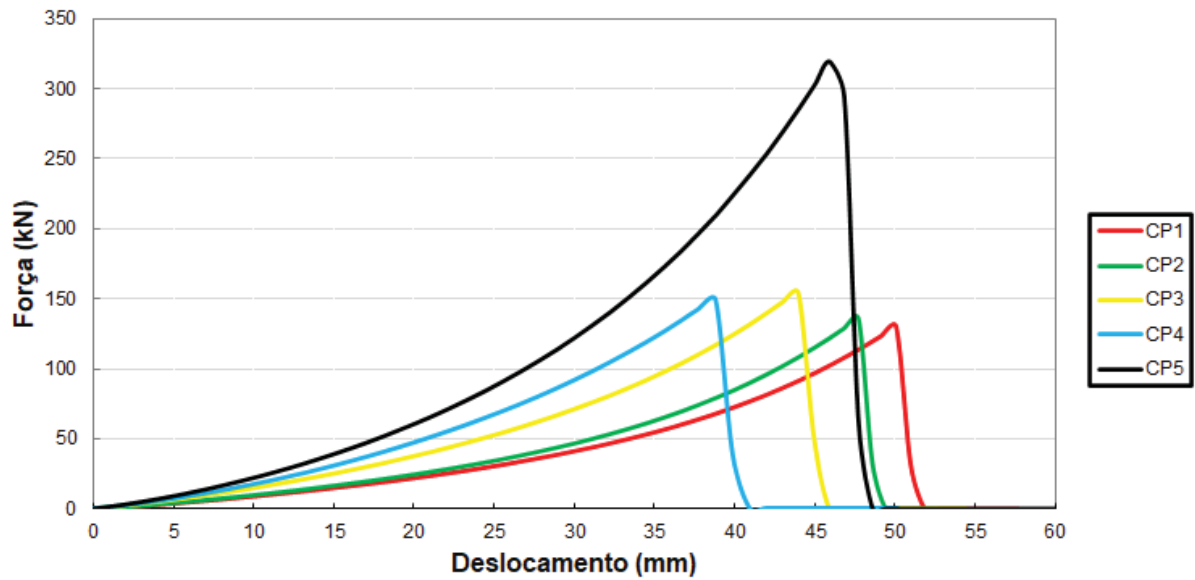
FIGURA 75 – FORÇA EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO DO PUNÇÃO DO CORPO DE PROVA 5 COM CARGA DO PRENSA-CHAPAS DE 200 KN COMPARADO AOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CHEMIN FILHO DE 570 KN, 850 KN E 1275 KN.



Fonte: O Autor (2022).

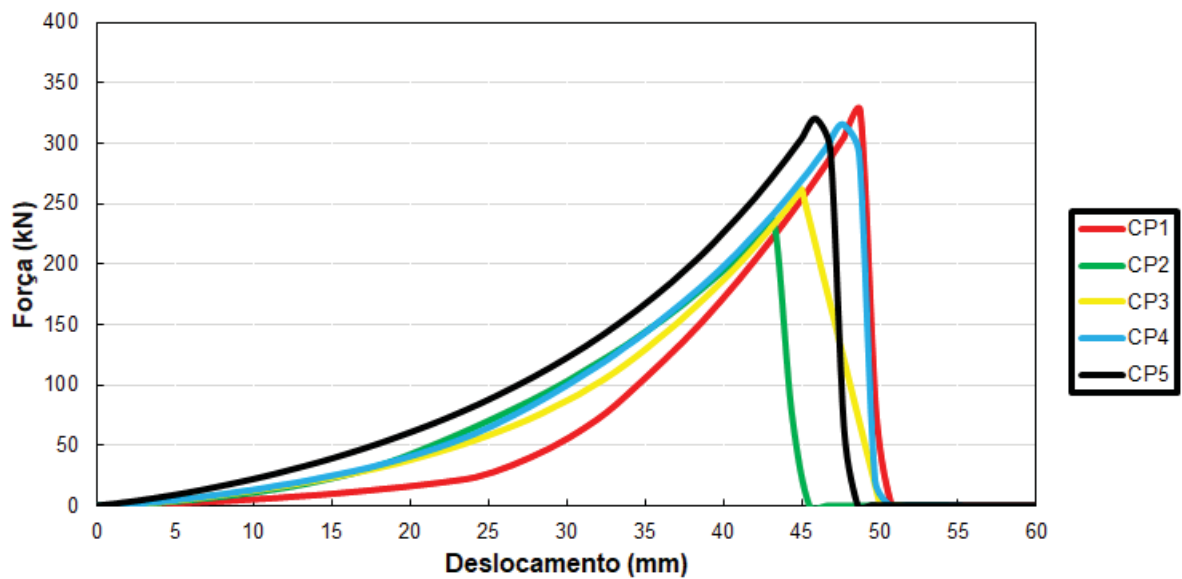
As FIGURAS 76 e 77 apresentam relação força deslocamento do punção das simulações realizadas dos testes de Nakazima e de Banabic adaptado, respectivamente. Nota-se que os CPs de Banabic adaptado, no geral, apresentam maior carga máxima para a ruptura, não apresentam proporcionalidade de aumento de força máxima em relação a sequência de ensaio e a diferença de deslocamento do punção até a ruptura é menor quando comparado aos perfis de Nakazima. Portanto, em condições práticas a máquina utilizada no teste de Nakazima pode ser empregada para o método de Banabic adaptado.

FIGURA 76 – GRAFICO FORÇA VS DESLOCAMENTO DOS CORPOS DE PROVA DE NAKAZIMA.



Fonte: O Autor (2022).

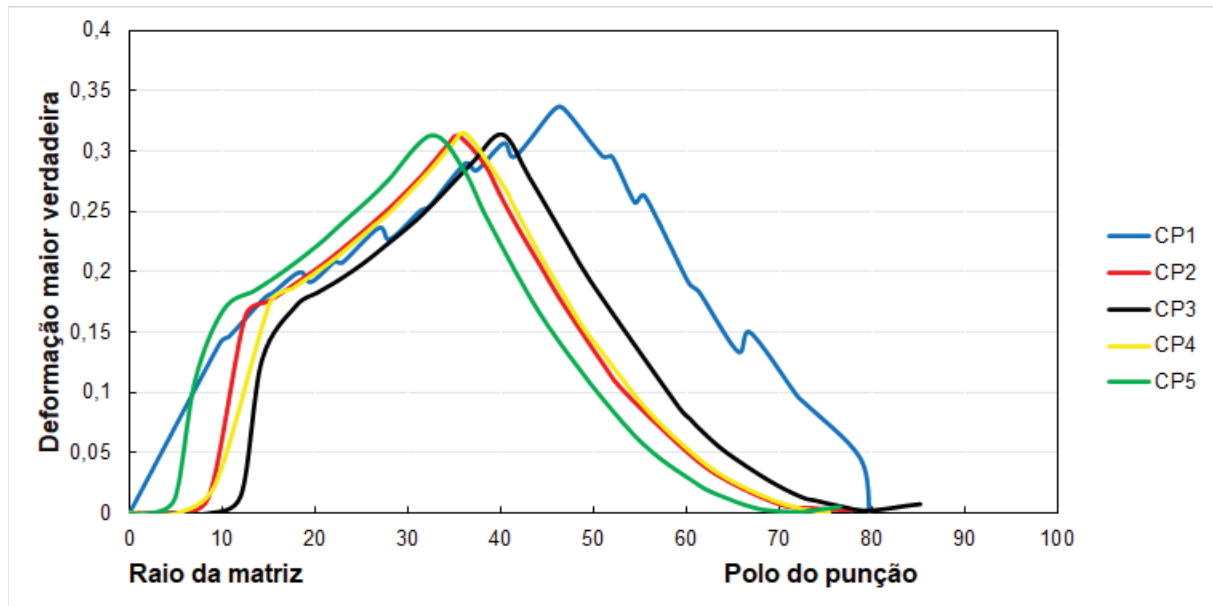
FIGURA 77 -GRAFICO FORÇA VS DESLOCAMENTO DOS CORPOS DE PROVA DO MÉTODO DE BANABIC ADAPTADO.



Fonte: O Autor (2022).

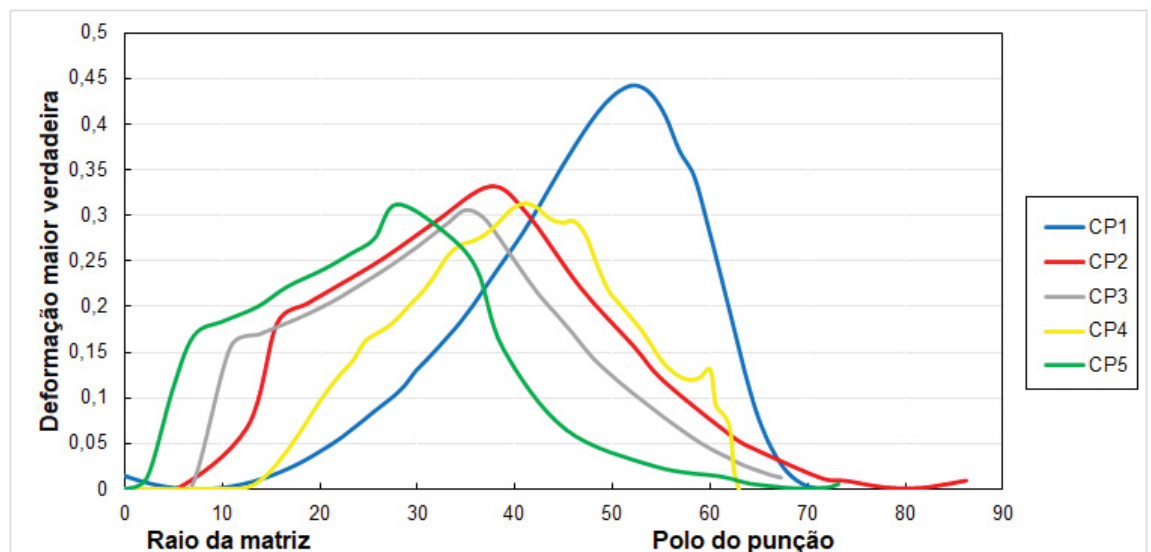
Nas FIGURAS 78 e 79 são apresentados os perfis de deformação dos corpos de prova (CP) utilizado no ensaio de Nakazima e de Banabic adaptado nas simulações, respectivamente. Os perfis representam a distribuição da deformação maior verdadeira na chapa em relação ao raio da matriz e ao polo do punção, isto é, indica a deformação maior verdadeira na região do raio da matriz, na zona intermediária e na do polo do punção, as quais foram descritas na seção anterior.

FIGURA 78 - PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DO MÉTODO DE NAKAZIMA.



Fonte: O Autor (2022).

FIGURA 79 – PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DO MÉTODO DE BANABIC ADAPTADO.

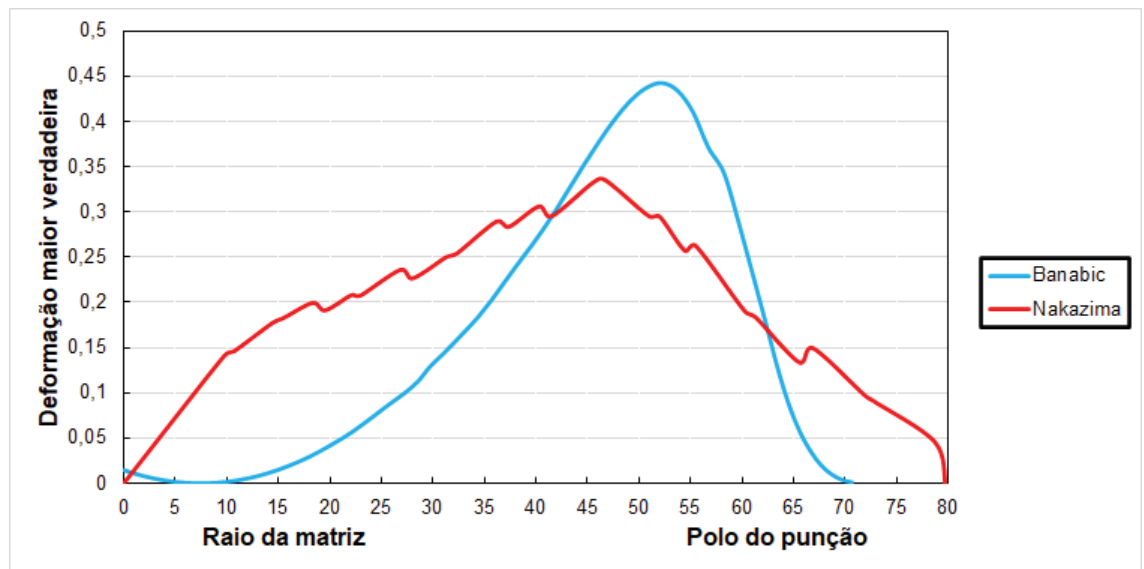


Fonte: O Autor (2022).

Assim sendo, para o teste de Nakazima, foi possível verificar que CP1, que possui deformação uniaxial predominante, fraturou mais próximo ao polo do punção e apresentou maior deformação verdadeira do que o CP5, o qual possui o estado de deformação de estiramento como predominante, condições já esperadas conforme teoria da plasticidade. Já os CPs 2,3 e 4 devido a presença dos estados de deformação plana, uniaxial e estiramento de maneira simultânea e localizam-se em regiões intermediárias entre o CP 1 e CP 5.

O CP1 do método de Banabic adaptado apresentou o pico de deformação maior verdadeira mais próximo do polo do punção do que o CP1 de Nakazima, sendo de 0,44 e 0,33, respectivamente. Comportamento que pode ser verificado na FIGURA 80, com ambos exibindo o estado de deformação uniaxial como predominante durante o avanço do punção até a ruptura, fator que é possível verificar devido as forças de compressão na região de deformação menor verdadeira e tração na de deformação maior verdadeira facilitando o escorregamento planar no sentido desta.

FIGURA 80 - PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 1 DOS MÉTODOS DE NAKAZIMA E DE BANABIC ADAPTADO.

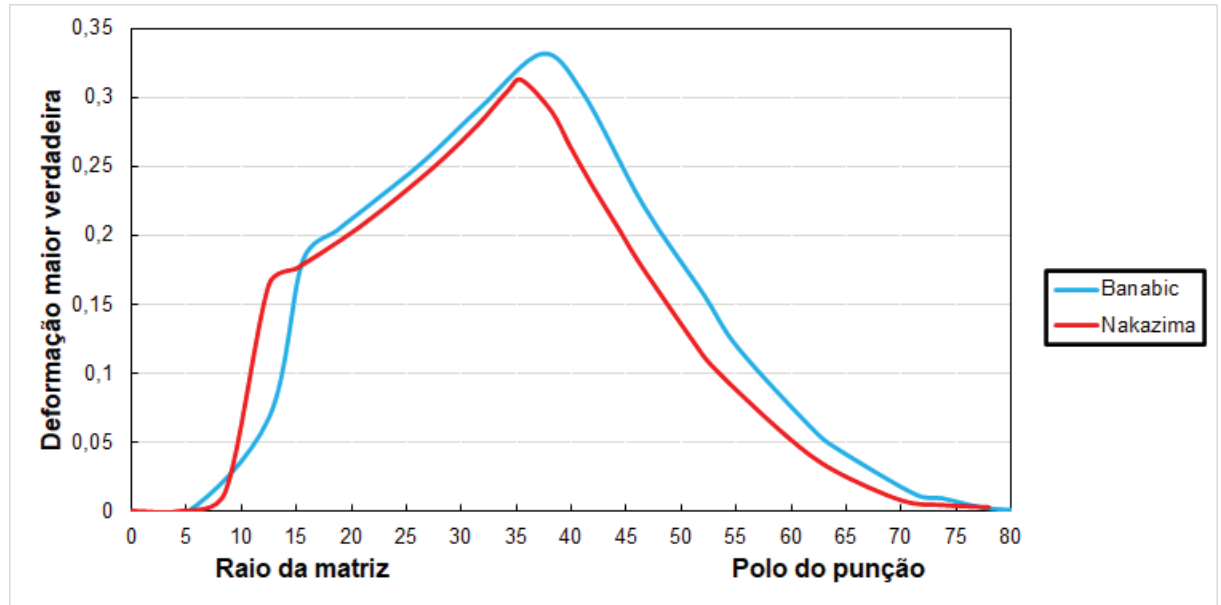


Fonte: O Autor (2022).

Os CPs 2 de ambos os métodos resultaram em perfis de deformação relativamente similar, conforme FIGURA 81. No entanto, o pico do método de Banabic adaptado foi maior, cerca de 0,33, e mais próximo ao polo do punção do que o de Nakazima. Diferentemente dos CPs 1 destes métodos, os CPs 2 devido a presença

de uma proporção menor de deformação uniaxial, com o surgimento do estado de deformação plana, o valor máximo de deformação maior verdadeira tende a diminuir.

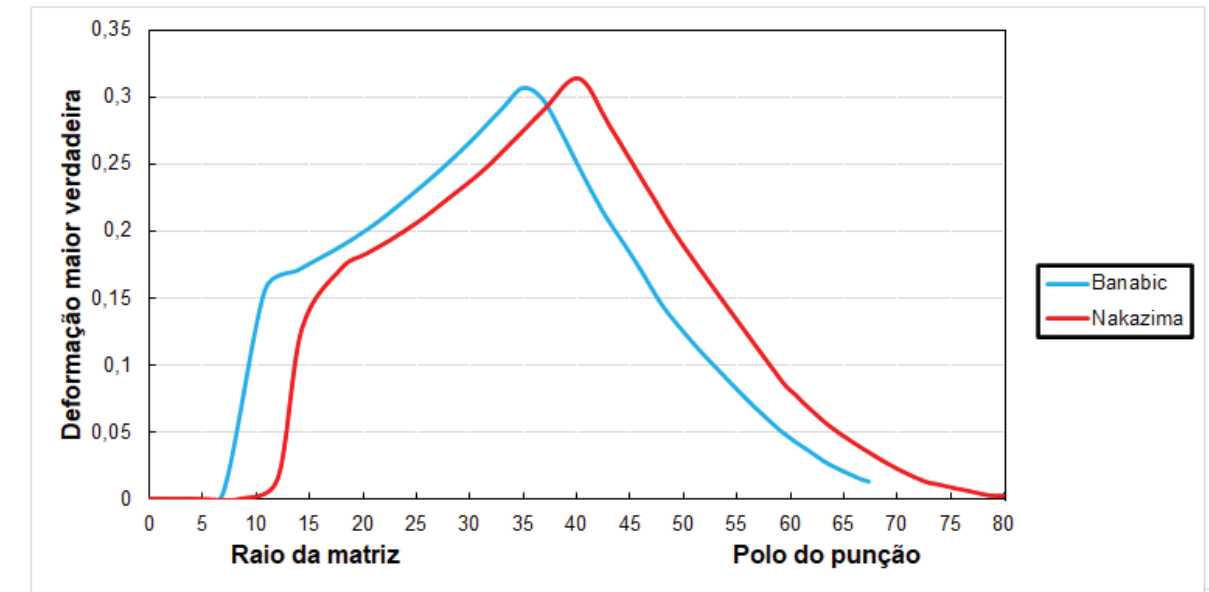
FIGURA 81 – PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 2 DOS MÉTODOS DE NAKAZIMA E DE BANABIC ADAPTADO.



Fonte: O Autor (2022).

Como pode ser visto na FIGURA 82 o perfil de deformação do CP 3 do método de Nakazima apresentou pico de deformação maior verdadeira de 0,325, o qual foi maior quando comparado ao de Banabic adaptado que resultou em 0,3, os quais apresentam de forma predominante o estado de deformação plana. Diferentemente dos CPs 1 e 2, as deformações mais elevadas dos CPs de Nakazima ocorreram mais próximo ao polo do punção entre ambos.

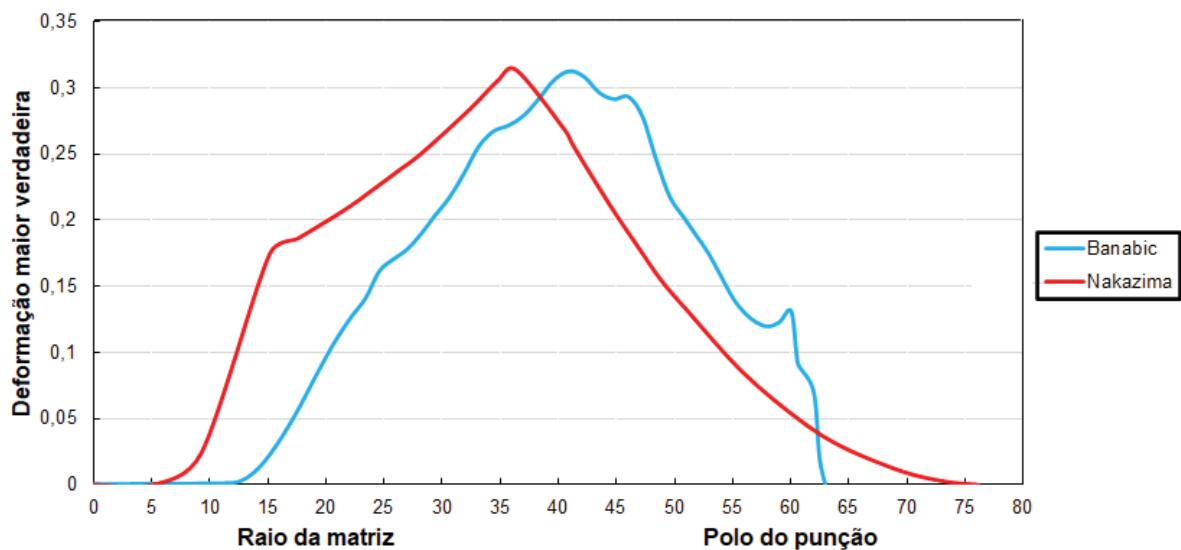
FIGURA 82 - PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 3 DOS MÉTODOS DE NAKAZIMA E DE BANABIC ADAPTADO.



Fonte: O Autor (2022).

Os perfis de deformação dos CPs 4 são ilustrados na FIGURA 83 os quais apresentam como predominante os estados de deformação plana e estiramento. O CP de Banabic adaptado apresentou o pico de deformação mais próximo ao polo do punção do que o de Nakazima, mas a diferença entre os picos de ambos foi baixa, sendo de 0,325 e 0,323.

FIGURA 83 - PERFIL DE DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 1 DOS MÉTODOS DE NAKAZIMA E DE BANABIC ADAPTADO.



Fonte: O Autor (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações foram realizadas com sucesso por meio do método que consistiu em definir as propriedades mecânicas e de critério de falha do aço DP 400 no software retiradas dos ensaios experimentais de Chemin Filho (2011). Por meio da calibração dos parâmetros tribológicos os resultados ficaram próximos aos valores experimentais obtidos por Chemin Filho (2011) no momento da validação do modelo com o corpo de prova 5.

Foi possível verificar que os corpos de prova do teste de Banabic adaptado apresentam melhor performance nos aços DP 400 quando comparados aos utilizados no método de Nakazima. Isso ocorreu devido as suas geometrias proporcionarem maior deformação, distribuição de tensão e valores máximos de deformação mais próximos ao polo do punção em seus corpos de prova.

O método de Banabic que foi adaptado com a modificação do tamanho dos corpos de prova pode seguir os padrões da norma DIN EN ISO 12004-2 durante os ensaios práticos. Contudo, ensaios experimentais devem ser realizados e empregar os limites de conformação resultantes deste ensaio em aplicações práticas de utilidades afim de provar esta condição.

A confecção dos corpos de prova do ensaio de Banabic é mais simples do que empregada no ensaio de Nakazima, quando a norma DIN EN ISO 12004-2 é seguida. Estas geometrias tem mais usinabilidade dado que as extremidades não apresentam a necessidade de produzir entalhes nas laterais, condição que facilita a fixação, produz menor distorção nas arestas, consequentemente produzindo menor encruamento e influência nos resultados.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios experimentais utilizando o método de Banabic adaptado por este trabalho na descrição da curva limite de conformação;
- Verificar a diferença entre o perfil de deformação, força deslocamento do punção dos corpos de prova 1,2,3 e 4 com ensaios experimentais e simulações numéricas;
- Estudar a influência destes corpos de prova utilizando o ferramental de Marciniak;

- Realizar ensaios experimentais utilizando diversos tipos de ligas de aços e alumínio afim de verificar as diferenças de comportamento plástico e qual método e obter resultados mais precisos para o tipo de material que se deseja conformar;
- Comparar os resultados deste método com produtos que necessitam a estampagem e verificar se este método é eficiente nestas aplicações;
- Verificar via ensaios experimentais se a utilização do *carrier blank* é positiva ou não na descrição da curva limite de conformação.

REFERÊNCIAS

- ABSPOEL, M. *et al.* A new method for predicting forming limit curves from mechanical properties. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 5, p. 759-769, 2013.
- ALTAN, T.; TEKKAYA, A. **Sheet Metal Forming: Processes and Applications**. Ohio: ASM international, 2012a.
- ALTAN, T.; TEKKAYA, A. **Sheet Metal Forming Fundamentals**. Ohio: ASM international, 2012b.
- ARCELORMITTAL. **Audi A8: o retorno do aço**. Disponível em: <<http://blog.arcelormittal.com.br/audi-a8-o-retorno-do-aco/>>. Acesso em: 16 mar. 2020.
- ASHBY, M. F.; JONES, D. R.H. **Engineering Materials 1: an introduction to properties, applications and design**. 4.ed. Oxford: Elsevier, 2012.
- AUDI TECHNOLOGY PORTAL. **Semi-finished components**. Disponível em: <<https://www.audi-technology-portal.de/en/body/aluminium-bodies/semi-finished-components>>. Acesso em: 16 mar. 2020.
- BANABIC, D. **Sheet Metal Forming Processes – Constitutive Modelling and Numerical Simulation**. Cluj-Napoca: Springer, 2010.
- BANABIC, D. *et al.* Development of a new procedure for the experimental determination of the forming limit curves. **CIRP Annals**, v. 62, n. 1, p. 255-258, 2013.
- BAYRAM, A. Effects of microstructure and notches on the mechanical properties of dual-phase steels. **Materials characterization**, v. 43, n. 4, p. 259-269, 1999.
- BLECK, W. *et al.* Microstructure and tensile properties in dual phase and trip steels. **Steel research international**, v. 75, n. 11, p. 704-710, 2004.

BILLUR, E.; ALTAN, T. Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part III, **Stamping Journal**. p. 12-13, 2014.

BURCHITZ, I. **Improvement of springback prediction in sheet metal forming**. Orientador: J. Huétink. 2008. 156 f. Tese (doutorado) - Universiteit Twente, Enchede, 2008.

CALCAGNOTTO, M. *et al.* Effect of grain refinement to 1 μ m on strength and toughness of dual-phase steel. **Materials Science and Engineering**, v. 527, n. 29-30, p. 7832-7840, 2010.

CHEMIN FILHO, R. **Avaliação das deformações de chapas finas e curvas CLC para diferentes geometrias de punções**. Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes. 2004. 127 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de tecnologia, Curitiba, 2004.

CHEMIN FILHO, R. *et al.* **Experimental and numerical true strain assessment on sheet forming for different tool design**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 48, n. 5-8, p. 473-479, 2009.

CHEMIN FILHO, R. **Estudo da fratura de aços de nova geração DP600 através da variação da pressão do prensa-chapas**. Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes. 2011. 149 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de tecnologia, Curitiba, 2011.

CHENG, J. *et al.* Formability enhancement of DP600 steel sheets in electro-hydraulic die forming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 244, p. 178-189, 2017.

CHOI, D. *et al.* The effect of retained austenite stability on high-speed deformation behavior of TRIP steels. **Metals and Materials International**, v. 12, n. 1, p. 13-19, 2006.

COER, J. *et al.* Detailed experimental and numerical analysis of a cylindrical cup deep drawing: pros and cons of using solid-shell elements. **International Journal of Material Forming**. v. 11, n. 3, p. 357-373, 2018.

COMPANIES MARKET CAP. Disponível em:

<https://companiesmarketcap.com/automakers/largest-automakers-by-market-cap/>.

Acesso em: 18 out. 2021

CURTZE, S. **Characterization of the Dynamic Behavior and Microstructure Evolution of High Strength Sheet Steels**. 2009. 113 f. Tese (doutorado) – Tampere University of Technology, Tampere, 2009.

DEMERI, M. Y. **Advanced High-Strength Steels: Science technology, and applications**. Ohio: ASM international, 2013.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG EUROPEAN STANDARD
INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **DIN EN ISO 12004-2: Metallische Werkstoffe – Bleche und Bänder – Bestimmung der Grenzformänderungskurven im Labor (ISO 12004-2:2008); Deutsche Fassung EN ISO 12004-2:2008**, 2009.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A first course in finite element analysis**. Chichester: John Wiley and Sons, 2007.

GIANSOLDATI, M. *et al.* Barriers to the adoption of electric cars: Evidence from an Italian survey. **Energy Policy**, v. 146, p. 111812, 2020.

GIPIELA, M. *et al.* INFLUÊNCIA DA FORÇA NO PRENSA-CHAPAS NA CONFORMABILIDADE DO AÇO MULTIFÁSICO CPW800. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 8., 2014, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2014.

GIRAULT, E. *et al.* Metallographic methods for revealing the multiphase microstructure of TRIP-assisted steels. **Materials Characterization**, v. 40, n. 2, p. 111-118, 1998.

GOODWIN, G. Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop, **SAE transactions**, n. 680093, p. 380-387, 1968.

GORNI, A. Aços avançados de alta resistência microestrutura e propriedades mecânicas. Congresso de Corte e Conformação de Metais, 5., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Aranda eventos, 2009. p. 26-57.

GU, X. *et al.* Role of martensite/austenite constituents in novel ultra-high strength TRIP-assisted steels subjected to non-isothermal annealing. **Materials Science and Engineering A**, v. 754, p. 318-329, 2019.

HARLOW, S. Lithium War Heats Up After Epic Launch of Tesla Model. **OilPrice.com**. London, 19 abr. 2016.

HE, X. *et al.* Influence of martensite morphology and its dispersion on mechanical properties and fracture mechanisms of Fe-Mn-C dual phase steels. **Metal science**, v. 18, n. 7, p. 367-373, 1984.

HECKER, S. Formability of aluminum alloy sheets. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 97, n. 1, p. 66-73, 1975.

HOSFORD, W.; CADDELL, R. Metal Forming mechanics and metallurgy. 3. ed. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2007

HUANG, Y.; CHEN, J. Influence of the tool clearance in the cylindrical cup-drawing process. **Journal of materials processing technology**, v. 57, n. 2, p. 4-13, 1996.

ISIK, K. *et al.* Formability limits by fracture in sheet metal forming. **Journal of materials processing technology**, v. 214, n. 8, p. 1557-1565, 2014.

KEELER, S. **Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches**. Orientador: Walter Backofen. 1961. 95 f. Tese (doutorado) - Massachusetts Institute of Technology, Department of Metallurgy, Cambridge, 1961.

KEELER, S. Understanding Sheet Metal Formability. **Machinery**, v.74, n. 8, p. 94-103, 1968.

KEELER, S. *et al.* **Advanced High-Strength Steel (AHSS) Application guideliness**. 4. ed. World Auto Steel, 2009.

KEELER, S. *et al.* **Advanced High-Strength Steel Application guidelines**. 6. ed. World Auto Steel, 2017.

KONIECZNY, A. **Advanced High-Strength Steel Formability**. American Iron and Steel Institute, 2003.

KUZIAK, R. *et al.* Advanced high strength steels for automotive industry. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v.8, n.2, p. 103-117, 2008.

LACROIX, G. *et al.* The fracture toughness of TRIP-assisted multiphase steels. **Acta Materialia**, v. 56, n. 15, p. 3900-3913, 2008.

LAJARIN, S. **Influência da variação do módulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência**. Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes. 2012. 197 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de tecnologia, Curitiba, 2012.

LAJARIN, S.; MARCONDES, P. Influence of computational parameters and nonlinear unloading behavior on springback simulation. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 35, n. 2, p. 123-129, 2013.

LANGE, K. *et al.* **Handbook Metal Forming**. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1985.

LEPERA, F. Improved etching technique to emphasize martensite and bainite in high-strength dual-phase steel. National Steel Corporation, v. 32, n. 3, p. 38-39, 1980.

LI, X. *et al.* Influence of manganese content on ϵ/α' -martensitic transformation and tensile properties of low-C high-Mn TRIP steels. **Material & Design**, v. 142, p. 190-202, 2018.

MADI, M. *et al.* An analysis of the forming speed variation with relation to deep drawing depth of steel DP 600 sheets. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 99, n. 9, p. 2417-2424, 2018.

MARCONDES, P. V. P. *et al.* The coining force influence on springback in TRIP800 steel V and L-bending processes. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 38, n.2, p. 455-463, 2015.

MATLOCK, D. K; SPEER, J. G. **Third generation of AHSS: microstructure design concepts**. Londres: Springer, 2009.

NANDA, T. *et al.* Third generation of advanced high-strength steels: processing routes and properties. **Journal of Materials: Design and applications**, v. 233, n.2, p. 209-238, 2016.

NIKHARE, C. *et al.* Experimental and Numerical evaluation of forming and fracture behaviour of high strength steel. **Proc. Of New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels**, p. 26-28, 2008.

OHWUE, T.; KOBAYASHI, Y. Analysis of earring in circular-shell deep-drawing of bcc and hcp sheet metals. **Procedia Engineering**, v. 81, p. 887-892, 2014.

PADMANABHAN, R. *et al.* Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 43, n. 14, p. 1062-1067, 2007.

PANICH, S. *et al.* Experimental and theoretical formability analysis using strain and stress based forming limit diagram for advanced high strength steels. **Materials & Design**, v. 51, p. 756-766, 2013.

RAJU, S. *et al.* Influence of variables in deep drawing of AA 6061 sheet. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 20, n. 10, p. 1856-1862, 2010.

REDDY, J. **An Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis with applications to heat transfer, fluid mechanic and solid mechanics**. Texas: Oxford University Press, 2015

ROY, T. *et al.*, **Advanced High Strength Steel**. Singapura: Springer, 2018.

SANTOS, R. **Avaliação de estampabilidade do aço DC 06 (DIN 10152) e validação das deformações verdadeiras obtidas via simulação numérica**. Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes. 2007. 97 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de tecnologia, Curitiba, 2007.

SANTOS, R. **Influência da força pós dobra e da geometria da ferramenta no retorno elástico em processos de dobramento**. Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes. 2013. 115 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de tecnologia, Curitiba, 2013.

SCOTT, C. *et al.* The development of a new Fe-Mn-C austenitic steel for automotive applications. **Revue de Métallurgie–International Journal of Metallurgy**, v. 103, n. 6, p. 293-302, 2006.

SEMIATIN, S. *et al.* **Metalworking: sheet forming**. Ohio: ASM international, 2006.

SOARES, J. A. *et al.* Study of the punch–die clearance influence on the sheared edge quality of thick sheets. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 65, n. 1-4, p. 451-457, 2013.

SRIVASTAVA, A. *et al.* Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of cold rolled C–Mn–Si TRIP-aided steel. **Materials Characterization**, v. 57, n. 2, p. 127-135, 2006.

STAHL, W.; BUČKO, P. Analysis of the Impact of Charging Electric Cars on the Power System Load. **Acta Energetica**, v.1, n. 38, p. 95-101, 2019.

SUH, D. *et al.* Influence of Al on the microstructural evolution and mechanical behavior of low-carbon, manganese transformation-induced-plasticity steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 41, n. 2, p. 397, 2010.

TEKKAYA, A.; MARTINS, P. Accuracy, reliability and validity of finite element analysis in metal forming: a user's perspective. **Engineering Computations**, v.26, n.8, p 1025 – 1055, 2009.

TRADINGVIEW. Disponível em:

<https://br.tradingview.com/chart/pPoAi95t/?symbol=NASDAQ%3ATSLA>. Acesso em :18 out. 2021

ULSAB-AVC. **Advanced vehicle concepts-overview report**. 2002. Relatório técnico. Disponível em: <https://www.a-sp.org/~media/Files/Autosteel/Programs/ULSAB-AVC/avc_overview_rpt_complete.pfd>. Acesso em:18 mar. 2020.

VENKATESH, V.; GOH, T. A note on mathematical models of cup drawing by the Guerin and Marform processes. **Journal of mechanical working technology**, v. 13, n. 3, p. 273-278, 1986.

VERCAMMEN, S. *et al.* Cold rolling behaviour of an austenitic Fe–30Mn–3Al–3Si TWIP-steel: the importance of deformation twinning. **Acta Materialia**, v. 52, n. 7, p. 2005-2012, 2004.

WATERSCHOOT, T. *et al.* Tempering kinetics of the martensitic phase in DP steel. **ISIJ International**, v. 46, n.1, p.138-146, 2006.

WORLD AUTO STEEL. **3rd generation steels**. 2021. Relatório técnico. Disponível em: <<https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/3rd-generation-steels/>>. Acesso em: 27 ago. 2021.

ZHANG, J. *et al.* Bake Hardening behavior of TRIP and DP steels. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, v.15, n.2, p.132-137, 2008

ZHUMING, B. **Finite element analysis applications: a systematic and practical approach**. Londres: Academic Press, 2017.

ANEXO 1 – DETALHAMENTO DO PROCEDIMENTO UTILIZADO NO MODELAMENTO NUMÉRICO

