

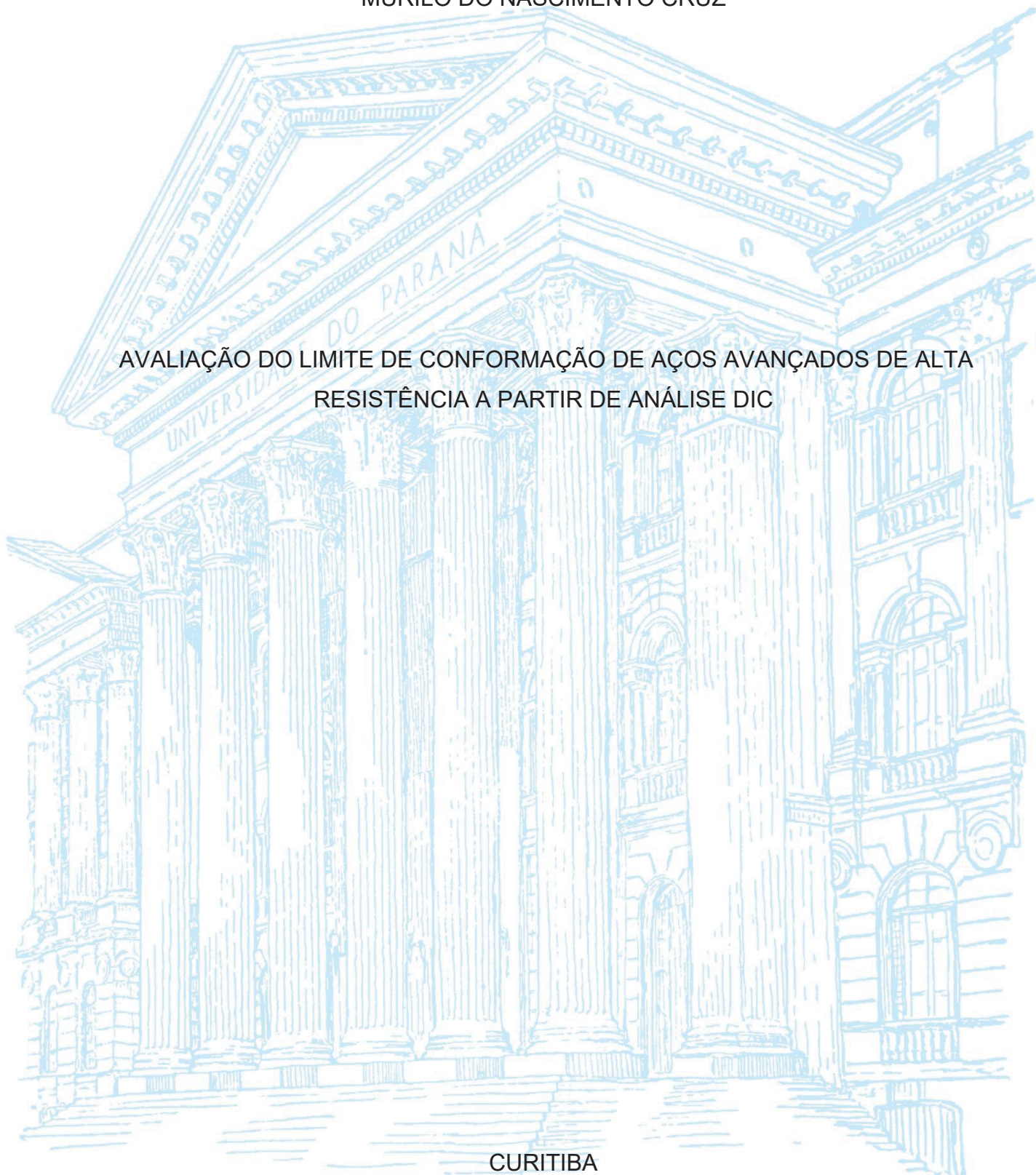
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MURILO DO NASCIMENTO CRUZ

AVALIAÇÃO DO LIMITE DE CONFORMAÇÃO DE AÇOS AVANÇADOS DE ALTA
RESISTÊNCIA A PARTIR DE ANÁLISE DIC

CURITIBA

2023



MURILO DO NASCIMENTO CRUZ

AVALIAÇÃO DO LIMITE DE CONFORMAÇÃO DE AÇOS AVANÇADOS DE ALTA
RESISTÊNCIA A PARTIR DE ANÁLISE DIC

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 Victor Prestes Marcondes

Coorientador: Prof. Dr. Ravilson Antônio Chemin Filho

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Cruz, Murilo do Nascimento

Avaliação do limite de conformação de aços avançados de alta resistência a partir de análise DIC / Murilo do Nascimento Cruz. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

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

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes

Coorientador: Ravilson Antônio Chemin Filho

1. Aço – Indústria. 2. Correlação Digital de Imagem. 3. Conformação de metais. 4. Ensaio Nakazima. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Marcondes, Paulo Victor Prestes. IV. Chemin Filho, Ravilson Antônio. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
MECÂNICA - 40001016040P5

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 arguição da Dissertação de Mestrado de **MURILO DO NASCIMENTO CRUZ** intitulada: **AVALIAÇÃO DO LIMITE DE CONFORMAÇÃO DE AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA A PARTIR DE ANÁLISE DIC**, 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, 15 de Setembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

18/09/2023 14:01:23.0

RAVILSON ANTONIO CHEMIN FILHO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

18/09/2023 15:52:18.0

CLAUDIMIR JOSÉ REBEYKA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

18/09/2023 10:58:40.0

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 SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 316095

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 316095

RESUMO

A indústria automotiva assim como a indústria de produtos de linha-branca são grandes consumidores de peças estampadas e estão sempre em busca de melhorias de processos visando produtos mais eficientes. Para atingir tal eficiência seja em maior resistência ou menores pesos e gastos com materiais, essas indústrias estão em busca de aços avançados que possuem essas propriedades desejáveis. O foco em melhor conformabilidade nos aços avançados é essencial para atingir essas novas necessidades dos consumidores destas peças. Comumente é utilizado fatores que quantificam a conformabilidade do material, como a CLC (Curva Limite de Conformação) que vários autores utilizam de métodos tradicionais como Nakazima para executar. Entender e explorar as variáveis do ferramental e maiores assertividades são essenciais visto que a utilização destes aços especializados ainda está em desenvolvimento. Para melhor análise de conformabilidade destes, uma maior assertividade de características do material como determinação do ponto de estricção acaba sendo um fator importante no aproveitamento das propriedades dos materiais. Com base em objetivos de trabalhos anteriores que visam analisar o ferramental, o ponto de estricção pode ser obtido através de análise DIC (Correlação Digital de Imagem). Este trabalho teve como objetivo a tratativa de controles de estricção com o uso de DIC, determinando como o ferramental pode executar os métodos tradicionais de CLC evitando a ruptura e assim preservando propriedades mecânicas que são desejáveis para a conformação. Realizou-se o ensaio tradicional Nakazima monitorado, para que possa ser analisado em softwares DIC. Por fim, avaliou-se o sistema DIC na assertividade e pontos de melhoria proporcionando uma nova metodologia para conformabilidade no cenário de pesquisa e industrial.

Palavras-chave: Aços avançados, CLC – Curva Limite de Conformação, Análise DIC, Ensaio Nakazima.

ABSTRACT

The automotive industry as well as white-goods industry are great consumers of stamped parts and are always searching for new and better processes aiming for more efficient products. To reach this efficiency, it is required higher strength or less weight and less expenses with material and resources, these industries are in pursue of advanced steels that have these required material properties. The pursue for better formability in the advanced steels are essential to achieve these new necessities for the consumers of these parts. Commonly, there are ways to measure and quantify the formability of a material, the FLC (Forming Limit Curve) for example, that many authors utilize of traditional methods like Nakazima to execute it. Understand and explore tools variables and more assertive are essential especially when the usage of these advanced steels is still under development. For better formability analysis, higher material properties assertiveness such as necking diffusion point turns out to be a crucial factor in taking advantage of the properties for a specific material. Basing on previous works that had large work on tools variables analysis, finding the necking point can be achieved through DIC (Digital Image Correlation). The objective presented in this work is to treat and control necking diffusion using DIC, by determining how the tool management can execute the traditional method Nakazima before rupture, preserving desired formability mechanical properties. The traditional Nakazima test was made and monitored, so it could be analyzed afterward. Finally, the DIC system was evaluated regarding assertiveness and improvements, providing a new methodology for formability on industry and research context.

Keyword: Advanced Steels, FLC – Forming Limit Curve, DIC Analysis, Nakazima Method.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Dimensões para o ensaio Nakazima: a) dos Corpos de Prova e b) do Ferramental de estampagem de punção hemisférico.	19
FIGURA 2 – Modos de deformação representados pela Curva Limite de Conformação.....	20
FIGURA 3 – Utilização de câmeras para aquisição de imagem durante ensaio Nakazima.	21
FIGURA 4 – Taxa de deformação na flange pela força do prensa-chapas para o aço DP600.	25
FIGURA 5 – CLC proposta para aço DP600 aos micromecanismos da fratura gerado por tensões uni e biaxiais.....	26
FIGURA 6 – Simulação e resultados CAE para análise do efeito <i>drawbead</i>	27
FIGURA 7 – Influência da carga do prensa-chapas e do <i>drawbead</i> na CLC para a) <i>drawbead</i> plano b) <i>drawbead</i> circular c) <i>drawbead</i> triangular d) <i>drawbead</i> quadrado.	28
FIGURA 8 – Representação esquemática da CLC apresentando os limites de segurança para conformação.....	29
FIGURA 9 – Monitoramento da temperatura da prensa hidráulica antes da execução do ensaio.	30
FIGURA 10 – Comparação da CLC obtida até o limite de estrição com temperatura controlada para o aço DP600.....	30
FIGURA 11 – Comparação da CLC obtida até o limite de estrição comparado à ruptura para o aço DP600.....	31
FIGURA 12 – Difusão da estrição: a) Evolução da difusão da estrição para aumento de deformação uniaxial até início da estrição localizada. b) Gráfico de evolução da deformação maior e menor pelo tempo até o início da estrição localizada.....	32
FIGURA 13 – Representação esquemática de referencial na análise DIC, constituição da malha virtual no padrão referencial e posterior subdivisão em facets para análise subsequente.....	33
FIGURA 14 – Representação esquemática de captura 2d de análise DIC com a utilização de uma câmera.	34

FIGURA 15 – Comparativo de análise DIC com simulação CAE para os mesmos materiais. a) Como recebido do fornecedor em DIC e b) Como recebido do fornecedor CAE. c) Após recozimento em DIC e d) Após recozimento em CAE.	35
FIGURA 16 – Gráfico de evolução, a) da velocidade e b) da aceleração da deformação pelo tempo.	36
FIGURA 17 – Correlação de tempo, seção e deformação para determinação do ponto de estricção.	36
FIGURA 18 – Análise DIC de a) seção de amostra para encontrar ponto de maior deformação e b) evolução da região de estricção através de estágios de recordação da imagem.	37
FIGURA 19 – Evolução da deformação e taxa de deformação nos pontos A de carregamento plástico (fora da região de estricção) e B de descarregamento elástico (ponto de estricção localizada) para determinação do início da estricção a partir da queda da taxa de deformação no ponto A.	38
FIGURA 20 – Taxa de deformação maior em ensaio de dobramento, pontos de (A) até (F) escolhidos dentro e fora da região de estricção para determinação do estágio (<i>frame</i> do vídeo), correspondente ao ponto inicial da estricção.	39
FIGURA 21 – CLC estabelecida pelo método temporal junto com dados obtidos da ISO 12004-2:2008, Abordagem Kitting e Método Situ.	39
FIGURA 22 – Análise metalográfica para detecção de estricção dos corpos de prova logo antes de fraturar e pós-fratura para raios de a) 60 mm b) 80 mm c) 100 mm d) 200 mm.	40
FIGURA 23 – Análise Merklein e Análise Hotz para correlação entre ruído de imagem com deformações. a) Gráfico de aceleração pelo tempo b) Gráfico de coeficiente de correlação por tempo.	41
FIGURA 24 – Desenho técnico de equipamento de prensa hidráulica com punção hemisférico de raio de 50 mm seguindo padrão de ensaio Nakazima. Configuração com <i>drawbead</i> circular.	43
FIGURA 25 – Anéis de diferentes geometrias de <i>drawbead</i> para o ferramental (dimensões em mm). a) <i>Drawbead</i> plano (sem <i>drawbead</i>), b) <i>drawbead</i> circular, c) <i>drawbead</i> triangular e d) <i>drawbead</i> quadrado.	44

FIGURA 26 – Dimensões de corpos de prova utilizados nos ensaios para o desenvolvimento do sistema DIC com o aço BH220. 8 CPs de 200x200 mm a 70x200 mm.....	45
FIGURA 27 – Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios para a avaliação da estampabilidade do aço DP780 com o sistema DIC. 3 CPs de 200x200 mm a 150x200 mm.	47
FIGURA 28 – Interface de usuário Ncorr contemplando as informações de dados de entrada necessários para análise DIC, mostrando também a região de interesse determinada, a imagem referencial e a imagem analisada.	53
FIGURA 29 – Câmera modelo esportiva portátil utilizada dentro da prensa hidráulica para captura de imagens e posterior análise DIC.	54
FIGURA 30 – Anel de luz, imã e câmera compondo o módulo de fixação e iluminação necessários para acoplar à prensa hidráulica.	55
FIGURA 31 – Imagens capturadas pelo módulo da câmera no interior da prensa hidráulica. a) Enquadramento do ensaio durante a estampagem. b) Enquadramento de ensaio no momento da ruptura.	57
FIGURA 32 – Resultado do mapa de deformação do software Ncorr com escala de deformação Green-Lagrangiana na direção x (E_{xx}), não satisfatório devido à máxima deformação estar na região central ao invés da região de fratura como o esperado.	59
FIGURA 33 – Determinação dos pontos, projetados sobre a imagem do perfil deformado da chapa, para análise da evolução de estricção: (A) no local da trinca, (B), (C), (D) intermediários entre o polo do punção e a fratura, e (E) na região do polo do punção.	59
FIGURA 34 – Gráfico da evolução das deformações para o desenvolvimento do software DIC.	60
FIGURA 35 – Gráfico da taxa de deformação durante a estampagem, para o desenvolvimento do software DIC.....	61
FIGURA 36 – Exemplos de mapas de deformação de análise DIC representados pelo software sem ajuste de imagem a) Deformação focada no centro b) Falha durante análise pelo software.	62
FIGURA 37 – Lente adicional <i>superwide</i> utilizada para aumentar o ângulo de imagem e diminuir o efeito de profundidade nas gravações.	64

FIGURA 38 – Captura de imagem no módulo experimental após ajuste de imagem com a utilização da lente adicional.....	65
FIGURA 39 – Definição da região de interesse através do software DIC.	66
FIGURA 40 – Mapa de deformação após ajuste de imagem, com a área de máxima deformação na região da fratura.	66
FIGURA 41 – Gráfico de evolução da deformação durante a conformação na região de fratura após o ajuste de imagem durante o desenvolvimento do software DIC.	68
FIGURA 42 – Gráfico da taxa de deformação durante a estampagem na região de fratura após o ajuste de imagem durante o desenvolvimento do software DIC.	69
FIGURA 43 – Gráfico da taxa de deformação durante a estampagem na região de fratura que apresenta região de difusão da estrição acentuada do aço BH220 com 58tf de FPC e utilização de <i>drawbead</i>	70
FIGURA 44 – CLC realizada na condição de fratura para o aço BH220 com 58tf de FPC e utilização de <i>drawbead</i> e CLC com correlação de deformações maiores obtidas pelo DIC dentro e fora da região de estrição com os dados da gravação deste mesmo ensaio.....	72
FIGURA 45 – CLC realizada na condição de fratura para o aço BH220 com 80tf de FPC e sem utilização de <i>drawbead</i>	74
FIGURA 46 – Comparativa de região de fratura para CPs do mesmo ensaio do BH220. a) CP 200 x 200 mm (região de estiramento) b) CP 70x200 mm (região de embutimento).	75
FIGURA 47 – Gráfico da taxa de deformação durante a conformação na região de fratura que apresenta região de difusão da estrição acentuada do aço DP780 (80tf e <i>drawbead</i> circular). a) Todos os quadros de gravação. b) Aproximação nos quadros da região de estrição.....	78
FIGURA 48 – Gráfico dos dados registrados pelo CLP durante o ensaio de análise de estampabilidade do aço DP780 (80tf e <i>drawbead</i> circular) com os corpos de prova de tamanho de estiramento (200x200, 175x200 e 150x200 mm) a) ensaio até a fratura b) ensaio até valor de força de estampabilidade DIC e c) ensaio até valor de 95% de força de ruptura.	80

- FIGURA 49 – Gráfico dos dados registrados pelo CLP durante o ensaio de análise de estampabilidade do aço DP780 (80tf e *drawbead* circular) com os corpos de prova de tamanho 200x200 mm, demonstrando a instabilidade do manômetro com a oscilação dos valores de força de estampagem. a) ensaio completo. b) ampliação do gráfico.82
- FIGURA 50 – Comparativas de CLCs da região de estiramento para o aço AHSS DP780 na configuração de 80tf de FPC e *drawbead* circular: CLC na ruptura, CLC até início de estricção com os dados do DIC e até início de estricção com 95% da força de ruptura.....83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Propriedades do aço BH220.....	42
TABELA 2 – Propriedades do aço DP780.....	43
TABELA 3 – Configurações das baterias de ensaios realizados com o aço BH220, para o desenvolvimento do sistema DIC.....	46
TABELA 4 – Configurações das baterias de ensaios realizados com o aço DP780, para avaliação da Curva Limite de Conformação e do limite de estricção de chapas AHSS com sistema DIC.	48
TABELA 5 – Apresentação dos dados de deformação extraídos do software DIC Ncorr. Para deformações em E_{xx} e E_{yy}	67
TABELA 6 – Apresentação dos dados de deformação extraídos do software DIC Ncorr para os instantes de fratura e estricção retirados da gravação do ensaio e calculado relação de proporção entre fratura e estricção. Ensaio com BH220 com 58tf de FPC e utilização de <i>drawbead</i>	72
TABELA 7 – Dados comparativos entre os tempos de vídeo registrado por ensaio com os dados registrados pelo CLP da prensa hidráulica durante o desenvolvimento do DIC com o aço BH220 com 80tf de FPC e utilização de <i>drawbead</i> circular.	76
TABELA 8 – Dados comparativos entre os tempos de vídeo registrado por ensaio com os dados registrados pelo CLP da prensa hidráulica durante a análise da estampabilidade do aço DP780 com 80tf de FPC e utilização de <i>drawbead</i> circular.	79

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AHSS	– <i>Advanced High Strength Steels</i> (Aços Avançados de Alta Resistência)
ASTM	– <i>American Society for Testing Materials</i> (Sociedade Americana para Teste de Materiais)
BH	– <i>Bake Hardening</i> (Aços de Alta Resistência e Baixa Liga)
CAE	– <i>Computer Aided-Engineering</i>
CLC	– Curva Limite de Conformação (FLC – <i>Forming Limit Curve</i>)
CLP	– Controlador Lógico Programável
CNC	– Computador Numérico Computadorizado
CP	– Corpo de Prova
DIC	– <i>Digital Image Correlation</i> (Correlação Digital de Imagem)
DLC	– Diagrama Limite de Conformação (FLD – <i>Forming Limit Diagram</i>)
DP	– <i>Dual Phase</i> (Dupla Fase)
FPC	– Força do Prensa-Chapas (BHF – <i>Blank Holder Force</i>)
HSLA	– <i>High Strength Low Alloy</i> (Alta Resistência Baixa Liga)
HSS	– <i>High Speed Steel</i> (Aço de Alta Velocidade)
ISO	– <i>International Organization for</i> (Organização Internacional de Normalização)
ROI	– <i>Region of Interest</i> (Região de Interesse)
TRIP	– <i>Transformation Induced by Plasticity</i> (Transformação Induzida pela Plasticidade)
UFPR	– Universidade Federal do Paraná
ULSAB	– <i>Ultra Light Steel Auto Body</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

E_{xx}	– Deformação Green-Langrangiana (Componente X X)
E_{xy}	– Deformação Green-Langrangiana (Componente X Y)
E_{yy}	– Deformação Green-Langrangiana (Componente Y Y)
kgf	– Quilograma-Força
mm	– Milímetro
MPa	– Megapascal
n	– Coeficiente de Encruamento
R	– Raio
s	– Segundos
ε	– Deformação Verdadeira
ε_1	– Deformação Maior Verdadeira
ε_2	– Deformação Menor Verdadeira
$\dot{\varepsilon}_1$	– Taxa de Deformação Maior Verdadeira
$\dot{\varepsilon}_2$	– Taxa de Deformação Menor Verdadeira
$\ddot{\varepsilon}_1$	– Aceleração de Deformação Maior Verdadeira
$\ddot{\varepsilon}_2$	– Aceleração de Deformação Menor Verdadeira
ϕ	– Diâmetro
%	– Porcento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO.....	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
1.2 HIPÓTESE	17
1.3 JUSTIFICATIVA	17
2 REVISÃO BILIOGRÁFICA	19
2.1 CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO E SUAS VARIÁVEIS	19
2.2 AÇOS AVANÇADOS PARA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA	22
2.3 VARIÁVEIS DA FERRAMENTA DE ESTAMPAGEM.....	24
2.4 MECANISMOS DE AVALIAÇÃO DA CONFORMABILIDADE.....	33
3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	42
3.1 MATERIAIS E FERRAMENTAL UTILIZADOS	42
3.2 ENSAIOS PARA DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DIC.....	44
3.3 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA CONFORMABILIDADE DO AÇO DP780 COM SISTEMA DIC	46
4 DESENVOLVIMENTO DO DIC.....	49
4.1 ANÁLISE ATRAVÉS DE CORRELAÇÃO DE IMAGEM	49
4.1.1 Correlação do DIC com o ponto de estrição.....	50
4.2 SOFTWARE DIC.....	50
4.3 PREPARAÇÃO PARA GRAVAÇÃO DE IMAGEM	53
4.3.1 Fixação, iluminação e câmera.....	55
4.4 VALIDAÇÃO DO SOFTWARE	56
4.4.1 Ajuste de imagem.....	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.1 DESENVOLVIMENTO DO DIC	70
5.1.1 Determinação do ponto de estrição	75
5.2 ANÁLISE DA ESTAMPABILIDADE DO AÇO DP780 COM SISTEMA DIC.....	77
6 CONCLUSÃO	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

Apesar da ampla utilização de procedimentos de estamparia e demais processos clássicos de conformação, o cenário industrial ainda necessita de técnicas mais eficientes nesses processos, visando melhor qualidade de produtos, mais produtividade e redução de custos.

A indústria automotiva, juntamente da linha branca, são os maiores consumidores de peças oriundas de conformação de chapas metálicas. No cenário automotivo, melhorias na performance do veículo, segurança e redução de poluentes também são necessidades atuais, e podem ser obtidas através de melhorias no desenvolvimento das carrocerias. Sendo a carroceria de um veículo praticamente toda feita de aços estampados, trabalhos focados no desenvolvimento de aços mais eficientes, diferentes tecnologias e métodos que melhoram a análise do processo são sempre necessários.

1.1 OBJETIVO

Desta forma, o presente trabalho tem como finalidade principal, desenvolver técnicas mais sofisticadas para a análise de variáveis que afetam a conformabilidade dos aços durante a estampagem. Nesse sentido buscou-se, para os ensaios de estampagem, a implementação de recursos tecnológicos e diferentes metodologias capazes de trazer informações de forma ágil e precisa, cujos resultados possam representar um avanço significativo aos processos industriais.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver e utilizar um sistema com correlação digital de imagens (DIC), para melhor assertividade em avaliação da conformabilidade de aços para indústria automotiva.

1.1.2 Objetivos específicos

- I. Implementar um sistema de captura de imagens a um ferramental de ensaios de estampagem Nakazima;

- II. Desenvolver um sistema DIC para análise da conformabilidade de chapas metálicas no ensaio de estampagem Nakazima, através de softwares sem licença;
- III. Analisar a conformabilidade de chapas de aço AHSS, através da curva limite de conformação (CLC) do material, e do sistema DIC;
- IV. Utilizar o sistema DIC para determinação do limite de estrição de chapas de aço AHSS;
- V. Avaliar a assertividade e pontos de melhoria do sistema DIC na avaliação da conformabilidade de chapas de aços para indústria automotiva.

1.2 HIPÓTESE

Em ensaios de estampagem para determinação da curva limite de conformação (CLC) de chapas metálicas, se trabalha convencionalmente com a medição das deformações máximas atingidas até o seu limite de ruptura. O que não representa fielmente a máxima conformabilidade do aço pois para produção de peças conformadas não se extrapola o limite de resistência do material. Desta forma, normalmente é determinada a CLC do aço na ruptura e determinada uma margem de segurança abaixo dela para se trabalhar.

A determinação/detecção desse ponto de estrição da chapa metálica, porém, é difícil de ser realizada. Em ensaios como o Nakazima, tem-se que cessar o avanço do punção, que deforma o material, no exato instante de início da estrição da chapa. Desta forma, as deformações máximas poderiam ser medidas nessa condição e obtida a CLC no limite de estrição da chapa.

Com base nisso, através de procedimentos experimentais e do uso técnicas de correlação digital de imagens, tornar mais precisa e ágil a determinação do início da estrição de chapas metálicas, conformadas através do ensaio de estampagem Nakazima.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os critérios de estampabilidade do material ainda dependem muito de análises empíricas, e é notado que diversos fatores influenciam nessas características além das propriedades dos materiais. Muitos trabalhos como apontado na revisão

bibliográfica buscam esclarecer a obtenção dessas propriedades de manufatura para obter melhor compreensão desses critérios.

Este trabalho se justifica de uma forma a contemporizar e utilizar de métodos mais assertivos para obtenção de propriedades de conformação, trazendo uma maior quantidade de dados para análise com o auxílio do DIC. A metodologia utilizada e explicada neste trabalho conta com ferramental já previamente avaliado em trabalhos anteriores, e os softwares utilizados são acessíveis.

A obtenção de uma CLC com dados mais assertivos para o cenário de manufatura também é um atrativo dessa dissertação, essas curvas refletem como de fato é utilizado o material e o ferramental e podem assim garantir a melhor eficiência da conformabilidade, elevando as deformações ao máximo ou podendo resultar em peças com menores espessuras.

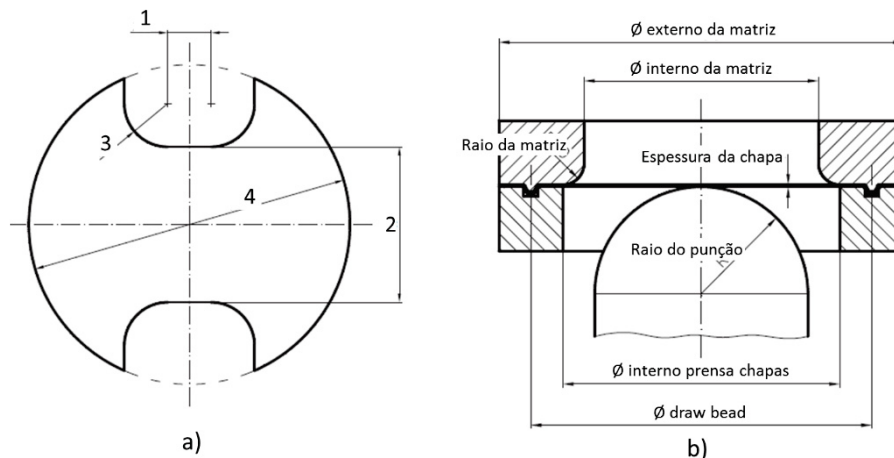
O estudo também serve como molde para trazer um possível cenário de aplicação da metodologia que será avaliada e estudada em cenários simples de conformação. Pois boa parte dos métodos são discutidos em cima de softwares *Open Source* por exemplo, ou seja, acessível para qualquer um sem custo extra de licença. Assim como mostrar a aplicação do DIC a partir da utilização de equipamentos comuns e não comercialmente especializados.

2 REVISÃO BILIOGRÁFICA

2.1 CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO E SUAS VARIÁVEIS

O ensaio Nakazima consta na ISO-12004-2 (2008) como o ensaio necessário para obtenção de uma CLC (Curva Limite de Conformação) completa. Conforme ilustrado na Figura 1 de ABDOLVAHED KAMIA (2014), o método de Nakazima é um processo de conformação em que um punção hemisférico (Figura 1.b) induz diferentes modos de deformação na região central do corpo de prova, modificando a largura do corpo de prova (dimensão 2, Figura 1.a). Esse ensaio permite a reprodução de diferentes estados de tensão e deformação no corpo de prova.

FIGURA 1 – Dimensões para o ensaio Nakazima: a) dos Corpos de Prova e b) do Ferramental de estampagem de punção hemisférico.



FONTE: Abdolvahed Kamia (2014).

A norma ISO 12004-2 (2008) cita algumas recomendações para a geometria do corpo de prova, de acordo com as cotas indicadas na (Figura 1.a), segue:

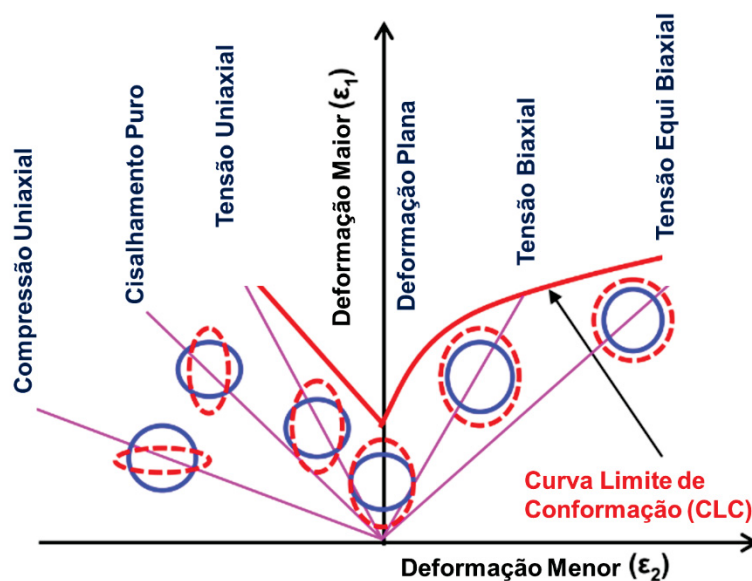
- Dimensão 1: 25% a 50% do diâmetro do punção (25 mm e 50 mm para punção de 100 mm)
- Dimensão 2: Largura variável que define modo de deformação.
- Dimensão 3: Raio de 20 a 30 mm.

Para a dimensão 2, é indicado no mínimo 5 valores diferentes para descrever a curva CLC completa, de maneira que sejam obtidos estados de tensão uniaxial e equibiaxial para a menor e maior dimensão, respectivamente. Recomenda-se também

ao menos 3 corpos de prova para cada geometria, de maneira a melhorar a confiabilidade do ensaio.

A CLC é uma ferramenta de critério de limite de falha para conformação de chapas, é comumente utilizado em processos de estampagens de chapas. É um diagrama que acaba englobando desde a tensão uniaxial até a tensão biaxial, obtido através de ensaios tradicionais como o de Nakazima (Figura 2).

FIGURA 2 – Modos de deformação representados pela Curva Limite de Conformação.



FONTE: Surajit (2021).

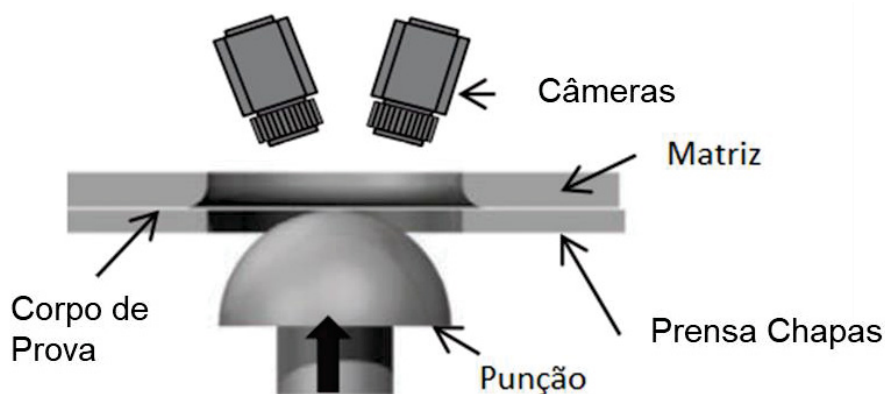
Diversos autores utilizam do método Nakazima ainda para ensaios ou para validações para temas de conformabilidade. LUMELSKYJ et al. (2017) trabalha com detecção de deformação no ensaio Nakazima através de pesquisa e simulação numérica para análise de estricção (BUTCHER et al; 2021). ZHANG et al. (2021) utiliza para validar com o Nakazima, uma abordagem de ensaios para geração de CLCs. AKSEN et al. (2020) replica em simulação o ensaio Nakazima junto de um ensaio de tração uniaxial, realçando a relevância do ensaio.

A CLC (em inglês FLC – *Forming Limit Curve*) é um instrumento clássico para prever a conformabilidade máxima do material, uma CLC é somente válida para materiais de mesma classe, espessura e tratamento termomecânico. A CLC foi desenvolvida por autores como KEELER (1965), GOODWIN (1968) e WOODTHORPE et al. (1969), diversos autores a utilizaram como ferramentas em seus trabalhos: MIN et al. (2016) avaliaram o surgimento de fraturas devido a mudança

de curvatura na superfície de uma chapa metálica. NODER e BUTCHER (2019) utilizaram do método de MIN et al. (2016) para um comparativo na investigação de influência deste método para ensaios Nakazima e Marciniak.

Na mesma linha de estudo, AFFRONTI e MERKLEIN (2017) focaram também em um método de análise de falhas na superfície do material, usando o ensaio Nakazima e a curva limite de conformação desenvolveram um método para a análise da superfície do aço DC04 em diferentes estados de tensão, para coletar informações sobre o comportamento de falhas de chapas metálicas aplicadas a componentes para estampagem profunda. Foi utilizada a medição óptica, conforme Figura 3, essa técnica é baseada na correlação de imagens digitais, que fornece esforços precisos na medição da distribuição local de deformação.

FIGURA 3 – Utilização de câmeras para aquisição de imagem durante ensaio Nakazima.



FONTE: Affronti e Merklein (2017).

SCHMID et. al. (2019) usaram o ensaio Nakazima para obter a CLC em seus estudos sobre o comportamento de falhas no processo de conformação mecânica em destaque o embutimento de chapas metálicas de aço e alumínio de diferentes ligas.

BARLO et. al. (2019) utilizaram a CLC em trajetórias não-lineares e a convencional relacionando à porcentagem significativa do uso desses aços na indústria automotiva. O uso dos dois métodos foi para avaliar a previsão de falhas em chapas ferrosas e não ferrosas de ambas as ferramentas para validar o uso e a precisão da simulação por elementos finitos "AutoFormplus R7.04". Este estudo foi desenvolvido na Volvo Cars Body Components, para melhorar os seus processos de estampagem e entender o comportamento dos diversos materiais utilizados na

fabricação e montagem de todos os componentes da carroceria dos diversos modelos produzidos pela marca.

Já SHINMYIA et. al. (2019) utilizaram a CLC para detectar possíveis falhas e/ou ocorrência de fraturas na flexão por estiramento em superfícies de chapas metálicas de resistência entre 980 N/mm² e 1180 N/mm² com diferentes flexibilidades.

NORZ e VOLK (2019) utilizaram o ensaio Nakazima tradicional e um modelo desenvolvido por JOCHAM et al. (2014) e realizaram testes comparativos com as CLCs de ambos e constataram que as duas CLCs mostram quase nenhuma diferença no nível de tensão. Apenas os caminhos da tensão uniaxial e biaxial diferem.

O método Nakazima para obter a CLC de diferentes tipos de metais mostrou eficácia no seu uso por diversos pesquisadores em trabalhos publicados e a CLC é uma ferramenta de investigação para entender o comportamento das diversas ligas de materiais ferrosos e não ferrosos no processo de conformação mecânica, seja na área acadêmica ou na indústria, principalmente a automobilística.

Através de ensaios Nakazima, IQUILO et al. (2019) trabalharam em um desenvolvimento de um método experimental para obtenção de uma CLC com auxílio de Correlação Digital de Imagem (DIC – *Digital Image Correlation*) e técnicas óticas para medir as deformações na superfície da amostra.

2.2 AÇOS AVANÇADOS PARA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Procurando soluções para este mercado, surgiram os aços avançados de alta resistência no final dos anos 90, de acordo com KEELER e MENACHEM (2014). Segundo ASGARI et al. (2007) a principal diferença física entre os aços AHSS e os convencionais está na microestrutura. Utilizando elementos de liga e um processo de fabricação controlado, obtêm-se materiais com elevada resistência mecânica e boa conformabilidade. Materiais que possuem diferentes fases em sua microestrutura e fases que sofrem transformações durante o processo de conformação e aquecimento fazem parte desta família chamada AHSS (*Advanced High Strength Steels*).

A indústria automobilística na busca de projetos com custos cada vez mais baixos e sem diminuir a segurança dos seus produtos, vem exigindo das indústrias siderúrgicas, fornecedoras da matéria prima para a construção da carroceria automotiva, novas ligas de aço que consigam associar as exigências e o contínuo desafio do mercado de aço. Quando se combina um bom projeto de liga com um

processo termomecânico adequado, é possível obter inúmeras combinações de propriedades, tais como: alta resistência associada à ductilidade, tenacidade e conformabilidade. A existência de diferentes características mecânicas só se torna possível em decorrência da presença de diferentes microestruturas constituintes, segundo BHADSHIA (2001), BLECK (2005) e GORNI (2008).

O desenvolvimento de novas ligas para a indústria automotiva é de grande expressão, pois diversos projetos estão em andamento, envolvendo diversos pesquisadores e grandes indústrias siderúrgicas espalhadas nos principais países que dominam essas tecnologias. O grande objetivo deste setor é obter métodos e técnicas de produção industrial com ênfase na descoberta de produtos mais seguros e com peso reduzido de acordo com ANDRADE et. al. (2002).

A Porsche *Engineering Services*, Inc., Troy, Michigan, EUA lidera um grupo de diversas companhias siderúrgicas de dezoito diferentes países nomeado *Ultra Light Steel Auto Body* – ULSAB. Este grupo teve como objetivo o desenvolvimento de ligas metálicas que disponibilizassem veículos mais seguros, com baixo custo de fabricação, baixo consumo de combustível reduzido oriundo de uma redução na massa dos veículos e responsabilidade ambiental. O desenvolvimento oriundo dessa grande iniciativa foi a introdução dos aços de alta resistência – HSS (*High Strength Steel*) nas estruturas dos automóveis, destacando-se entre esses os aços *Bake-Hardening* - BH e os Aços de Alta Resistência e Baixa Liga – HSLA (*High Strength Low Alloy*).

Nesta família estão os aços *DualPhase* (DP), *Complex-Phase* (CP), *Ferritic-Bainitic* (FB), *Martensitic* (MS or MART), *Transformation-Induced Plasticity* (TRIP), *Hot-Formed* (HF) e o *Twinning-Induced Plasticity* (TWIP). Estes aços são obtidos com um processo de fabricação das chapas de aço cuidadosamente controlado, de maneira que a taxa de resfriamento e os elementos de liga presentes foram uma microestrutura com quantidades definidas de martensita, bainita, austenita retida e ferrita. (ANDRADE et al., 2002; ABEYRATHNA et al., 2015; HAASE et al., 2017; KE et al., 2018; SCHMID et al., 2019; BARLO et al., 2019).

A aplicação de diversas ligas de aços da família dos aços avançados de alta resistência é projeto de estudo de muitos pesquisadores para melhor compreensão as características mecânicas e melhorar os processos da indústria automotiva como um todo. É importante a compreensão de como as novas ligas de aços de alta resistência comportam-se no processo de estampagem ou fabricação de

componentes na indústria automotiva, isso também foi um estudo realizado na tradicional montadora de veículos Volvo *Cars Body Components*, por BARLO et. al. (2019). Utilizou-se de uma liga de alumínio AA6016 além de aço bifásico DP780 da nova família dos aços de alta resistência. O foco é compreender as possíveis falhas que possam ocorrer quando os materiais são submetidos sobre tensão e flexão combinadas.

As propriedades mecânicas das diversas ligas de aços da nova família, usadas na indústria automotiva é o resultado de uma variável de processo e tem influência direta no processo de produção por conformação mecânica. O desenvolvimento de pesquisa para entender o comportamento e o fluxo do material é importante na estampagem de peças de toda a carroceria dos diversos modelos fabricados nas diversas indústrias automotivas espalhadas para outros sítios de fabricação.

2.3 VARIÁVEIS DA FERRAMENTA DE ESTAMPAGEM

Diversos estudos são requisitados e levantados com o intuito de estabelecer os fatores e avaliar a conformabilidade dos materiais, muitos desses fatores são independentes e devem ser estudados separadamente. A maneira usual de comparar melhor representatividade ou não em conformabilidade é através da CLC, assim é possível estabelecer dados quantitativos ao fim das análises. Em seguida serão levantados fatores estudados que afetam a conformabilidade do material.

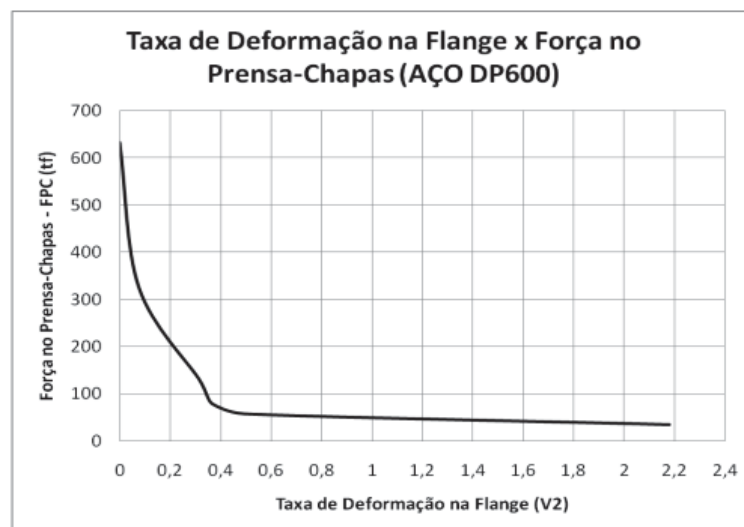
De acordo com CHEMIN (2013) dentre os componentes que fazem parte da ferramenta de estampagem, a matriz atua de maneira que a chapa será empurrada pelo punção para dentro da sua cavidade central, servindo como espécie de forma que delimita o diâmetro externo do corpo embutido. Para facilitar o fluxo do material, para o interior da cavidade é confeccionado na entrada desta um raio, nomeado de “raio do ombro” (exemplo ilustrado na Figura 24), este tem a função de facilitar o fluxo do material para o interior da matriz. O “raio do ombro” deve estar previsto no projeto, pois raios super ou subdimensionados podem aumentar ou diminuir respectivamente o fluxo do material, causando falhas na estampagem como fraturas, enrugamento ou falta de conformação no produto.

A norma ISO 12004-2, (2008) aponta que para evitar qualquer escoamento do material para dentro da matriz, é utilizado um *drawbead* no ferramental. De toda

forma, isso acaba não refletindo a maioria dos processos de estampagem, CHEMIN (2013) em seu trabalho propôs um teste Nakazima com algumas alterações, de modo que fosse possível avaliar diferentes cargas do prensa-chapas sem *drawbead* no levantamento final da CLC. Os ensaios contemplaram uma comparação entre os resultados obtidos para um aço *DualPhase* DP600, com cargas de 130tf, 80tf e 58tf para corpos de prova com 200 mm de comprimento por 150 mm de largura e 200 mm por 200 mm, prevalecendo o modo de deformação predominante de estiramento. Pôde ser observado que a carga do prensa-chapas FPC (BHF - *Blank Holder Force*) tem uma influência direta na estampabilidade do DP600.

Foi constatado no trabalho de CHEMIN (2013) que a força do prensa-chapas tem influência na conformabilidade do aço DP600. Três variáveis de cargas distintas foram utilizadas pelo autor no prensa-chapas para restringir a movimentação do material. Na Figura 4 é possível observar que conforme o aumento da carga em toneladas força, melhor a conformabilidade do material.

FIGURA 4 – Taxa de deformação na flange pela força do prensa-chapas para o aço DP600.

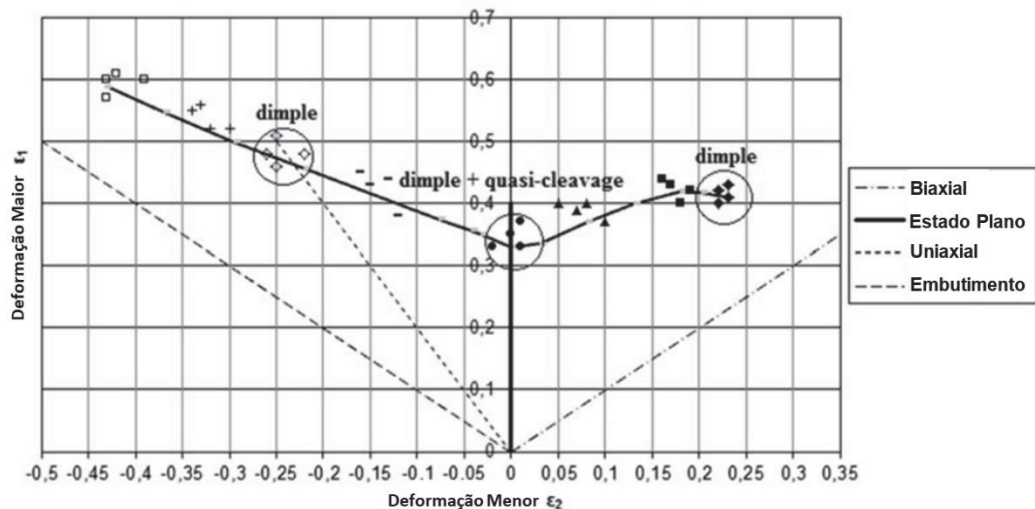


FONTE: Chemin (2011).

Por fim, um limite de escoamento de material foi encontrado para ter uma melhor conformabilidade refletindo na CLC, todavia menores FPCs levam a menores propriedades de estampagem devido ao grande escoamento do material. Essas informações podem ser úteis para processos de manufatura evitando despesas e possíveis tentativas e erros.

O *drawbead* também é determinante para conhecimento do limite de conformação de uma chapa metálica, e do modo de deformação que um material sofreu (LEOCATA et al; 2019). É possível então notar os fortes efeitos do ferramental num processo de conformação de chapas, ocasionando em transformações microestruturais (Figura 5, TIGRINHO et al; 2013).

FIGURA 5 – CLC proposta para aço DP600 aos micromecanismos da fratura gerado por tensões uni e biaxiais.

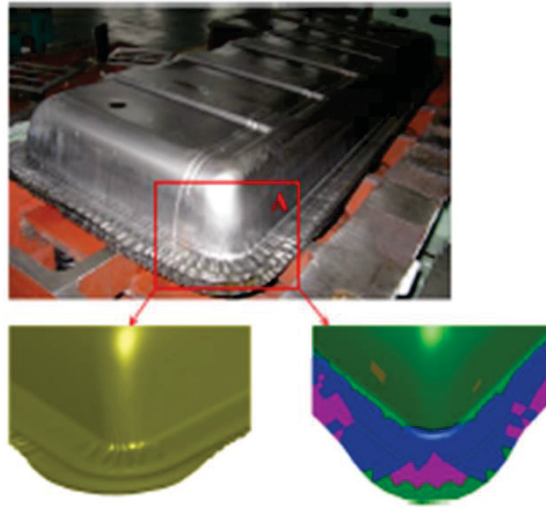


FONTE: Tigrinho et al. (2013).

SCHMID et. al. (2019) usaram um pré-carregamento de 7,5 MPa no processo de conformação com os diferentes materiais, DC04, DP800 e uma liga alumínio AA6014 e afirma que há diferenças na conformabilidade antes e depois de uma passagem pelo *drawbead*.

De acordo com WANG et al. (2017) desenvolveu-se um método de simulação de elementos finitos e foram realizados testes experimentais para validação deste. Constatou-se conforme Figura 6 que o design da ferramenta tem influência no formato final da peça. O processo de estampagem profunda ou embutimento pode ocorrer o *springback* (retorno elástico), enrugamento de partes crítica e até mesmo trincas no produto. Para esta simulação foi constatado, que se utilizar *drawbead* a qualidade da estampagem tem uma melhora considerável.

FIGURA 6 – Simulação e resultados CAE para análise do efeito *drawbead*.

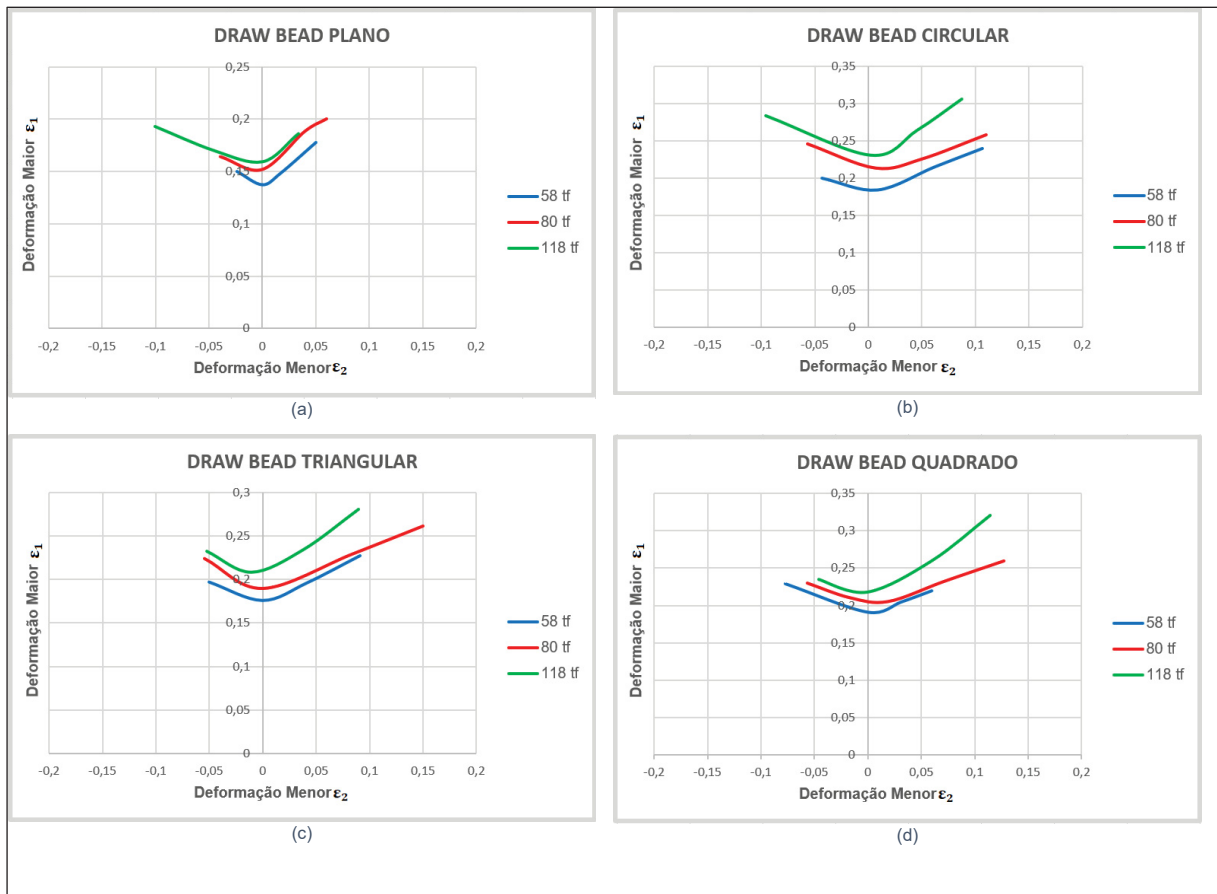


FONTE: Wang (2017).

Segundo WANG (2017) o *drawbead* é um dos parâmetros mais importantes para controlar o fluxo de material e a qualidade da peça no processo de conformação. A força de restrição dos *drawbeads* é principalmente relacionada com a sua geometria, por isso a qualidade da conformação de peças de chapa metálica pode ser melhorada mudando a geometria, o tamanho, e localização.

OLIVEIRA (2022) realizou para o aço DP780 um grande comparativo entre as diferentes geometrias do *drawbead*, visto na Figura 7, propôs utilizar do mesmo ensaio com algumas outras variáveis do ferramental para efetivamente analisar a influência da geometria do *drawbead* na CLC representada. O autor pôde verificar o resultado na espessura, também na região do ombro da matriz, concluindo que para o aço DP780 os melhores resultados foram obtidos com uma carga de 118 tf e com geometria circular de *drawbead*.

FIGURA 7 – Influência da carga do prensa-chapas e do *drawbead* na CLC para a) *drawbead* plano b) *drawbead* circular c) *drawbead* triangular d) *drawbead* quadrado.

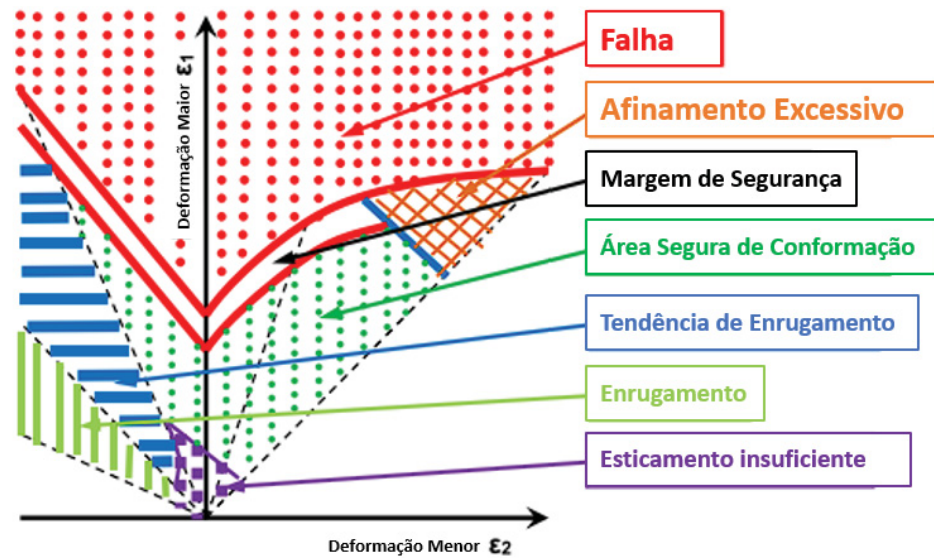


FONTE: Oliveira (2022).

O efeito Bauschinger, estudado por WEINMANN et al. (1988) é uma efeito dos materiais que acarreta mudanças na relação de tensão por deformação a partir de mudanças microestruturais na tensão distribuída do material. HAUS et al (2012) exploraram o ângulo do retorno elástico devido a este efeito para o aço TRIP800. ZHONG et al. (2021) exploraram o contexto de simulação avaliando o impacto do efeito Bauschinger e explorando os melhores métodos para contrapor os efeitos inesperados durante um experimento.

Autores explicam como é necessário antecipar os efeitos de uma CLC visto que os ensaios são feitos até a ruptura, e como analisar de forma a contemplar a margem útil de conformação. SURAJIT (2021) explica como é fundamental o conhecimento de estrição e dos efeitos da microestrutura na análise de uma CLC e como isso pode alterá-la. A Figura 8 de SURAJIT (2021) representa visualmente os campos seguros em uma CLC e o campo desejável de conformação, antecipando problemas de enrugamento ou deformações insuficientes e excessivas.

FIGURA 8 – Representação esquemática da CLC apresentando os limites de segurança para conformação.

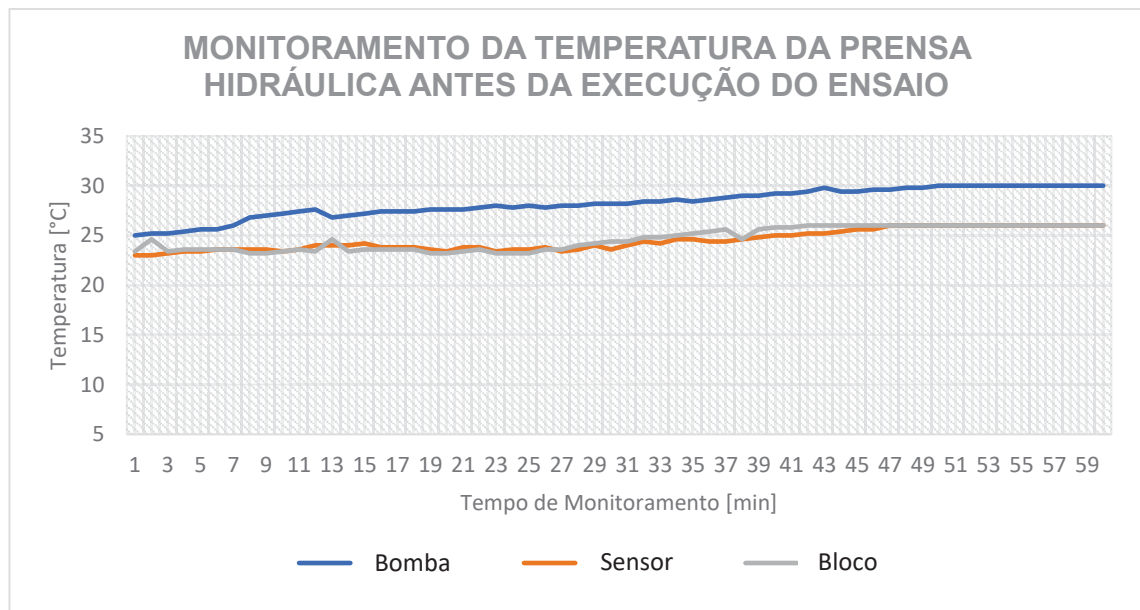


FONTE: Surajit (2021).

Estricção ou *necking* é uma falha detectada durante deformações em ensaios de tração, inicia-se com uma estricção difusa e posteriormente com uma estricção localizada. SURAJIT (2021) explica detalhadamente como se desenvolve um estricção no material, uma estricção difusa evolui para uma estricção localizada de acordo com o aumento da tensão. Esse ponto de início de estricção é tão importante em termos de conformabilidade que ZHANG et al. (2021) em uma outra abordagem traz um trabalho exclusivamente direcionado em localização da estricção através da difusão.

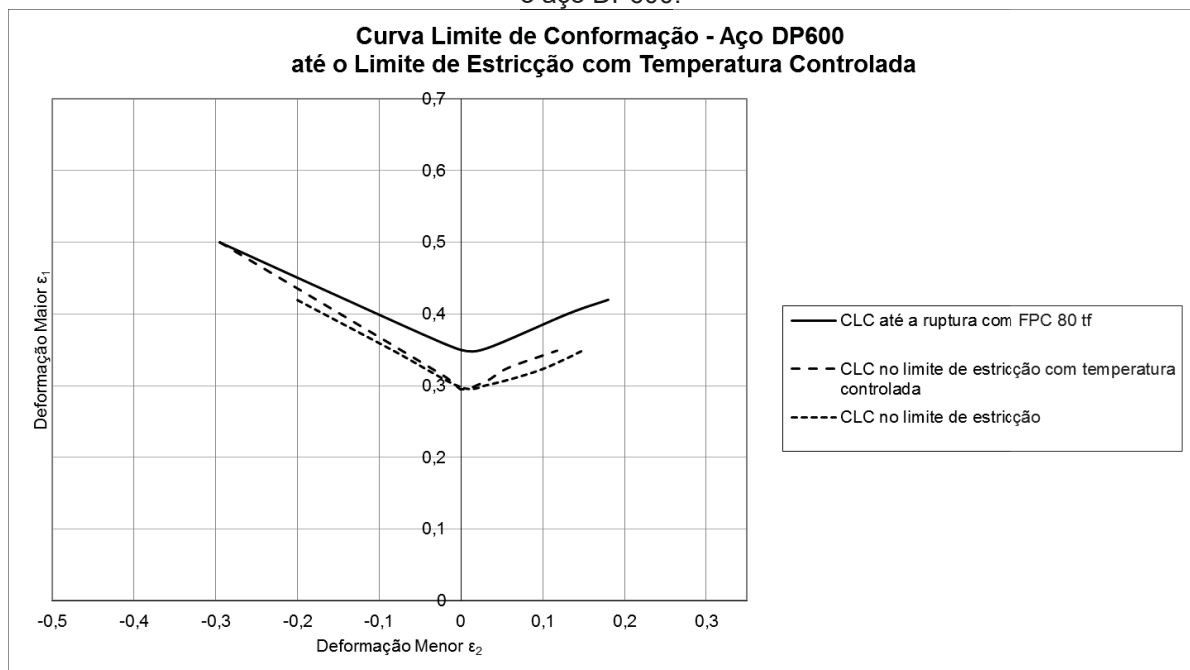
CRUZ et al. (2023) ilustraram os impactos da temperatura também a partir de monitoramento do maquinário. É notável como apresentado na Figura 9 a diferença de registro de temperatura do maquinário durante os ensaios, averiguando o fator temperatura nos componentes do maquinário assim como temperatura externa. LIMA (2017) também explorou qual a influência da temperatura e seus reflexos no mesmo tipo de ensaio para realizar as comparativas finais como ilustrado na Figura 10.

FIGURA 9 – Monitoramento da temperatura da prensa hidráulica antes da execução do ensaio.



FONTE: Cruz et al. (2023).

FIGURA 10 – Comparação da CLC obtida até o limite de estrição com temperatura controlada para o aço DP600.

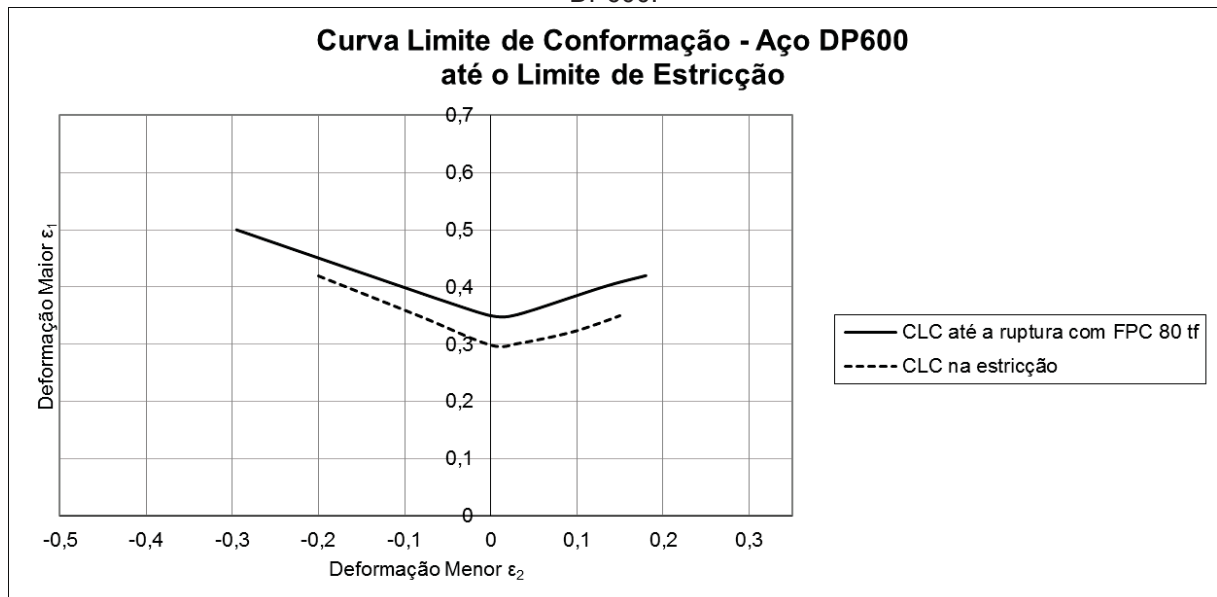


FONTE: Lima (2017).

LIMA (2017) explorou em seu trabalho adotar o parâmetro de estrição como limite de embutimento durante o ensaio Nakazima utilizando o aço DP600 para obtenção de CLC. Após a realização do ensaio convencional de acordo com a norma ISO 12004-2 (2008), novamente foram repetidos os testes desta vez com o intuito

de alterar a força limite no prensa-chapas gradativamente até encontrar um ponto em que a amostra não rompesse. O autor utilizou desta estratégia para averiguar que o momento em que o ensaio estaria sendo interrompido antes da ruptura reflete o limite de estrição deste material. Desta forma, LIMA (2017) realizou novamente a CLC com o intuito de averiguar as diferenças com o procedimento anteriormente adotado. A conclusão foi de que apesar do método ser bastante empírico e podendo ser diferente de acordo com o material estudado, há um reflexo mais assertivo quanto à CLC tendo como fator determinante o limite de estrição em termos de conformabilidade em aplicações industriais (Figura 11).

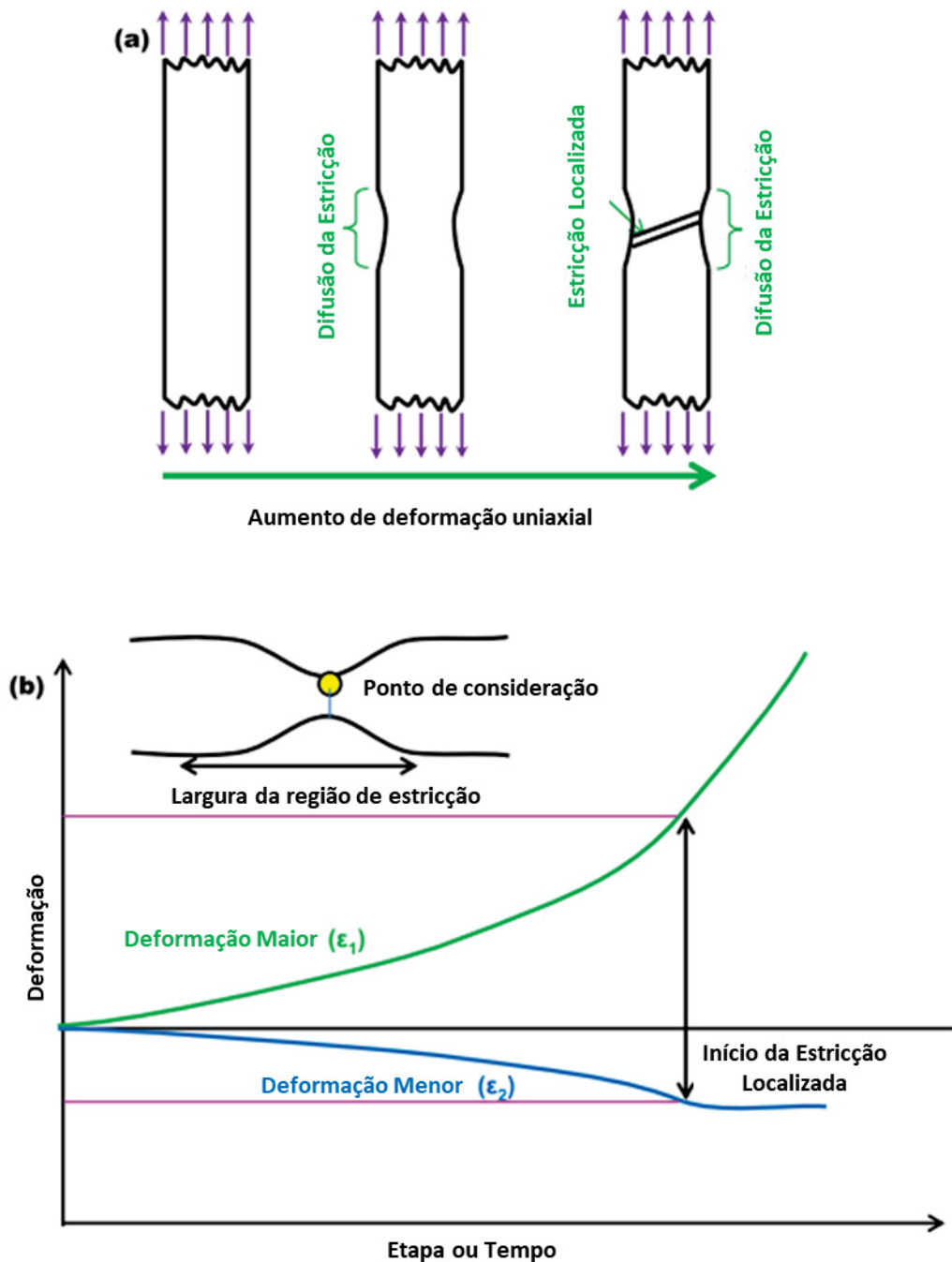
FIGURA 11 – Comparação da CLC obtida até o limite de estrição comparado à ruptura para o aço DP600.



FONTE: Lima (2017).

Figura 12.a demonstra os estágios de difusão do estrangulamento e como isso afeta no gráfico de deformação por tempo ou etapa de avanço do punção. Ao analisar graficamente é possível notar o início da difusão da estrição. SURAJIT (2021) também mostra no tradicional gráfico tensão por deformação a importância de determinar o ponto de estrição como na Figura 12.b. Em um estudo anterior SURAJIT (2016) explora através de regressão linear pelas propriedades mecânicas do material as maiores aproximações aos diagramas limites de conformação no estado plano de deformação.

FIGURA 12 – Difusão da estricção: a) Evolução da difusão da estricção para aumento de deformação uniaxial até início da estricção localizada. b) Gráfico de evolução da deformação maior e menor pelo tempo até o início da estricção localizada.



FONTE: Surajit (2021).

O autor explora e explica os métodos de análise de coeficiente de segurança ao plotar uma CLC. Explicando o método dependente do tempo, e mostrando a análise da deformação através do tempo ou de uma medida de comprimento do punção por exemplo. É necessário para esse método determinar o início da estricção para que assim sejam feitos cálculos gerando uma reestruturação da CLC.

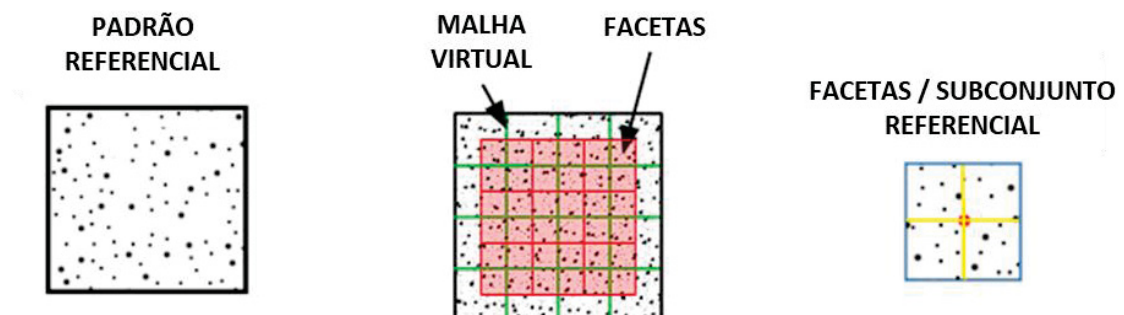
2.4 MECANISMOS DE AVALIAÇÃO DA CONFORMABILIDADE

Devido ao amplo uso de diferentes materiais e ampliação no estudo de conformabilidade de processos de manufatura e materiais, métodos de avaliação são fundamentais para obter metodologias mais assertivas e aprimorar a tecnologia envolvida no processo. GÓRSZCZYK et al. (2019) apresentaram claramente as vantagens e as limitações do DIC ou correlação e rastreamento de imagem digital. Os autores apontam como a tecnologia envolvida no processo possibilita análise de deformações para vários cenários na engenharia em uma ampla gama de materiais.

DIC é um método ótico que emprega técnicas de rastreamento e registro de imagem para medições 2D e 3D precisas de alterações nas imagens. Este método é frequentemente usado para medir deslocamentos e deformações de campo total, e é amplamente aplicado em muitas áreas da ciência e engenharia. Em comparação com deformações e extensômetros, a quantidade de informações coletadas sobre os detalhes finos da deformação durante os testes mecânicos é aumentada devido à capacidade de fornecer dados locais e médios usando correlação de imagem digital.

A análise consiste em ter um padrão primeiramente estabelecido (Figura 13, GÓRSZCZYK et al; 2019), assim softwares e afins podem registrar as imagens iniciais e finais a partir desses referenciais (GÓRSZCZYK et al; 2019). Dessa forma é possível verificar as diferenças nas imagens e essas podem ser interpretadas como deformações nos materiais.

FIGURA 13 – Representação esquemática de referencial na análise DIC, constituição da malha virtual no padrão referencial e posterior subdivisão em facets para análise subsequente.

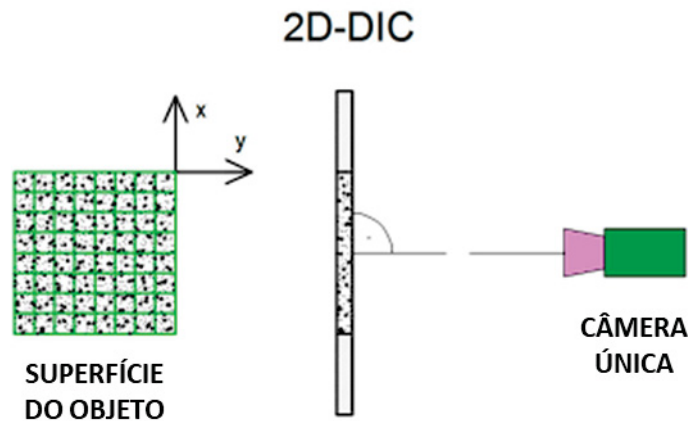


FONTE: Górszczyk et al. (2019).

Autores também exploram a utilização de DIC em vários cenários e utilizando de equipamentos convencionais, como câmeras tradicionais (Figura 14,

GÓRSZCZYK et al; 2019) e softwares acessíveis *Open Source*. BELLONI et al. (2019) por exemplo utilizaram de validação de um modelo de software *Open Source* DIC e compararam com demais softwares utilizados no mercado.

FIGURA 14 – Representação esquemática de captura 2d de análise DIC com a utilização de uma câmera.

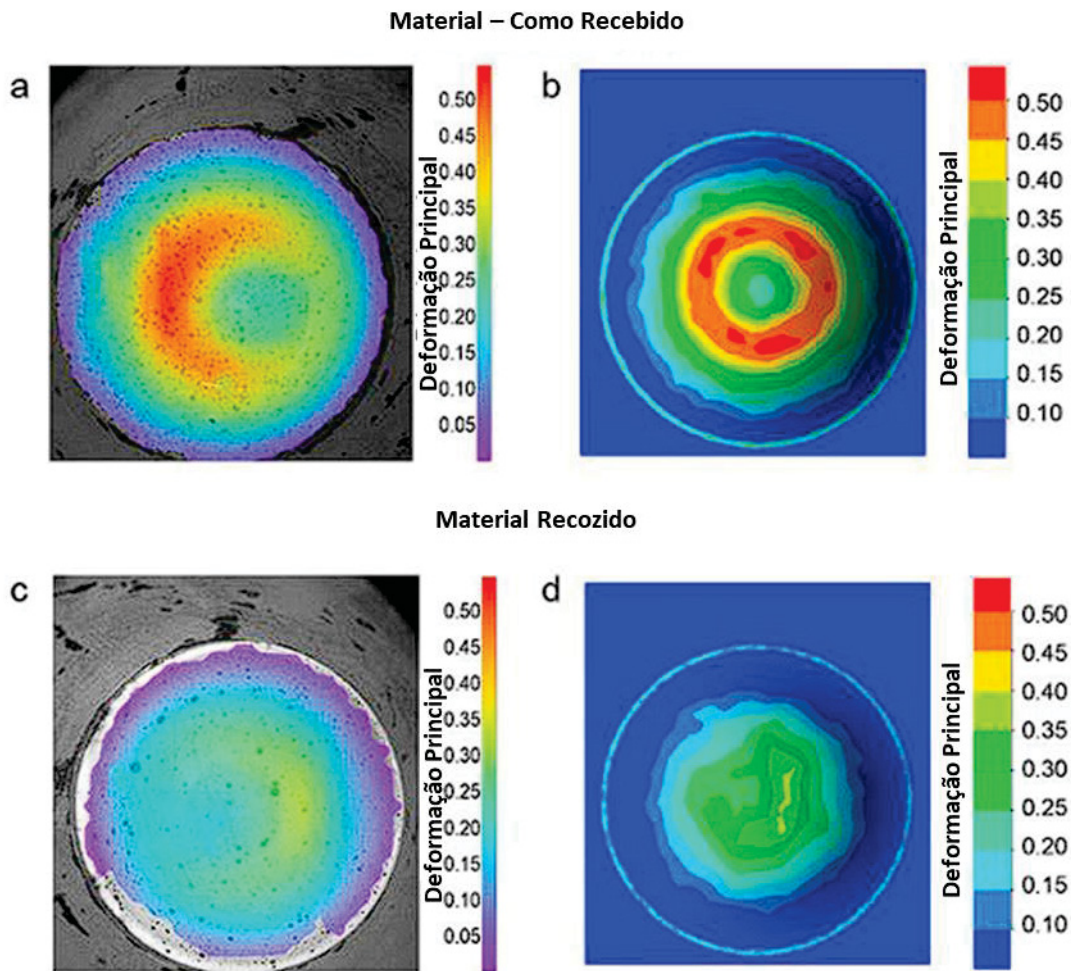


FONTE: Górszczyk et al. (2019).

KWIECIÉN et al. (2020) demonstraram como é possível utilizar da metodologia DIC para análise de deformações, e como isso pode ser implementado em ensaios que analisam deformações e início de estrição (Figura 15, KWIECIÉN et al; 2020). Este trabalho de KWIECEN et al. (2020) também compara com métodos de simulações métodos se a análise DIC condiz com o esperado.

Trabalhos como de QIAO et al. (2021) levantaram setups de DIC desde a instalação de equipamentos até a aquisição de dados e análise, interessante analisar a versatilidade dessa análise e como pode ser utilizado em vários cenários. Além de estrição e deformações mecânicas convencionais, ZHOU et al. (2021) trouxeram a aplicabilidade para análise de formação de fraturas, no caso deles para vigas de concreto.

FIGURA 15 – Comparativo de análise DIC com simulação CAE para os mesmos materiais. a) Como recebido do fornecedor em DIC e b) Como recebido do fornecedor CAE. c) Após recozimento em DIC e d) Após recozimento em CAE.



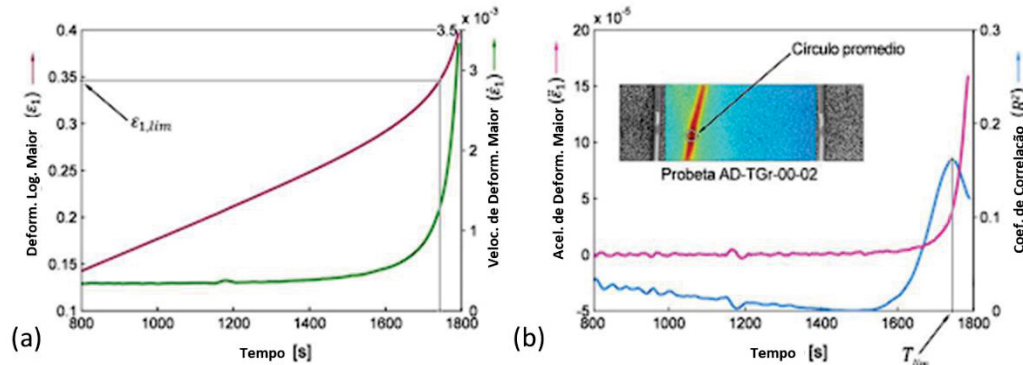
FONTE: Kwiecién et al. (2020).

LEONARD et al. (2018) explicaram no trabalho deles justamente como que a análise por correlação de imagem influenciou no aprimoramento do método dependente do tempo. O método dependente do tempo pode ser utilizado como um limitador de segurança para gerar a curva CLC. LEONARD et al. (2018) exploraram o método experimental com uma intenção de aprimorar e ampliar a utilização desse método.

O método consiste em analisar através de DIC, o início de deformações e consequentemente o início da estricção na chapa metálica. O gráfico a seguir (Figura 16, LEONARD et al; 2018) demonstra a partir de uma análise de deformação por tempo como é possível notar o momento em que se inicia uma deformação mais

abrupta que o normal. Dessa forma é possível correlacionar através de DIC, que levanta os dados de deformação em vários instantes e determinar o início da estricção.

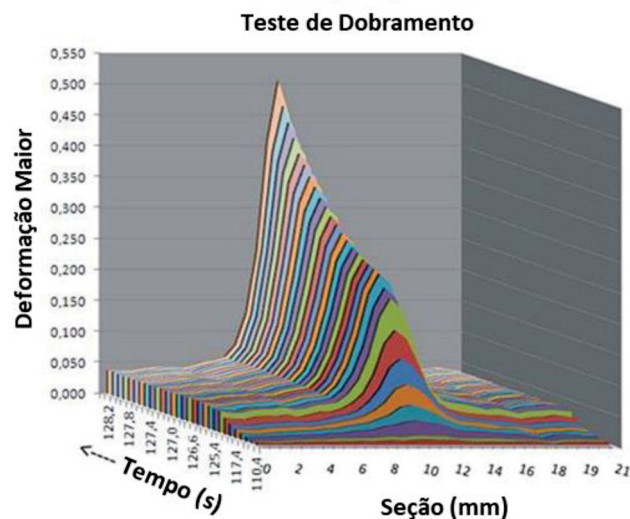
FIGURA 16 – Gráfico de evolução, a) da velocidade e b) da aceleração da deformação pelo tempo.



FONTE: Leonard et al. (2018).

O método temporal será explorado e aplicado em boa parte do procedimento experimental deste trabalho. MARTINEZ-DONAIRE et al. (2014) realizaram um grande estudo de validação utilizando deste método. O método consiste em avaliar e determinar o ponto de estricção e o início deste durante um ensaio padrão Nakazima ou Marciniak. A determinação do ponto é encontrar a região em que se concentra a maior deformação quando analisa-se uma seção da amostra como interpretado na Figura 17.

FIGURA 17 – Correlação de tempo, seção e deformação para determinação do ponto de estricção.

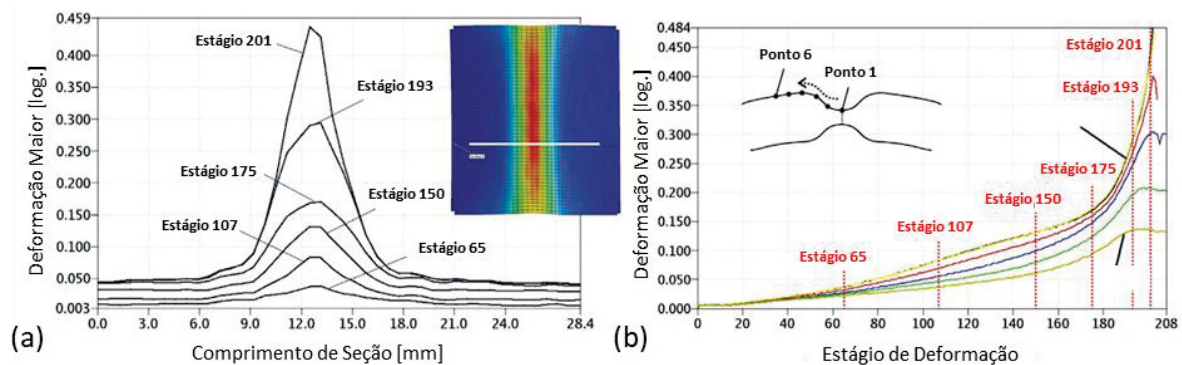


FONTE: Martinez-Donaire et al. (2014).

No trabalho de MARTINEZ-DONAIRE et al. (2014) e de demais autores também (LEONARD et al; 2018 por exemplo) discutiram-se que a melhor maneira para conseguir correlacionar dados de tempo, espaço e deformação nestes ensaios tradicionais de determinação de limite de conformação, é através de análise DIC.

Com uma captura de imagem periódica é possível acompanhar a amostra em diversos estágios e consequentemente observar as deformações nesta. A Figura 18 exemplifica como é possível, através de um acompanhamento de uma mesma seção de amostra durante um ensaio de deformação, observar o ponto de maior deformação na amostra e sua evolução por estágios, no caso de análise DIC, correspondente aos quadros (*frames*) ou instâncias durante a recordação de imagem.

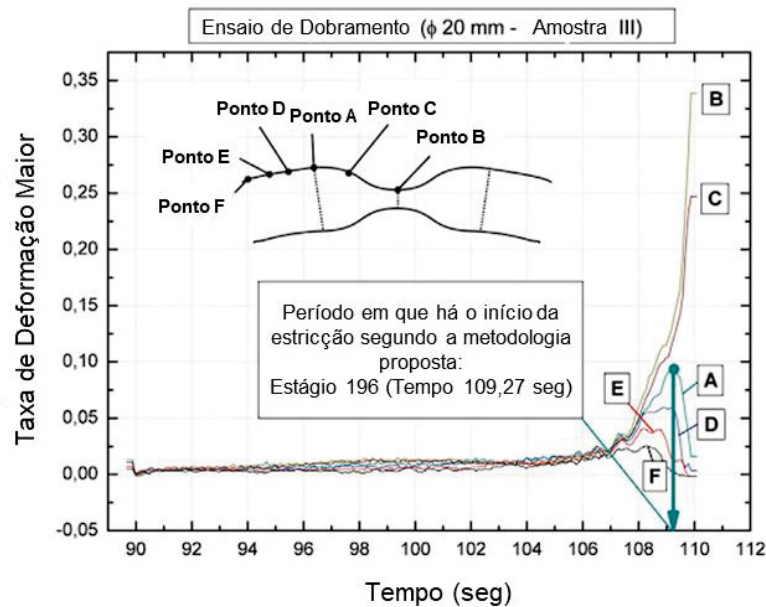
FIGURA 18 – Análise DIC de a) seção de amostra para encontrar ponto de maior deformação e b) evolução da região de estrição através de estágios de recordação da imagem.



FONTE: Martinez-Donaire et al. (2014).

MARTINEZ-DONAIRE et al. (2014) reforçaram que a análise do método temporal consiste em determinar o ponto de início de difusão da estrição e em seguida determinar o ponto de maior deformação, que seria correspondente ao centro da região de estrição, o centro do estrição (*necking*). Nesse ponto central, a deformação maior ϵ_1 no instante de início de estrição que será utilizada nesta nova CLC, formada a partir do método temporal. A Figura 19 ilustra que o ponto determinado como o início da estrição é determinado pelo valor mais alto da taxa de deformação do ponto A.

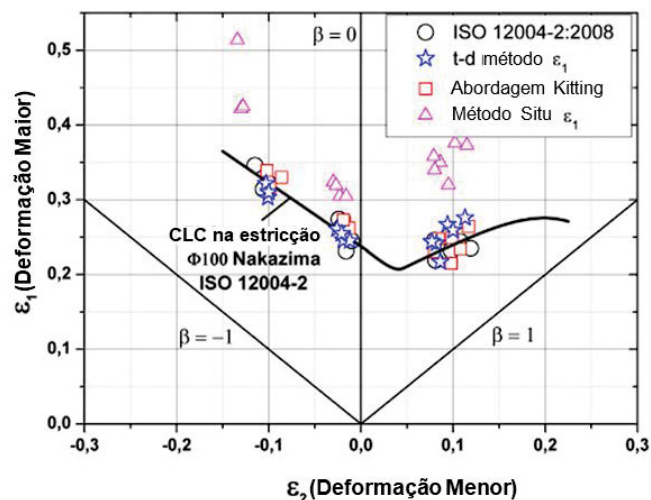
FIGURA 20 – Taxa de deformação maior em ensaio de dobramento, pontos de (A) até (F) escolhidos dentro e fora da região de estrição para determinação do estágio (*frame* do vídeo), correspondente ao ponto inicial da estrição.



FONTE: Martinez-Donaire et al. (2014).

Por fim os autores geraram novamente a CLC através desta correção do método temporal para justificar que é um método mais assertivo quando é analisado limites de conformação, visto que em cenários reais é desejável manter as características do material antes do ponto de estrição após a deformação. Na Figura 21 consta uma comparação entre CLCs convencionais e através do método temporal.

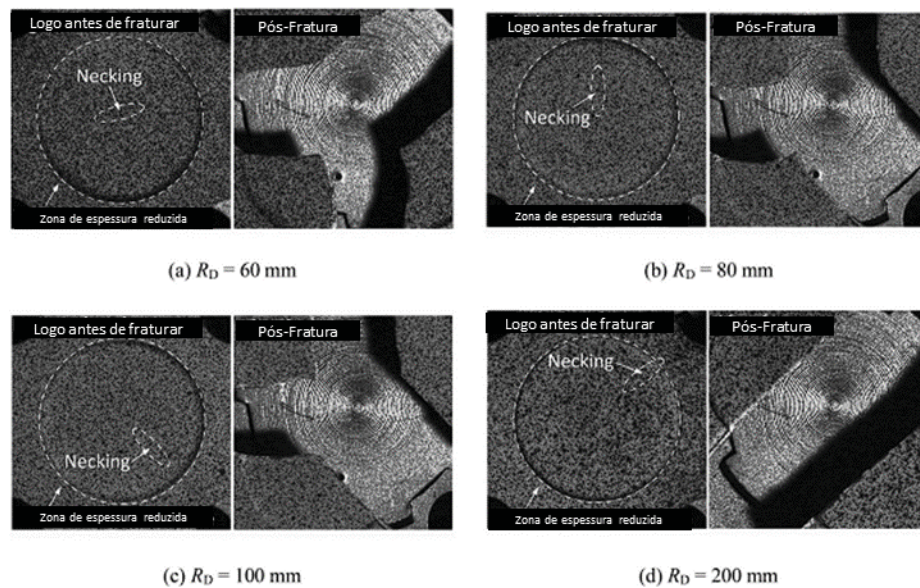
FIGURA 21 – CLC estabelecida pelo método temporal junto com dados obtidos da ISO 12004-2:2008, Abordagem Kitting e Método Situ.



FONTE: Martinez-Donaire et al. (2014).

ZHANG et al. (2021) ressaltaram como é possível utilizar do método temporal para validar um processo de determinação de conformabilidade do material. Em trabalhos anteriores, esses autores já tinham elaborado de novas formas seja de ferramental ou de amostra para servir como um método análogo aos tradicionais métodos, como Nakazima e Marciniak. Neste tema em específico de validação, ZHANG et al. (2021) utilizaram simulações em CAE e comparações numéricas para determinar se o modelo proposto por eles é de fato condizente aos tradicionais. O cálculo numérico envolvido acabou comparando deformação radial por espessura, que é uma forma de análise através do método temporal. E por fim utilizaram de imagens de DIC (Figura 22) para ver se o ponto de início de estricção do modelo proposto batia com o analisado em DIC no ensaio Nakazima tradicional.

FIGURA 22 – Análise metalográfica para detecção de estricção dos corpos de prova logo antes de fraturar e pós-fratura para raios de a) 60 mm b) 80 mm c) 100 mm d) 200 mm.

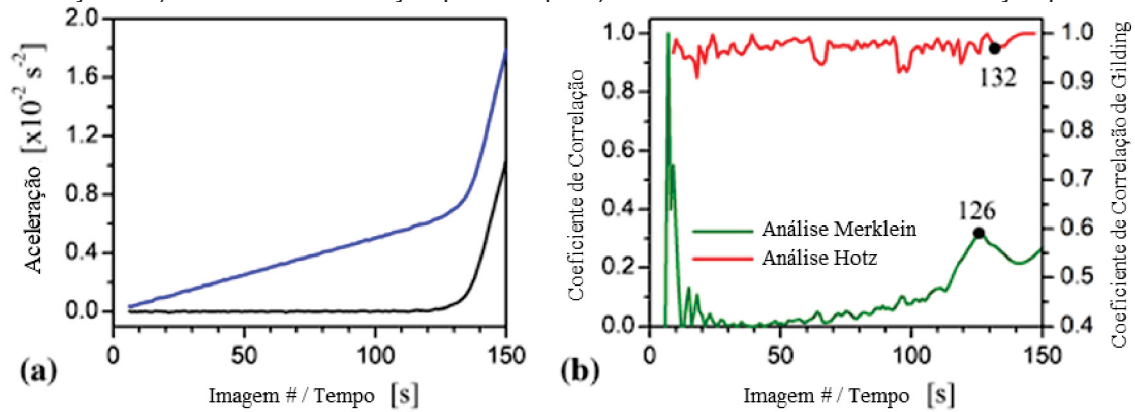


FONTE: Zhang et al. (2021).

ROATTA et al. (2019) avaliaram a análise de estricção, método temporal e análise DIC como ferramentas tão importantes para a conformação, que o trabalho deles remete a partir destas variáveis determinar o diagrama limite de conformação. Através da identificação da instabilidade perto da origem da estricção difusa, toda a análise dos ruídos de imagem através de DIC possibilita a correlação e a

determinação de curvas similares para gerar os gráficos de deformação e assim determinar a deformação limite (Figura 23, ROATTA et al; 2019).

FIGURA 23 – Análise Merklein e Análise Hotz para correlação entre ruído de imagem com deformações. a) Gráfico de aceleração pelo tempo b) Gráfico de coeficiente de correlação por tempo.



FONTE: Roatta et al. (2019).

Essa seção demonstra como uma análise através do DIC está sendo utilizada de forma ampla recentemente por diversos autores e como os resultados são cada vez mais assertivos e com menores necessidades empíricas. O método temporal também acaba sendo um método a ser explorado nos demais trabalhos de CLC explorados nessa sessão e com grandes potenciais. Utilizar dessas informações com metodologias mais recentes e aplicar nas variáveis do ferramental já conhecidas a partir dos discutidos anteriormente para verificar a influência é interessante para este estudo.

3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS E FERRAMENTAL UTILIZADOS

O primeiro material utilizado no trabalho foi o aço BH220 com 1,50 mm de espessura (propriedades conforme Tabela 1), para a primeira sessão de testes, cujo objetivo foi tornar o sistema DIC funcional para utilização em ensaios de estampagem. A partir dos resultados desses testes, com o aço BH220, tornou-se possível a calibração final do sistema para posterior realização de ensaios com aços avançados de alta resistência (AHSS).

TABELA 1 – Propriedades do aço BH220.

Propriedades BH220	
Limite de Escoamento (MPa)	210-270
Limite de Resistência (MPa)	320-400
Alongamento (%) 50 mm	34
Alongamento (%) 80 mm	32
n (Encruamento)	0,16

FONTE: ArcelorMittal (2023).

LEGENDA: Alongamento (%) 50 e 80 mm, porcentagem de alongamento de uma amostra até a fratura de L_0 de 50 e 80 mm, ISO 6892-1 type 2 (EN20X80) e ISO 6892-1 type 1 (ASTM 12.5X50) respectivamente.

Seguindo a linha de pesquisa de CHEMIN (2013) e OLIVEIRA (2022), cujo enfoque dos trabalhos foram os aços AHSS, selecionou-se o aço DP780 (propriedades conforme Tabela 2), com 0,95 mm de espessura para a realização da segunda fase de testes previstas nesse trabalho.

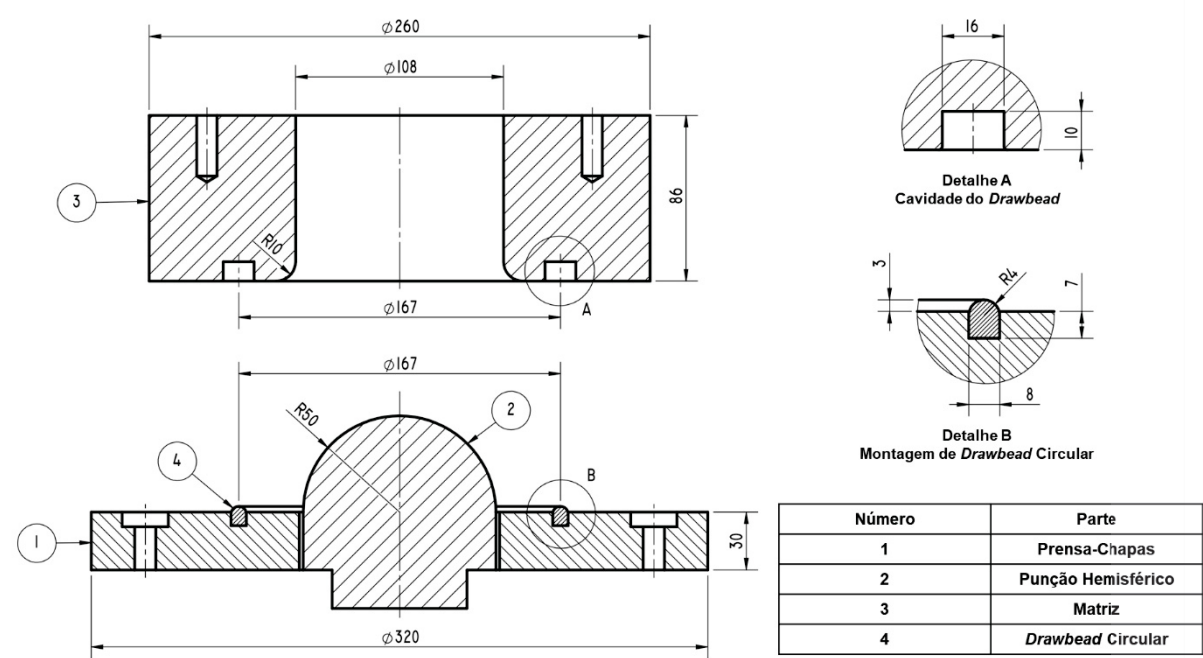
TABELA 2 – Propriedades do aço DP780.

Propriedades DP780	
Limite de Escoamento (MPa)	440-550
Limite de Resistência (MPa)	780-900
Alongamento (%) 50 mm	15
Alongamento (%) 80 mm	14
n (Encruamento)	0,11

FONTE: Gestamp Paraná (2023).
LEGENDA: Alongamento (%) 50 e 80 mm, porcentagem de alongamento de uma amostra até a fratura de L_0 de 50 e 80 mm, ISO 6892-1 type 2 (EN20X80) e ISO 6892-1 type 1 (ASTM 12.5X50) respectivamente.

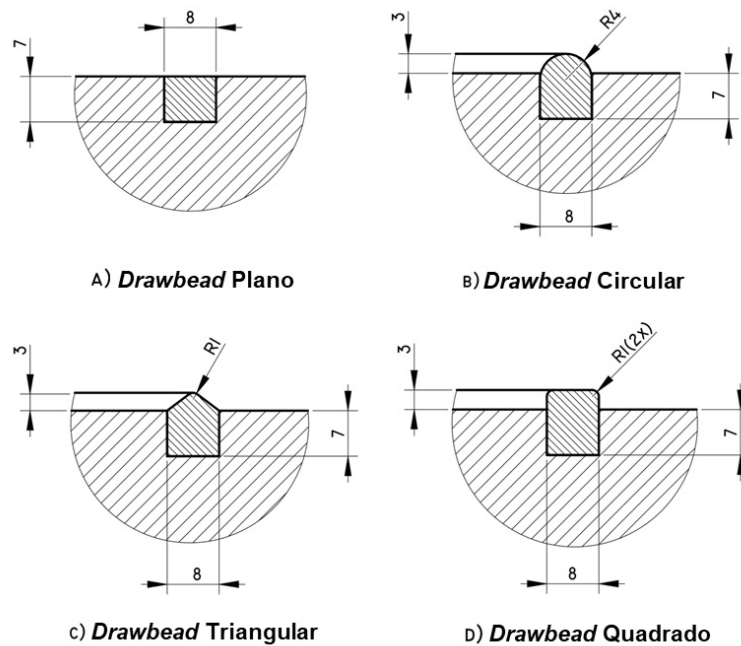
Para os ensaios de estampagem biaxial realizados, com ambos os materiais, foi utilizado o ferramental mostrado na Figura 24 (OLIVEIRA et al; 2022). Nota-se pela Figura 24, que se trata de uma ferramenta com punção hemisférico, com diâmetro de 100 mm, seguindo o padrão de ensaios Nakazima. A ferramenta apresenta também, inserto para a montagem de um *drawbead* intercambiável, permitindo, para os referidos testes, a possibilidade de escolha de quatro anéis com diferentes geometrias (Figura 25).

FIGURA 24 – Desenho técnico de equipamento de prensa hidráulica com punção hemisférico de raio de 50 mm seguindo padrão de ensaio Nakazima. Configuração com *drawbead* circular.



FONTE: Oliveira (2022).

FIGURA 25 – Anéis de diferentes geometrias de *drawbead* para o ferramental (dimensões em mm).
a) *Drawbead* plano (sem *drawbead*), b) *drawbead* circular, c) *drawbead* triangular e d) *drawbead* quadrado.



FONTE: Oliveira (2022).

De acordo com as geometrias apresentadas na Figura 25, no presente trabalho foram utilizadas somente as opções (A), com *drawbead* plano (superfície plana, sem o cordão) e (B), com *drawbead* de perfil circular, com raio de 4 mm e altura de 3 mm.

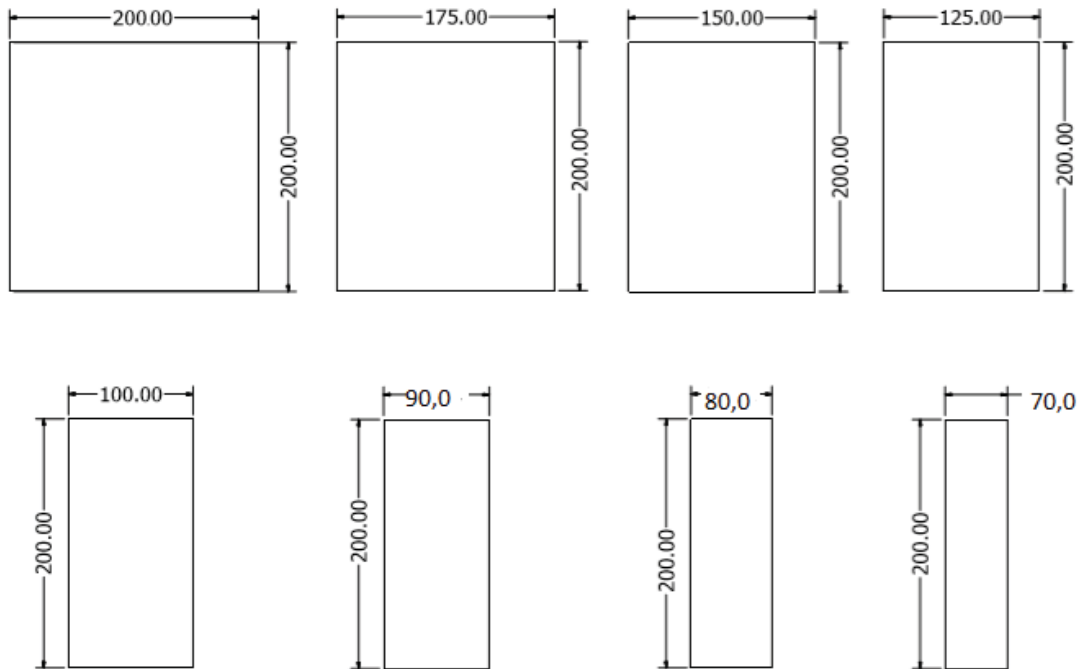
Para a captura das imagens dos ensaios, foi acoplada à ferramenta, uma câmera esportiva portátil (Figura 29), posicionada dentro da matriz e apontada numa direção perpendicular ao corpo de prova durante a conformação (Figura 38). Além da câmera, utilizou-se um sistema de iluminação interna (Figura 30) e lentes especiais (Figura 37) para um enquadramento e focalização adequados das imagens geradas. Todos os ensaios foram realizados no laboratório de conformação da Universidade Federal do Paraná. Não foi utilizado nenhum tipo de lubrificante nos ensaios.

3.2 ENSAIOS PARA DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DIC

Foram definidos corpos de prova com geometrias de 200 mm de comprimento e com oito dimensões diferentes de largura para a etapa de desenvolvimento do sistema DIC, realizada com o aço BH220. A Figura 26 mostra as dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios Nakazima. Todos os corpos de prova foram

devidamente cortados em guilhotina, e posteriormente feita a gravação de uma malha de círculos, por processo *silk screen*, em sua superfície para a medições das deformações. Deseja-se sempre que o comprimento da chapa esteja na direção de laminação.

FIGURA 26 – Dimensões de corpos de prova utilizados nos ensaios para o desenvolvimento do sistema DIC com o aço BH220. 8 CPs de 200x200 mm a 70x200 mm.



FONTE: Oliveira (2022).

Assim, realizou-se a sequência de ensaios mostrada na Tabela 3. Cada bateria de testes foi repetida sucessivamente, até que a funcionalidade e posterior calibragem do sistema DIC fossem conseguidos. Nesta etapa, além dos *drawbeads* plano e circular, foram utilizadas duas diferentes forças de prensa-chapas: 58 e 80 tf.

TABELA 3 – Configurações das baterias de ensaios realizados com o aço BH220, para o desenvolvimento do sistema DIC.

Material	Bateria de Ensaio	Dimensões dos Corpos de Prova (mm)	Força Prensa-Chapas (tf)	Utilização de <i>Drawbead</i>	Finalidade da Bateria de Ensaio
BH220	1ª Bateria	70 x 200	58	<i>Drawbead</i> Circular	Analisar proporção dos valores de deformação do DIC com os medidos nos corpos de prova
		80 x 200			
		90 x 200			
		100 x 200			
		125 x 200			
		150 x 200			
		175 x 200			
		200 x 200			
	2ª Bateria	70 x 200	80	Sem <i>Drawbead</i>	Avaliação da configuração com aumento de força de prensa-chapas e sem <i>drawbead</i> nos resultados de deformações e imagens para calibragem do sistema DIC
		80 x 200			
		90 x 200			
		100 x 200			
		125 x 200			
		150 x 200			
		175 x 200			
		200 x 200			
	3ª Bateria	70 x 200	80	<i>Drawbead</i> Circular	Determinar melhor região de deformação e força de estricção para o sistema DIC
		80 x 200			
		90 x 200			
		100 x 200			
		125 x 200			
		150 x 200			
		175 x 200			
		200 x 200			

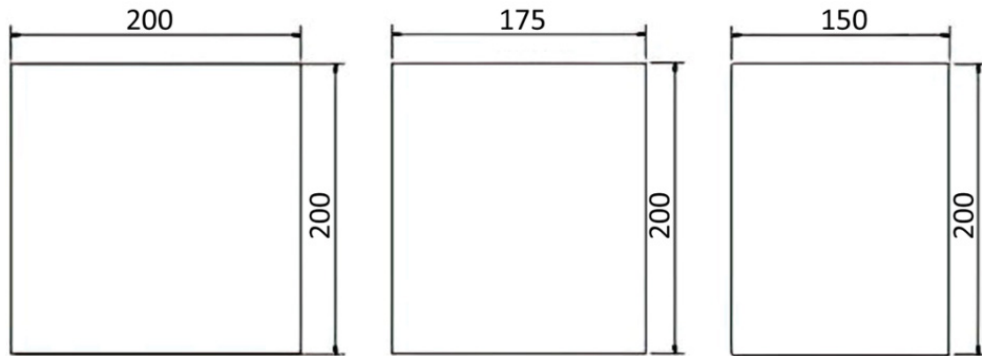
FONTE: O autor (2023).

3.3 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA CONFORMABILIDADE DO AÇO DP780 COM SISTEMA DIC

Com o sistema devidamente calibrado, foram realizados os ensaios com o aço DP780, seguindo a mesma configuração de ensaios da fase anterior de testes. Para esta etapa, foram observados resultados satisfatórios para os ensaios com DIC na região de estiramento da chapa, segundo os apontamentos bibliográficos obtidos.

Portanto, os testes com o aço DP780 foram limitados apenas às três dimensões de corpos de prova indicados na Figura 27.

FIGURA 27 – Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios para a avaliação da estampabilidade do aço DP780 com o sistema DIC. 3 CPs de 200x200 mm a 150x200 mm.



FONTE: Adaptado de Oliveira (2022).

Seguindo o desenvolvimento da pesquisa de LIMA (2017), para avaliação de início de estricção em aços AHSS, cujo início da estricção do aço DP600 foi atingido com 95% do valor da força máxima de ruptura da chapa, adotou-se no presente estudo o mesmo percentual limite de força para determinação do início da estricção do aço DP780.

Assim, foram realizados ensaios com o sistema DIC até o limite de ruptura do aço DP780, para determinação da força máxima de estampagem até a ruptura do material. A partir desses dados definiu-se a força de início de estricção das amostras, em 95% da força máxima, para sequência de testes com o sistema DIC até o limite de estricção. A Tabela 4 mostra a configuração de ensaios realizados com o DP780, nesta fase, limitados ao *drawbead* circular e força de prensa-chapas de 80 tf.

TABELA 4 – Configurações das baterias de ensaios realizados com o aço DP780, para avaliação da Curva Limite de Conformação e do limite de estrição de chapas AHSS com sistema DIC.

Material	Bateria de Ensaio	Dimensões dos Corpos de Prova (mm)	Força Prensa-Chapas (tf)	Utilização de <i>Drawbead</i>	Finalidade da Bateria de Ensaio
DP780	Bateria DP780	150 x 200	80	<i>Drawbead</i> Circular	Levantamento da CLC na fratura, em região de estrição (DIC) e com 95% da pressão de fratura
		175 x 200			
		200 x 200			

FONTE: O autor (2023).

4 DESENVOLVIMENTO DO DIC

A dissertação tem como premissa estabelecer uma metodologia que contemple a utilização do DIC para encontrar o ponto de estricção durante ensaio Nakazima e utilizar como correção da CLC. E para essa metodologia cabe a utilização de softwares *Open Source* e equipamentos convencionais de captura de imagem possibilitando executá-la em laboratórios comuns. Vários dos ensaios testes e análises dos dados DIC terão como objetivo a calibragem e o refinamento da metodologia.

4.1 ANÁLISE ATRAVÉS DE CORRELAÇÃO DE IMAGEM

Captação de imagens durante o embutimento das chapas no ensaio Nakazima, foi necessária a utilização de uma câmera de alta resolução com sistema especial de lentes adicionadas, posicionada dentro da matriz, para obtenção das imagens de forma perpendicular à região de deformação das chapas, em níveis de resolução suficientes para posterior análise.

Esta etapa consistiu em trazer os vídeos gravados dos ensaios para análise computacional de correlação de imagem. Assim como foi abordado na revisão bibliográfica, muitos autores utilizaram de softwares específicos para a análise de DIC, e existem atualmente softwares *Open Source* que não dependeriam de licença ou algum outro tipo de intermédio para poderem ser utilizados para os resultados deste trabalho. Nesta etapa do trabalho dimensões dos CP não foram fatores cruciais para entendimento do software.

Utilizou-se o método temporal para determinação do início da difusão da estricção, através de softwares de tratamento de imagem e de correlação de imagem (DIC). A partir do quais fez-se a exportação dos dados de deformação e a plotagem do gráfico de deformação por tempo que, por sua vez, pôde ser determinado através do próprio tempo de gravação do vídeo.

Para cada amostra foi necessário quantificar a deformação máxima e o ponto de início de difusão da estricção e, com estes dados, determinar a força correspondente de estampagem. A prensa hidráulica utilizada para o trabalho possui um registro e controle CLP que consegue registrar o ensaio com dados de avanço do punção e força por período como apontados no trabalho de CHEMIN (2013), e LIMA

(2017). Assim estabeleceu-se uma correlação do ponto de estricção com a pressão (força) registrada na máquina.

4.1.1 Correlação do DIC com o ponto de estricção

As deformações das amostras que compuseram o eixo de deformação dos resultados foram oriundas da análise DIC. Através do distanciamento do padrão original que foi demarcado na amostra, o software permitiu analisar a imagem gradativamente, e assim representar o grau de deformação da chapa a partir do distanciamento deste padrão inicial. Com esses dados e a base de informações da revisão bibliográfica, tornou-se possível neste trabalho a determinação do ponto de início de difusão da estricção na chapa.

Por fim, um dos objetivos de resultado e discussão é realizar novamente o ensaio tradicional que resulta na CLC, porém dessa vez parando a máquina na pressão que for determinada anteriormente como o início de estricção do material pelo DIC. Essa nova CLC irá apresentar novos dados de deformação por serem obtidos pré-ruptura, com a máquina sendo interrompida durante o ensaio ao chegar no ponto de estricção. Tendo novos resultados e uma CLC com possíveis melhorias em representatividade em termos de conformabilidade com aquele fornecido pelo fornecedor do material ou convencionalmente conhecido.

O Aço Avançado de Alta Resistência escolhido para análise final foi o DP780, os aços DP já possuem resultados conhecidos nos trabalhos de CHEMIN (2013), LIMA (2017), OLIVEIRA (2022) e CRUZ et al. (2023). O aço foi escolhido devido a sua alta resistência, e sua menor faixa de região elástica poderá acarretar significativas conclusões para o trabalho.

4.2 SOFTWARE DIC

Para a realização da análise por correlação de imagem, é necessária uma ferramenta que possibilite realizar uma comparação. No caso do DIC, compara-se diferentes imagens tomando uma como referência e mostrando as diferenças entre essas. No caso de estudos de materiais com análise DIC, essas diferenças são interpretadas como deformações, visto que não há movimento relativo entre o dispositivo que adquire as imagens (câmera) do material.

Nos estudos citados na referência bibliográfica e para este trabalho, as imagens para análise são retiradas de uma gravação de vídeo. Como um vídeo é uma união de quadros de imagens, é possível separar estes quadros em intervalos de tempos iguais e desta forma determinar a variável tempo para este intervalo e realizar a comparativa para cada quadro respectivo. O selecionado para esse trabalho foram trechos de gravações de 5 segundos seccionados em 10 quadros por segundo obtendo 50 quadros por trecho, para um intervalo de quadros de 0,1 segundo. É importante a variável tempo ser bem definida para realizar a análise dos resultados e a plotagem dos gráficos.

Outro aspecto fundamental para análise DIC é a composição de imagem. As imagens digitais, que são as imagens mais comumente utilizadas na atualidade é um aglomerado de pixels, cada um com forma quadrada e unicolor. A quantidade de pixels de uma imagem determina a sua resolução e quanto maior a resolução, mais detalhada a imagem. É possível determinar a posição de cada pixel em uma imagem, em coordenadas de X e Y para uma imagem em 2D. A análise DIC consiste em comparar pixels, ou pequenos aglomerados de pixels por coordenada e verificar se houve mudança em sua representação (em sua cor). Portanto para auxiliar na facilidade de análise DIC, é preferível imagens com um alto nível de contraste possibilitando assim uma fácil identificação de diferença entre pixels.

A ferramenta que acaba interpretando as diferenças entre as imagens e relatando é o software DIC. Os softwares podem ser programados em diversas linguagens de programação, em escala comercial estes softwares são utilizados internamente pela empresa que detém os direitos ou fornecido sob licenciamento. Um dos objetivos deste trabalho é utilizar de softwares DIC Open Source, podendo assim ser utilizado de forma livre sem correr o risco de ferir direitos autorais.

Através da bibliografia, sabe-se que os principais e mais utilizados softwares DIC são licenciados, e a maioria dos *Open Source* são muitas vezes oriundos de trabalhos de pesquisa sem muitas etapas de validação. Este trabalho julgou necessário averiguar alguns softwares disponíveis e verificar se atende às necessidades de análise.

Para definir o procedimento experimental deste trabalho, foi necessário determinar qual seria o software de análise de imagem antes de entrar na etapa de realização dos ensaios e discussão de resultados. Os softwares comerciais acabam tendo etapas de validações muito mais rigorosas para que sejam utilizados por

empresas, dessa forma entende-se que para o cenário de análise de imagem, são mais assertivos e renomados dos que os *Open Source*. Desta forma, para este trabalho observou-se necessário a conferência e análise dos resultados obtidos pelos softwares testados, levando em conta também a factibilidade e a confiabilidade dos dados no momento de discutir os resultados.

Visto que o sistema operacional mais usualmente utilizado em computadores é o sistema operacional Windows (Microsoft), determinou-se a busca para softwares criados para este sistema. O sistema operacional utilizado pela universidade e no laboratório de conformação da UFPR também é o mesmo. Com isso, os Softwares escolhidos também tiveram o critério de linguagem de programação em que foram programados, mais uma vez levando em conta a popularidade da linguagem de programação, possibilitando eventuais manuseios no código e para trabalhos futuros.

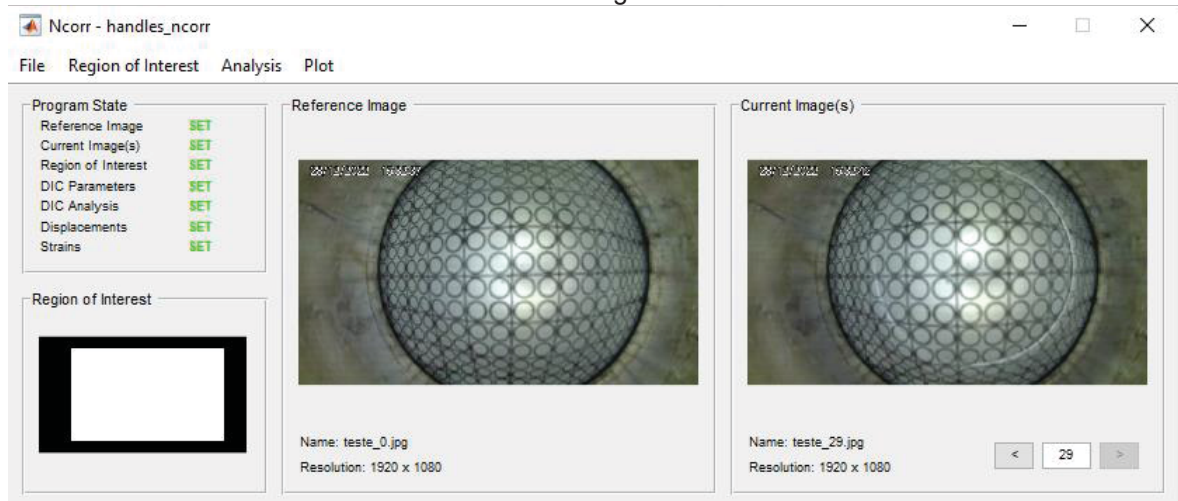
Primeiramente foram utilizados softwares programados em Python, sendo esta linguagem de fácil utilização e totalmente gratuita. Um dos trabalhos da revisão bibliográfica BELLONI et al. (2019) mostrou etapas de validação de um software *Open Source* programado em Python. Neste trabalho há também um comparativo de demais softwares DICs para validação do novo proposto. De qualquer forma, ao tentar replicar os resultados do trabalho ou utilizar dos exemplos pré-existentes, não houve sucesso.

Finalmente, o software Ncorr foi testado para análise de viabilidade de utilização para o trabalho. O software Ncorr também foi utilizado como um dos critérios de validação no trabalho do mesmo trabalho de BELLONI et al. (2019) como referência de software DIC por ser mais renomado e ter um número razoável de citações em outros trabalhos. Para este trabalho, a intenção inicial não era de utilizar programas MATLAB para execução devido à sua necessidade de licença para operação, porém como a UFPR disponibiliza de software MATLAB e existem licenças estudantis temporárias, tornou-se uma opção viável. O software Ncorr apresenta um alto nível de intuitividade e interface amigável de operação, contendo um site, tutoriais em plataforma como Youtube e um manual de utilização ao usuário (BLABER e ANTONIOU, 2017).

A instalação do software Ncorr se dá dentro do próprio site, tendo o código disponível para download já em formato MATLAB. Assim que a pasta de arquivos é aberta pelo MATLAB, e seguindo as instruções iniciais do manual de usuário, é possível executar o programa. O software apresenta uma janela de execução bem direta (Figura 28) e que faz com que o usuário siga de forma linear o processo de

análise DIC. Para realizar a análise é necessário somente ter as imagens previamente salvas e renomeadas de acordo, sendo uma delas a referência. É possível também definir a região de interesse de análise (ROI) através de uma imagem, ou desenhando-a.

FIGURA 28 – Interface de usuário Ncorr contemplando as informações de dados de entrada necessários para análise DIC, mostrando também a região de interesse determinada, a imagem referencial e a imagem analisada.



FONTE: O autor (2023).

Todos os resultados apresentados neste trabalho oriundos de análise DIC serão extraídas do software Ncorr, tais como mapas de deformação para as figuras e valores de deformação DIC.

4.3 PREPARAÇÃO PARA GRAVAÇÃO DE IMAGEM

A aquisição de imagem para análise DIC pode ser feita de diversas maneiras, no trabalho de AFFRONTI e MERKLEIN (2017) na Figura 3 tem um exemplo de captura que utiliza de duas câmeras para aquisição de imagem. Nos trabalhos revisados também é destacado a importância de uma imagem de boa qualidade principalmente em termos de contraste e que tenha uma boa resolução também. Em cenário comercial, utiliza-se câmeras de alta qualidade. Para ensaios biaxiais como o embutimento a utilização de duas ou mais câmeras é comum, para que a junção de imagem evite qualquer distorção oriunda da profundidade da imagem.

No cenário acadêmico estudado para a implementação utilizando do maquinário do Laboratório de Conformação da UFPR, a aquisição de imagem é

melhor e mais factível com o uso de somente uma câmera, visto que não há passagem na parte de cima da prensa. Para isso, a alternativa foi utilizar uma câmera que coubesse dentro do diâmetro interno da prensa. As câmeras convencionais evoluíram bastante nos últimos anos, câmeras de celulares por exemplo já conseguem capturar imagem em qualidade suficiente para uma pós análise dentro do software DIC.

Todavia, seguindo a ideia original de capturar imagem de dentro da prensa, devido a uma restrição de tamanho não é possível utilizar celulares para captura. Para solucionar esse empecilho, uma câmera portátil comumente utilizada em esportes de forma versátil foi adquirida para realizar a captura de imagens.

A câmera ilustrada na Figura 29 consegue se comunicar através de um aplicativo proprietário da marca para o celular por Wi-Fi, desta forma é possível iniciar a gravação mesmo com a câmera estando dentro da prensa. Posteriormente esta imagem era extraída ou através do cartão de memória ou através de download pelo aplicativo. Uma vez que se tem um vídeo de ensaio que se deseja extrair as imagens para análise DIC, o trecho em que houve a ruptura era selecionado e em seguida os momentos antes e depois eram cortados encurtando o vídeo. Em seguida o vídeo encurtado era trabalhado em aplicativos que convertem vídeos em imagens, determinando o número de quadros por segundo.

FIGURA 29 – Câmera modelo esportiva portátil utilizada dentro da prensa hidráulica para captura de imagens e posterior análise DIC.



FONTE: O autor (2023).

Os trechos das gravações eram separados e salvos em imagens por pastas de ensaio.

4.3.1 Fixação, iluminação e câmera

Para que fosse possível o acoplamento da câmera dentro da prensa hidráulica, foi necessária uma forma de fixação para que mantivesse a posição durante o ensaio. Não havia maneira de apoiar ou amarrar visto que a câmera precisaria ficar virada para a amostra e acoplada contra a gravidade. Outro fator importante a ser levantado para captura da imagem é a iluminação, visto que uma vez que a prensa se fecha para realização do ensaio, não há entrada da luz e consequentemente se a câmera não dispõe de uma fonte de luz, a imagem acaba ficando escura e péssima para análise no computador.

FIGURA 30 – Anel de luz, imã e câmera compondo o módulo de fixação e iluminação necessários para acoplar à prensa hidráulica.



FONTE: O autor (2023).

Para solucionar este problema, um módulo foi estudado contendo a câmera, um tipo de suporte e uma fonte de luz. Para a fonte de luz foi utilizado um anel de luz, comumente utilizado para filmagens com celular como uma fonte extra de luz, o anel de luz possui um diâmetro menor quando comparado ao diâmetro interno da prensa. E o item utilizado para fixação foi um imã, visto que todo o interior da prensa é de material metálico e magnético, a força do imã acaba sendo o suficiente para manter a câmera presa durante todo o processo de filmagem. Dessa forma, o módulo foi composto destes três itens: a câmera, o anel de luz e o imã (Figura 30), sendo os três fixados entre si através de fita adesiva comum.

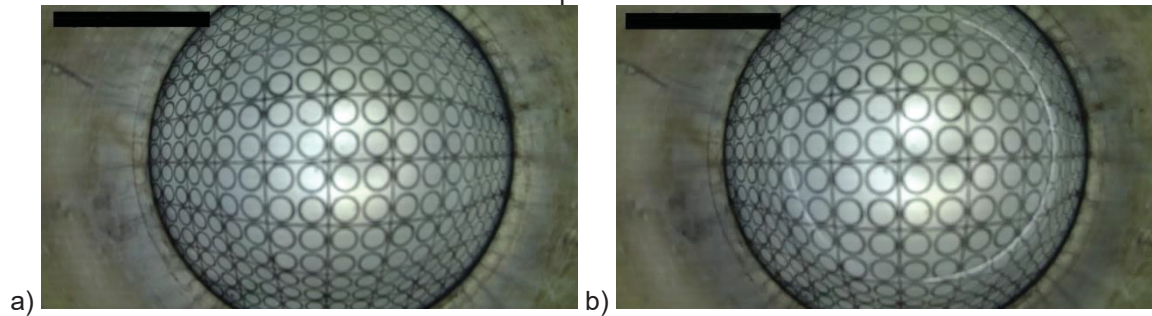
4.4 VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

As primeiras utilizações do software Ncorr foram voltadas à análise do software em si com imagens de demonstração vindas do próprio programa. Apesar de ser uma análise importante para aprender a manusear e verificar acessibilidade e funcionamento da ferramenta, entende-se que essas imagens de demonstração são menos suscetíveis de apresentar erros ou dificuldades, somente para demonstrar o aplicativo. Para garantir que o Ncorr cumpriria todas as necessidades do trabalho, o esperado era que este apresentasse bons resultados com as imagens obtidas pela metodologia estabelecida pelo trabalho com a mesma qualidade das imagens de demonstração. O material utilizado nessa etapa de desenvolvimento de DIC eram chapas amostrais disponíveis no laboratório.

Com o módulo de câmera, fixação e iluminação pronto, esta primeira filmagem foi levada para análise. A ideia era verificar majoritariamente o mapa de deformação e se era possível discernir os pixels da imagem tendo bom foco e contraste. Para estes primeiros testes, não foi ligado o sistema de manômetro da prensa, ou seja, não houve registro de pressão durante o ensaio, as análises ficaram somente com base na imagem.

A primeira gravação apresentou um enquadramento bom, porém não totalmente satisfatório, a falta de espaço entre amostra e câmera dificulta o enquadramento completo da amostra, como representado na Figura 31.a. Somente durante a etapa de calibragem que parâmetros do corpo de prova como material, dimensão e marcação são levados em conta para análise. Isso também aponta mais um problema de análise, a região de ruptura fica muito nas extremidades da imagem, e de acordo com o manual do software (BLABER e ANTONIOU, 2017), é preferível que não fique nas bordas para melhor interpretação do software.

FIGURA 31 – Imagens capturadas pelo módulo da câmera no interior da prensa hidráulica. a) Enquadramento do ensaio durante a estampagem. b) Enquadramento de ensaio no momento da ruptura.



FONTE: O autor (2023).

Em seguida este vídeo foi separado em quadros, neste caso em específico em 30 quadros num intervalo de 6 segundos, para uma taxa de 5 quadros por segundo. Os quadros foram inseridos no programa Ncorr, para isso (e para todas as análises seguintes) é necessário renomear os arquivos de imagem com o mesmo prefixo separando item a item pelo número (Exemplo: teste_1, teste_2, etc.) em arquivos .tif; .png ou .jpg.

Este primeiro teste foi uma boa familiarização com a utilização dos recursos do aplicativo DIC, um dos recursos permite o desenho da área de análise e o formato desejado para a área de interesse. Foram testados dois formatos, buscando qual deles refletiria o melhor gráfico de deformação, uma elipse e uma retangular. Após analisar ambas as geometrias, não houve nenhuma diferença significativa e as ROI de geometria de elipse foram as utilizadas para os demais ensaios.

Inseriu-se todos os dados necessários para análise, majoritariamente as imagens e estabelecer os parâmetros oferecidos pelo software. Assim que a análise foi concluída, foi permitido observar os deslocamentos e as deformações identificadas. Estes dados são apresentados de forma ilustrativa para cada etapa da imagem 2D em coordenadas X e Y, é determinada uma coordenada para cada um dos quadros sendo analisados. Para cada coordenada o Ncorr retorna um valor de deslocamento em X e Y, determinados de U e V respectivamente. Além de também retornar valores de deformações E_{xx} , E_{xy} e E_{yy} que são as deformações Green-Lagrangianas (utilizadas neste trabalho) ou Eulerianas-Almansi (BLABER e ANTONIOU, 2017), para cada uma destas coordenadas também. Para o trabalho essas deformações serão convertidas para deformações verdadeiras segundo a Eq. (1) e Eq. (2) adaptada de YANG et al. (2010):

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \ln(E_{xx} + 1) \quad (1)$$

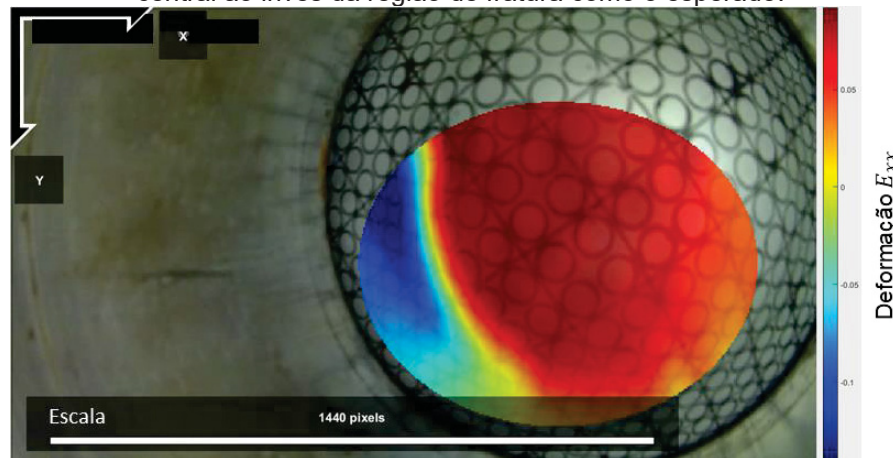
$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \ln(E_{yy} + 1) \quad (2)$$

Considerando estado plano de tensão, e utilizando destes dados para comparações visto que não está sendo calculado a distorção angular. Para este caso supondo que E_{xx} está no eixo de maior deformação, pode ser o oposto dependendo do posicionamento da fratura, cabe a análise para cada caso.

Em resumo Ncorr registra um total de 5 valores para cada coordenada de imagem para cada quadro. Estes dados são registrados em arquivo. mat, em tabelas de valores, em tabelas de dados. Este trabalho realizará as análises com estas tabelas de dados migrando-os para Excel.

O mapa de deformação resultante deste primeiro teste não foi satisfatório. Como visto na Figura 32, o mapa refletiu a maior parte da deformação na região central (vendo dados de E_{xx} ou E_{yy}), isto não é o esperado pela bibliografia (Figura 15). Após analisar este mapa verificando a eficácia do software, avaliou-se que o fato do mapa de deformação estar diferente do esperado não é um erro de análise total. Uma análise DIC analisa as deformações através do distanciamento de pixels quando comparado a uma imagem referencial, portanto analisando desta forma o Ncorr não errou pois de fato o centro alargou-se durante o ensaio. Isso pode ser facilmente evidenciado pelo comparativo das imagens 31.a e 31.b. Portanto a conclusão é de que o software realizou uma análise boa da imagem, porém a imagem não estava em uma qualidade boa o suficiente para isso.

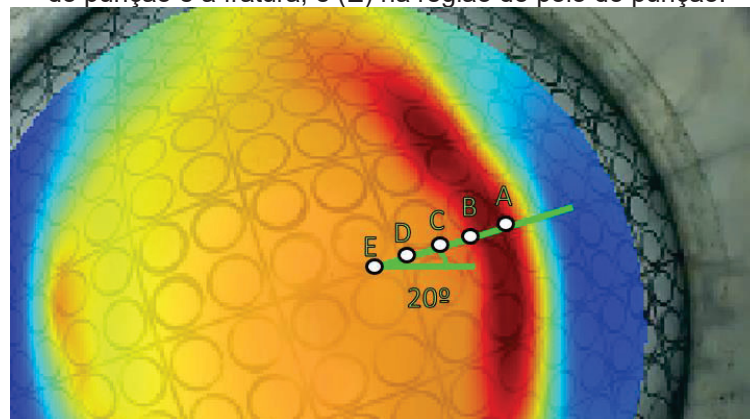
FIGURA 32 – Resultado do mapa de deformação do software Ncorr com escala de deformação Green-Lagrangiana na direção x (E_{xx}), não satisfatório devido à máxima deformação estar na região central ao invés da região de fratura como o esperado.



FONTE: O autor (2023)

Para trabalhar com os dados do Ncorr e poder replicar o método temporal de análise de início de início da ruptura DIC, foi estabelecido pontos na região da trinca perpendiculares à sua formação como mostra na Figura 33. Esses pontos replicam as análises feitas na Figura 16, com um ponto na formação da fratura, sendo a região de máxima deformação. E os demais pontos que irão a partir da evolução da trinca apontar através da taxa de deformação o início da região da difusão da estricção. Esses pontos são (A), (B), (C), (D) e (E), e toda a análise em X e Y deve ser decomposta a partir de sua orientação, na Figura 33 está em 20°, porém nas demais análises do trabalho os eixos foram alinhados para facilitar a análise.

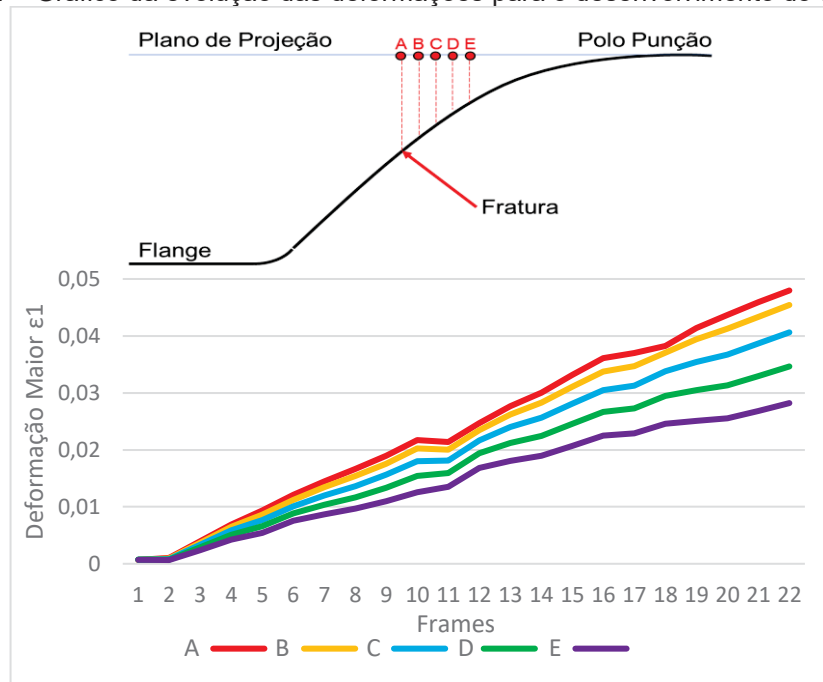
FIGURA 33 – Determinação dos pontos, projetados sobre a imagem do perfil deformado da chapa, para análise da evolução de estricção: (A) no local da trinca, (B), (C), (D) intermediários entre o polo do punção e a fratura, e (E) na região do polo do punção.



FONTE: O autor (2023). NOTA: Para este caso, a linha perpendicular à fratura estava 20° em relação ao eixo X, para as demais análises ajustou-se o corpo de prova para que não fosse necessário decompor as deformações. LEGENDA: (A) é o ponto de máxima deformação da fratura, e os pontos subsequentes (B), (C), (D) e (E) são perpendiculares à fratura e equidistantes entre si.

Com esses pontos de (A) a (E) tendo suas respectivas coordenadas traduzidas pelo software, é possível acompanhar cada ponto em cada etapa definida pela análise. Ao plotar a evolução das deformações desses pontos pelos quadros, consequentemente pelo tempo, temos a Figura 34.

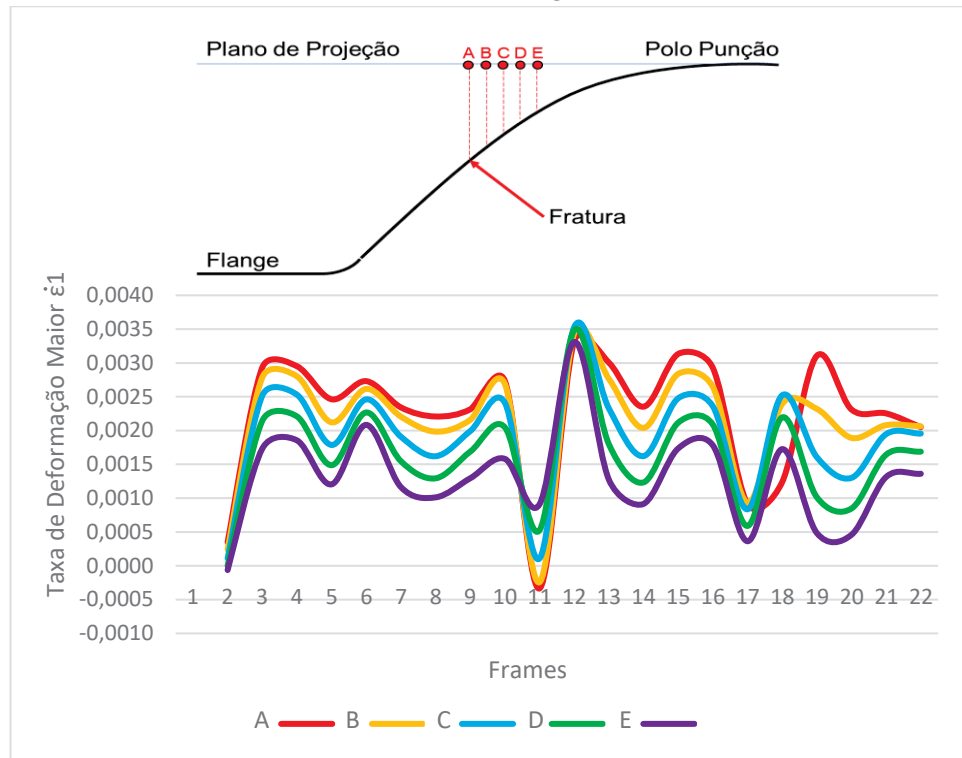
FIGURA 34 – Gráfico da evolução das deformações para o desenvolvimento do software DIC.



FONTE: O autor (2023). LEGENDA: Ao longo do perfil estampado da chapa: (A) no local da fratura, (B), (C), (D) intermediários entre o polo do punção e a fratura, e (E) na região do polo do punção, são pontos equidistantes entre si.

E, portanto, para finalizar a análise de estricção pelo método temporal, é necessário analisar a taxa de deformação desses mesmos pontos, assim será possível identificar as fases de estricção difusa e estricção localizada. O gráfico da Figura 35 é uma plotagem da taxa de deformação, porém ainda de má interpretação pois representa o primeiro ensaio teste que ainda está calibrando o sistema DIC.

FIGURA 35 – Gráfico da taxa de deformação durante a estampagem, para o desenvolvimento do software DIC.



FONTE: O autor (2023). NOTA: Este gráfico não tem dados representativos por ser muito diferente do esperado pela literatura, consequência da captura de imagem sem ajuste. LEGENDA: Ao longo do perfil estampado da chapa: (A) no local da fratura, (B), (C), (D) intermediários entre o polo do punção e a fratura, e (E) na região do polo do punção, são pontos equidistantes entre si.

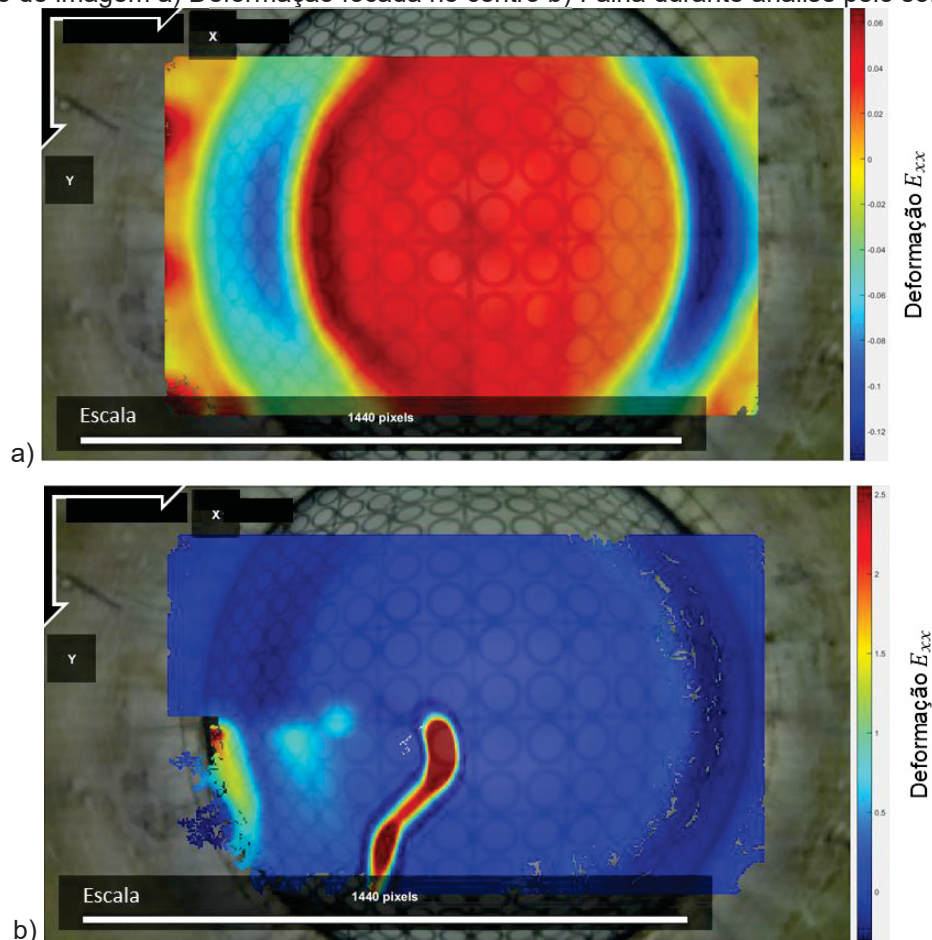
Mais testes foram realizados com o mesmo módulo para verificar se houve uma grande diferença nos resultados. Os mesmos problemas foram encontrados como dificuldade de enquadramento, desfoque na imagem etc., desta forma foi verificada a necessidade de alterar parte da metodologia para garantir resultados mais semelhantes aos esperados pela literatura.

4.4.1 Ajuste de imagem

Entende-se que o software averiguou e avaliou o mapa de deformação através do que as imagens estavam informando. É possível notar que após a análise, o software apontou que o centro da amostra é a região que apresenta maiores níveis de deformação (Figura 36.a). Com base na bibliografia e até mesmo na ruptura observada na amostra após o ensaio, não era esperado que a maior região de deformação fosse na região central de amostra. Esperava-se algo similar ao visto na

Figura 15 de KWIECEN et al. (2020), com a região de maior deformação coincidindo onde há a ruptura.

FIGURA 36 – Exemplos de mapas de deformação de análise DIC representados pelo software sem ajuste de imagem a) Deformação focada no centro b) Falha durante análise pelo software.



FONTE: O autor (2023).

Entretanto, analisando os resultados obtidos pelo software dado as circunstâncias, essa divergência não foi considerada um erro de análise do software na região de deformação. Uma vez que quando são analisadas as imagens obtidas nos testes, é notório a expansão da região central durante a gravação. Este fator é devido às condições de filmagem. Ao analisar as imagens das Figuras 31.a e 31.b ambas do mesmo ensaio, porém num intervalo de poucos segundos, sabe-se que o aumento da região central não é somente expansão do material da amostra e sim também a aproximação da amostra à câmera. Com a subida do punção, a amostra se aproxima da câmera dando este efeito de profundidade, que para uma análise puramente em duas dimensões como é o entendido para análise DIC, não é desejado.

Esta mudança na profundidade também pode ocasionar um desfoque da câmera na amostra, piorando as condições de qualidade de imagem como é percebido também na Figura 31. É importante ressaltar que diversos equipamentos de captura de imagem para análise DIC se dão com mais câmeras (Figura 3) ou de outros artifícios que eliminem ou amenizem este efeito de profundidade. O enquadramento incompleto da imagem também tinha como consequência a falha de análise DIC como visto na Figura 36.b.

Portanto, visto que a deformação no centro da amostra apontada pelo software foi majoritariamente oriunda de efeitos físicos durante a obtenção de imagem, não pôde ser interpretado como falha de software. Eliminando este aspecto e analisando os resultados obtidos para estes testes, é condizente apontar que o Ncorr apresentou um resultado satisfatório para análise de imagem para atender os objetivos deste trabalho.

Verificou-se que apesar do Ncorr estar avaliando as imagens capturadas como o previsto, não estava refletindo as reais condições ou deformações que ocorriam nas amostras. Para determinar finalmente a metodologia de ensaio, foi necessário trabalhar em possíveis ajustes nas imagens adquiridas o máximo para que essas divergências de resultados de análise do software com os dados reais fossem as menores possíveis.

A profundidade teve um efeito na divergência nos resultados obtidos durante o teste. Este efeito estava sendo agravado principalmente por dois principais fatores óticos que são consequência da metodologia empregada no ferramental disponível. Um fator importante é a distância entre a amostra e a câmera, devido à limitação de espaço dentro da câmara da prensa essa distância acaba sendo muito curta. Consequentemente com o avanço do punção a amostra se aproxima ainda mais da câmera e o software acabava entendendo como uma deformação excessiva, pois a imagem aumentava muito de tamanho ao decorrer do ensaio. Este aumento trata-se da quantidade de pixels que a imagem acabava ocupando no decorrer do ensaio quando comparado ao referencial original (Figura 31).

Um outro fator que acabou apresentando divergência nos resultados foi a angulação da câmera. A câmera utilizada já tinha uma abertura de lente grande (por ser utilizada amplamente durante esportes) quando comparada a câmeras convencionais, porém ainda ficou difícil capturar toda a deformação da amostra mantendo o foco. Note como a imagem se desfocou no percorrer da gravação e como

era difícil centralizar a amostra no centro e consequentemente isso atrapalha e dificulta a análise pelo software DIC.

Visto que os dois fatores prejudiciais de imagem eram devidos à limitação de espaço físico entre a câmera e a chapa a ser conformada, métodos para amenizar estes efeitos foram investigados. Uma das abordagens mais diretas seria de aumentar efetivamente essa distância, anexando peças à prensa para que a altura fosse maior. Uma outra abordagem seria alterar características da câmera. Sabe-se que câmeras que possuem uma maior abertura de lente conseguem absorver mais luz e consequentemente maior área de visão para uma mesma distância quando comparado a ângulos convencionais. Porém esse ângulo de visão maior muitas vezes não é desejado pois é traduzido na imagem como deformação da imagem, em suas dimensões e proporções.

FIGURA 37 – Lente adicional *superwide* utilizada para aumentar o ângulo de imagem e diminuir o efeito de profundidade nas gravações.



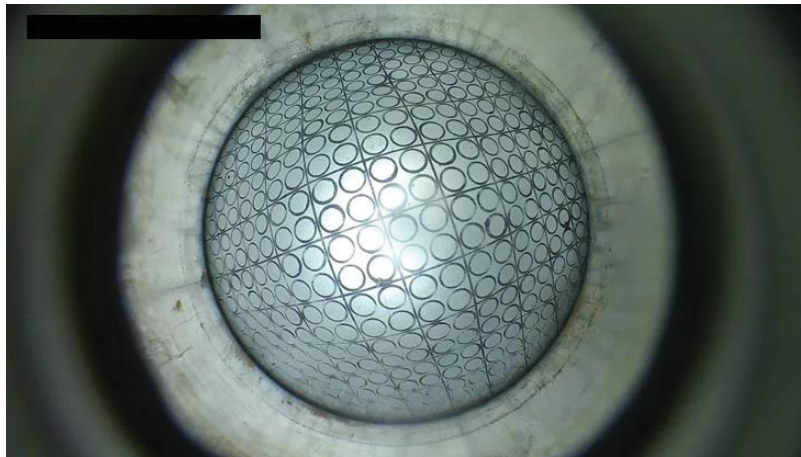
FONTE: O autor (2023).

Deformações oriundas de maiores ângulos de abertura tornam as bordas da imagem comprometidas dimensionalmente, concentrando ainda mais o centro da imagem. Como o efeito da profundidade acaba prejudicando a análise pelo software. É possível que uma deformação na imagem, concentrando a imagem no centro e amenizando este efeito auxilie o software na análise, pois com menor efeito de profundidade, voltamos a uma imagem mais 2D, que é o desejado para análises DIC.

Portanto para avaliar se essas mudanças auxiliaram os resultados de análise, uma lente adicional (Figura 37) foi adicionada ao módulo da câmera. Essa lente

adicional é *superwide* 0.4x de amplificação. Em seguida foi repetido o ensaio com esse novo módulo e obteve-se resultados diferentes. A primeira observação foi o enquadramento da imagem da amostra, apesar de ser possível de ver parte da moldura da lente nas bordas da imagem, toda a região de interesse de análise estava concentrada no meio. Isto garante que a fratura aparecesse por completo dentro do enquadramento do vídeo. Outra alteração benéfica foi que dessa vez durante a filmagem do processo de embutimento, não houve nenhum desfoque na imagem, resultando em uma imagem clara em todos os quadros de análise.

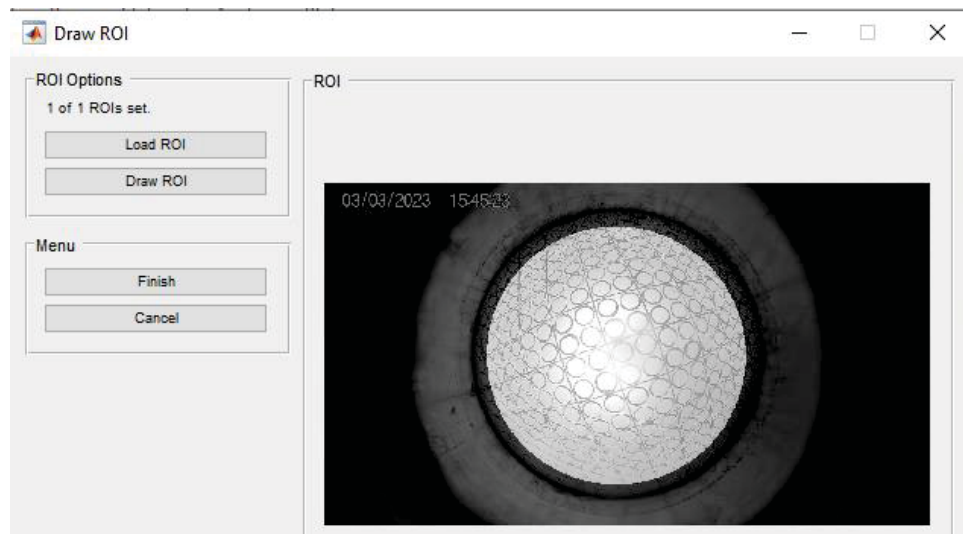
FIGURA 38 – Captura de imagem no módulo experimental após ajuste de imagem com a utilização da lente adicional.



FONTE: O autor (2023).

Os resultados de imagem foram mais satisfatórios como é visto na Figura 38, obtendo um enquadramento melhor e não havendo desfoque durante a gravação. Para averiguar se os efeitos de profundidade e demais efeitos tridimensionais que afetam a análise 2D do DIC foram amenizados, foram rodados os testes no Ncorr novamente.

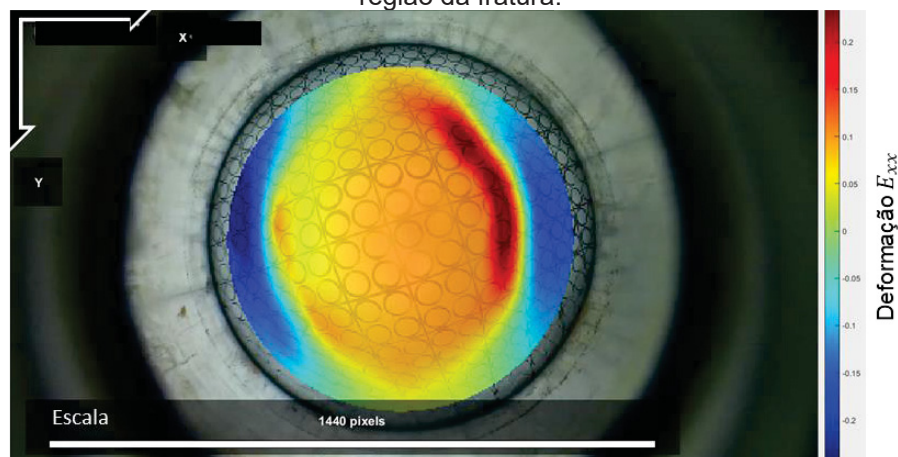
FIGURA 39 – Definição da região de interesse através do software DIC.



FONTE: O autor (2023). NOTA: Determinou-se toda a região do corpo de prova como região de interesse para garantir que no mapa de deformação desse para identificar se o software estava apontando a região de máxima deformação na região da fratura como esperado.

Após definir a imagem de referência, a região de interesse dessa vez pôde acomodar toda a amostra (Figura 39), foram rodados os testes para levantar os dados de deslocamento e deformação. O mapa de deformação apesar de ainda ser possível perceber efeitos de distorção de imagem que afetam os resultados, para os últimos quadros apresentou um mapa de deformação bem mais favorável para análise. Ao observar a Figura 40, podemos identificar que ao fim a maior mancha de deformação existente no mapa de deformação era justamente da região da fratura, podendo ser claramente identificada.

FIGURA 40 – Mapa de deformação após ajuste de imagem, com a área de máxima deformação na região da fratura.



FONTE: O autor (2023).

TABELA 5 – Apresentação dos dados de deformação extraídos do software DIC Ncorr. Para deformações em E_{xx} e E_{yy} .

Deformação E_{xx}	Frame					
	39	40	41	42	43	44
A	0,098630	0,103902	0,110196	0,116810	0,126368	0,137360
B	0,098349	0,103156	0,109546	0,116179	0,125358	0,136203
C	0,093653	0,097862	0,103474	0,108430	0,116218	0,126100
D	0,089633	0,092976	0,097372	0,100439	0,105465	0,112719
E	0,085384	0,088406	0,092466	0,094995	0,099089	0,100224

Deformação E_{yy}	Frame					
	39	40	41	42	43	44
A	0,0530136	0,0552981	0,0565255	0,0572924	0,0593582	0,0613515
B	0,0563730	0,0586973	0,0600895	0,0610575	0,0629896	0,0653106
C	0,0589450	0,0612517	0,0627232	0,0639397	0,0656162	0,0683490
D	0,0610866	0,0633815	0,0648788	0,0663247	0,0677121	0,0707069
E	0,0631710	0,0654918	0,0670344	0,0687539	0,0698619	0,0726708

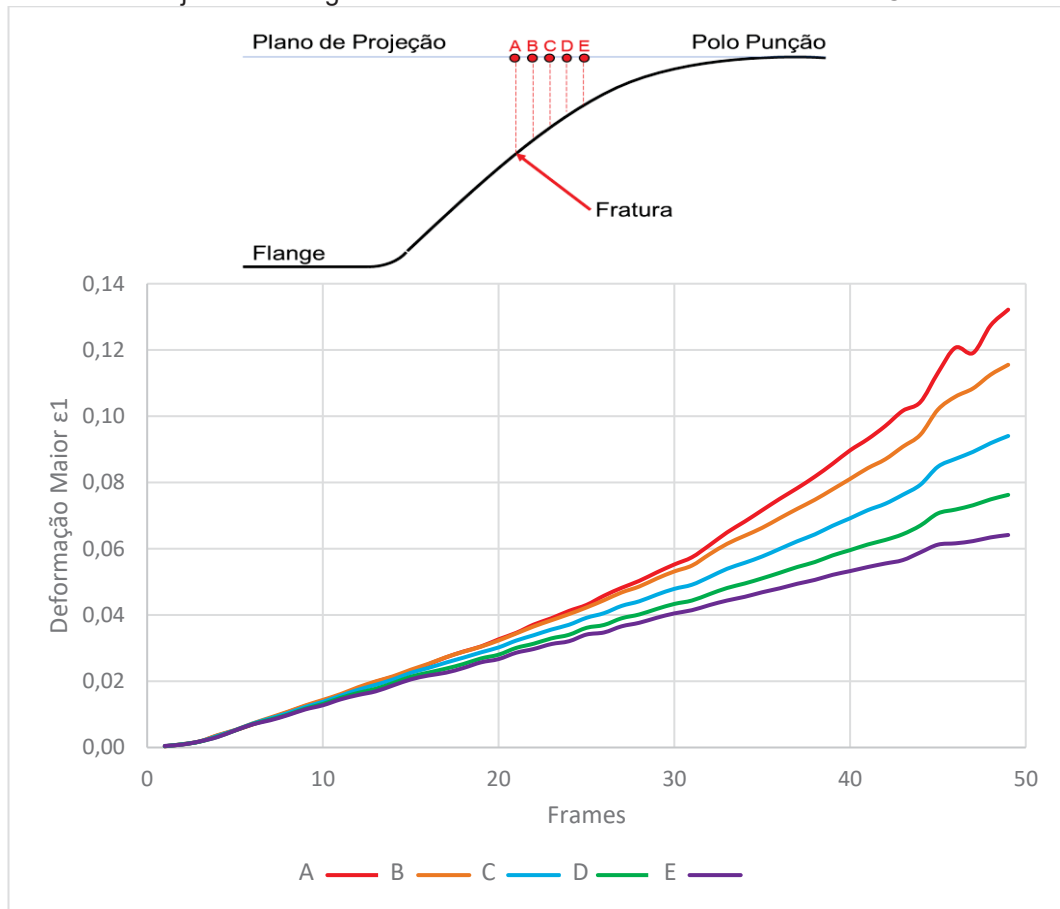
FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: Deformações Green-Lagrangianas E_{xx} e E_{yy} extraídos do software DIC Ncorr para cada ponto (A), (B), (C), (D) e (E) para cada quadro (*frame* retirado do vídeo gravado no ensaio). Pontos que possuem coordenadas no software e foram escolhidos na região de ruptura. Para os gráficos mostrados no trabalho, estas deformações são sempre convertidas para as deformações verdadeiras pela Eq. (1) e Eq. (2).

Com os resultados para E_{xx} e E_{yy} extraídos para os 50 quadros da imagem em tabela Excel. Conforme a Figura 33 foram determinados os pontos (A), (B), (C), (D) e (E) para verificar a evolução da fratura, e em seguida obter o gráfico da máxima deformação pelo tempo e da taxa de máxima deformação pelo tempo. A deformação resultante foi calculada através da soma dos componentes de X e Y em relação a 20 graus.

Os dados de deformação são dispostos conforme Tabela 5. O gráfico de deformação pelo tempo da Figura 41 mostra a evolução da fratura e após o ajuste de imagem a diferença dos pontos de (A) até (E) pré ruptura ficaram mais evidentes, isso devido à melhoria no mapa de deformação resultante.

FIGURA 41 – Gráfico de evolução da deformação durante a conformação na região de fratura após o ajuste de imagem durante o desenvolvimento do software DIC.

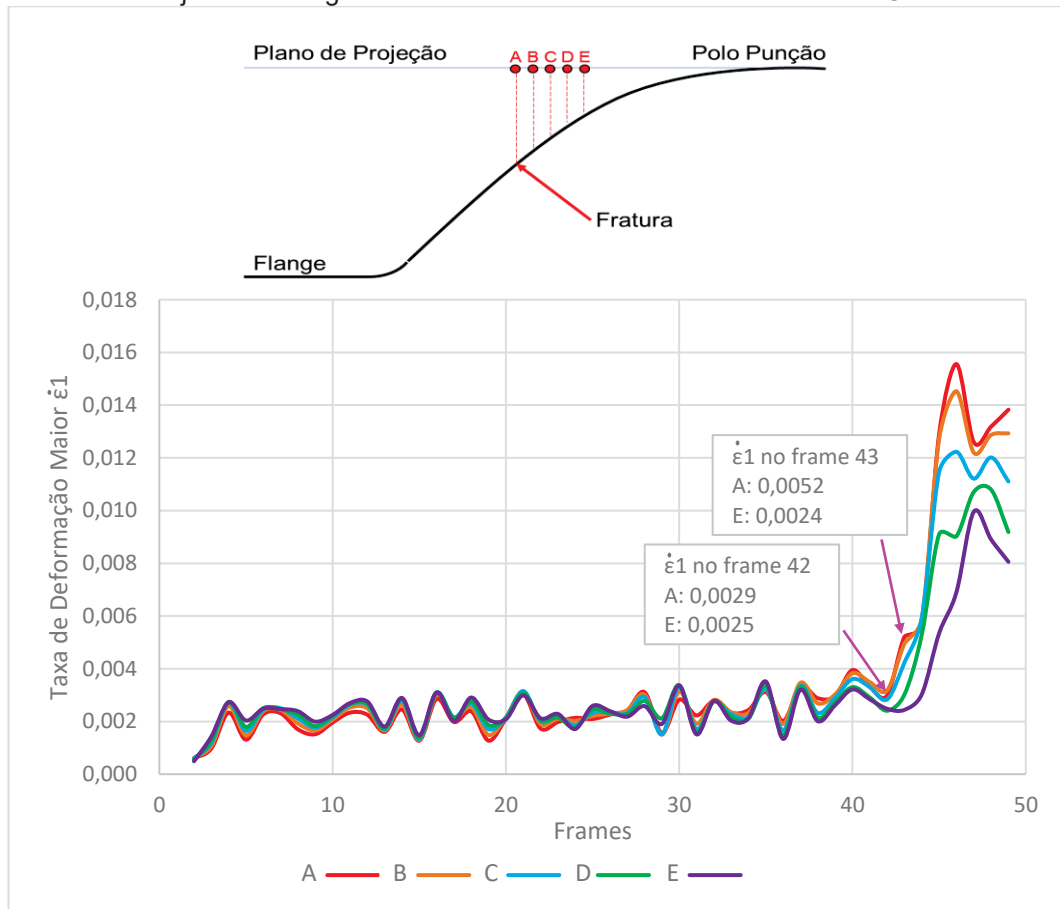


FONTE: O autor (2023). LEGENDA: Ao longo do perfil estampado da chapa: (A) no local da fratura, (B), (C), (D) intermediários entre o polo do punção e a fratura, e (E) na região do polo do punção, são pontos equidistantes entre si.

O gráfico que apresentou maiores evoluções após o ajuste de imagem foi o da taxa de deformação, ficando com curvas muito mais semelhantes com a revisão bibliográfica (Figura 18). Com o gráfico da Figura 42, é possível identificar a região de fratura do corpo de prova assim como também observar uma região pré ruptura que pode ser interpretado como a região de difusão da estricção.

É possível notar como as curvas de (A) até (E) estão juntas até aproximadamente a etapa 35 (*frame*), e que a partir desse ponto as curvas tomam valores distintos, e essa distinção que revela uma separação (Figura 42) e consequentemente um início da difusão da estricção. Materiais que possuem maior alongamento conseguem representar melhor essa região pois acabam ficando mais visíveis no vídeo e consequentemente mais bem interpretados pelo software Ncorr.

FIGURA 42 – Gráfico da taxa de deformação durante a estampagem na região de fratura após o ajuste de imagem durante o desenvolvimento do software DIC.



FONTE: O autor (2023). NOTA: Este gráfico em contrapartida com o da Figura 35, apresentam curvas muito mais próximas do esperado pela literatura, devido ao ajuste de imagem. LEGENDA: Ao longo do perfil estampado da chapa: (A) no local da fratura, (B), (C), (D) intermediários entre o polo do punção e a fratura, e (E) na região do polo do punção, são pontos equidistantes entre si.

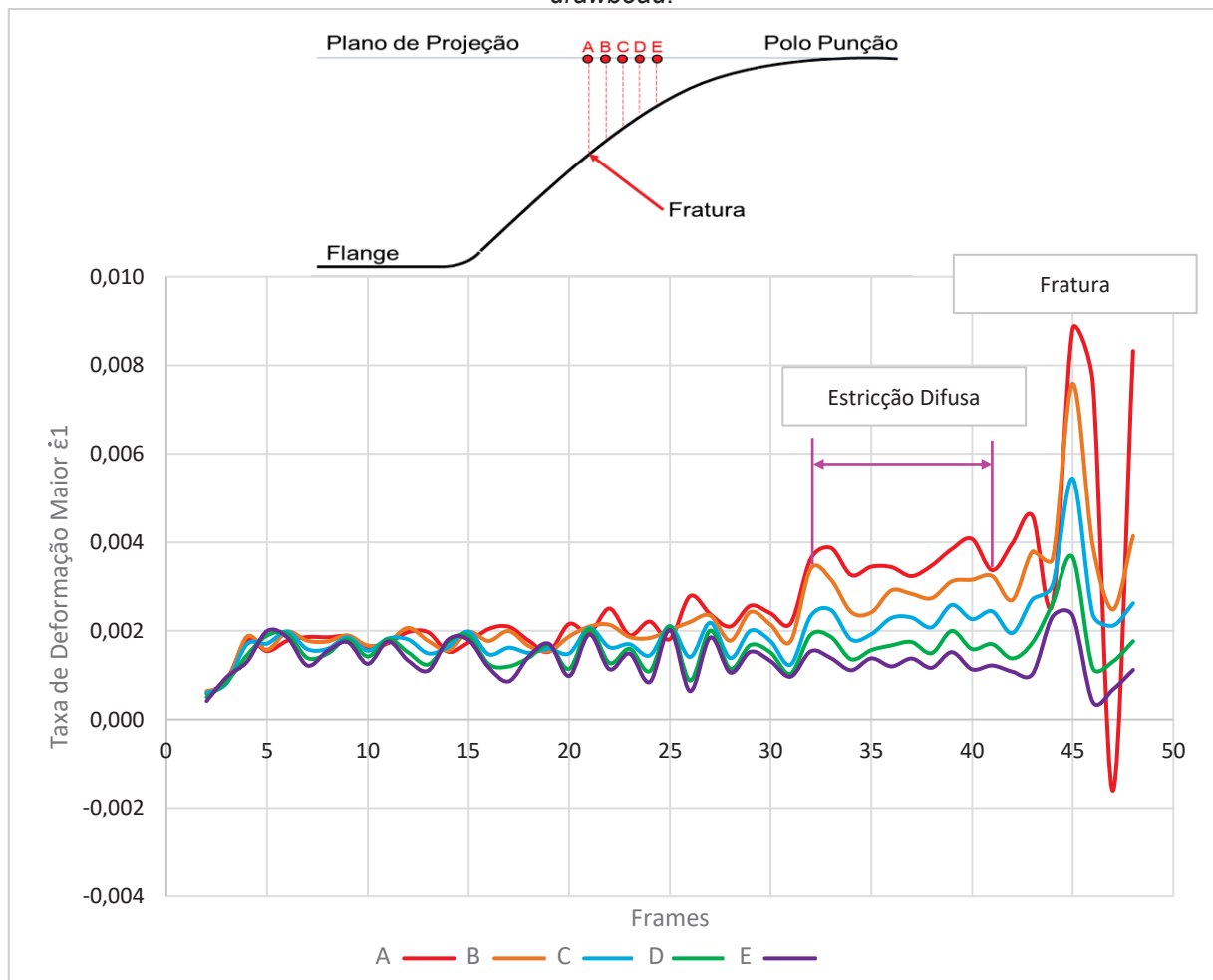
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DESENVOLVIMENTO DO DIC

Durante a etapa de desenvolvimento do sistema DIC, com o aço BH220, foram obtidos os gráficos de taxa de deformação para identificar a região de estrição difusa a partir dos quais tornou-se possível identificar a fase de estrição e o momento da fratura.

Para os corpos de provas maiores, que promovem o modo de deformação por estiramento, foi possível prever o início da estrição observando a súbita ascensão da taxa de deformação no ponto de maior deformação, ou seja, na região da fratura, e a queda da taxa nos pontos mais próximos à região do polo do punção, como ilustrado na Figura 43.

FIGURA 43 – Gráfico da taxa de deformação durante a estampagem na região de fratura que apresenta região de difusão da estrição acentuada do aço BH220 com 58tf de FPC e utilização de *drawbead*.



FONTE: O autor (2023). NOTA: A região de difusão de estrição foi interpretada como o intervalo de quadros em que há uma separação entre os pontos (A), (B), (C), (D) e (E) no momento pré-fratura, com (A) tendo a maior taxa e (E) mantendo uma baixa taxa durante essa região. LEGENDA: Ao longo do perfil estampado da chapa: (A) no local da fratura, (B), (C), (D) intermediários entre o polo do punção e a fratura, e (E) na região do polo do punção, são pontos equidistantes entre si.

A Figura 43 mostra que o ponto de estrição é o momento em que há o início da difusão da estrição, e foi possível notar qualitativamente nas imagens registradas do vídeo do respectivo ensaio que, a partir desse ponto a fratura começou a evoluir de forma significativa. No gráfico foi possível identificar a evolução da taxa de deformação perto do *frame* 32 principalmente nas coordenadas mais próximas à região da fratura. Esse distanciamento entre (A), (B), (C), (D) e (E) localizou-se entre os *frames* 32 e 43 e representa a região da estrição. Nota-se pelo gráfico que, a coordenadas (A) (na fratura) evoluiu, enquanto na posição (E) (na região do polo do punção) a taxa de deformação se mantém de forma semelhante ao que ocorria antes da região em que se iniciou a difusão de estrição. Pode-se dizer ainda que a Figura 43 apresentou similaridades com o que fora apontado na Figura 20.

Durante essa fase, estudou-se também uma possibilidade de estabelecer um coeficiente de segurança para a CLC com dados do DIC, baseada na proporção entre a deformação registrada durante a fratura e a deformação durante o início da estrição. A partir dos dados do Ncorr confrontados com os dados de deformação medidos no corpo de prova final, apresentados na Tabela 6. Com base nisso, a Figura 44 mostra duas CLCs, uma obtida através de ensaios até a fratura com geometrias de CP estabelecidos na metodologia. E a segunda curva calculada a partir da média proporcional entre a tensão verdadeira maior registrada pelo DIC no instante de estrição dentro e fora da região de estrição, dados representados também na Figura 44. Média calculada em cima dos valores das dimensões dos CPs determinados arbitrariamente (Tabela 6).

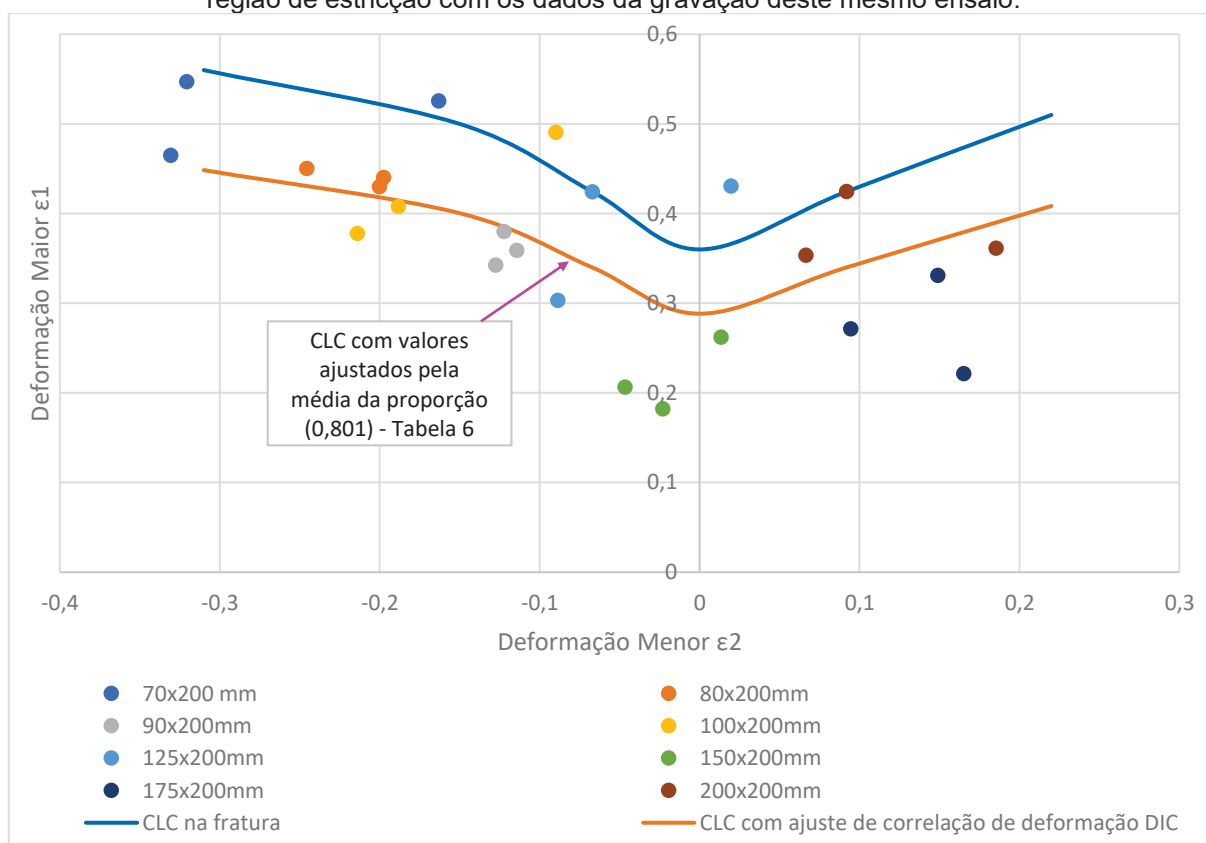
TABELA 6 – Apresentação dos dados de deformação extraídos do software DIC Ncorr para os instantes de fratura e estrição retirados da gravação do ensaio e calculado relação de proporção entre fratura e estrição. Ensaio com BH220 com 58tf de FPC e utilização de *drawbead*.

Dimensão CP (mm)	70x200	100x200	150x200	175x200	200x200
Fratura (frame)	44	49	45	44	36
Valores DIC (ϵ_1)	0,1238	0,07496	0,1269	0,06682	0,04488
Estricção (frame)	40	45	41	39	31
Valores DIC (ϵ_1)	0,1107	0,06664	0,1023	0,04822	0,03110
Proporção	0,894	0,889	0,806	0,722	0,693
Média	0,801				

FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: Deformações Green-Lagrangianas convertidas pela Eq. (1,2) no sentido de maior deformação extraídos do software DIC Ncorr para o ponto (A), representando o local da fratura para os quadros determinados (*frame* retirado do vídeo gravado no ensaio). Média da proporção calculada por quantidade de CPs determinado arbitrariamente.

FIGURA 44 – CLC realizada na condição de fratura para o aço BH220 com 58tf de FPC e utilização de *drawbead* e CLC com correlação de deformações maiores obtidas pelo DIC dentro e fora da região de estrição com os dados da gravação deste mesmo ensaio.



FONTE: O autor (2023). LEGENDA: O coeficiente de segurança adotado na CLC de correlação foi a proporção entre os dados obtidos pelo software DIC na fratura, e no início de estrição para o mesmo ensaio até a ruptura da CLC acima. Os pontos são oriundos da medição feita dos CPs após o ensaio até a fratura.

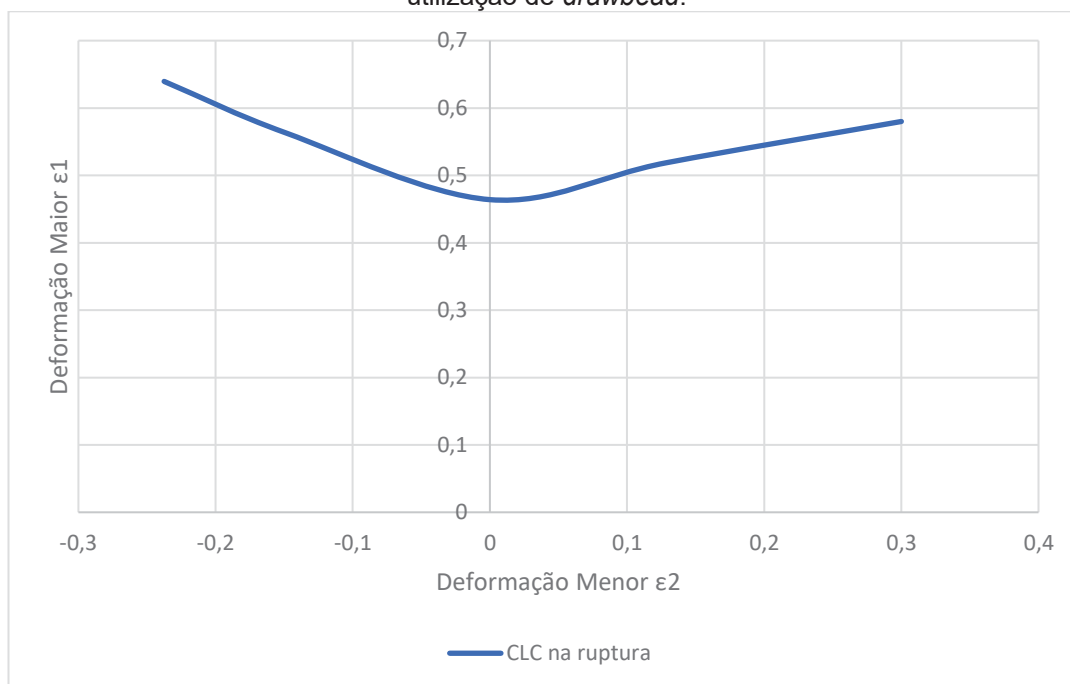
Ao observar a CLC relacionada com o DIC, percebe-se que é um coeficiente de segurança coerente para o comportamento do aço BH220 devido a sua ductilidade, pela proximidade à curva de fratura, este comportamento seria observado em demais aço com alta região de deformação plástica. Para o aço DP780 devido a sua baixa região plástica, a relação entre os valores de deformação maior dentro e fora da região de estricção registradas pelo DIC foram muito próximas. Devido a este fator, julgou-se esta possibilidade de coeficiente de segurança inconclusivo para o aço DP780.

Essa análise serviu para a calibração do sistema DIC, baseado em parâmetros que potencializaram e facilitaram o encontro do ponto de início da estricção. Esta análise para o BH220 foi de grande importância, pois a CLC ajustada não ficou tão afastada da CLC na ruptura, todavia esta análise varia de acordo com o efeito de profundidade e com a porcentagem de alongamento do material. Cabe observar que esta mesma análise não foi representativa para o aço DP780 pois é um material de menos elasticidade e, com isso, o software identificou de forma menos expressiva a estricção difusa. Como consequência disso, a curva ajustada ficaria muito abaixo da CLC na ruptura, tornando inviável a sua utilização.

Durante o desenvolvimento do método DIC, observou-se também a influência do efeito da profundidade nas imagens obtidas durante a realização dos ensaios. Mesmo com as imagens cobrindo toda a área necessária com qualidade satisfatória, a altura das amostras deformadas fez com que a chapa se aproximasse muito da câmera, principalmente nos corpos de prova de menor largura, afetando a análise. Para a análise com o software, a região central de deformação acabou excessivamente grande quando comparada à imagem de referência.

Para amenizar os efeitos de profundidade e, conseqüentemente melhorar a análise pelo software DIC, estabeleceu-se um aumento na força do prensa-chapas de 58 tf para 80tf. Esta configuração foi realizada sem *drawbead*. Assim, os gráficos e os resultados de deformação obtidos nesta configuração foram similares a anterior, com o intuito de se obter um método de análise evitando a interferência das divergências óticas nos dados reais da CLC. Novamente foi realizado o procedimento original representado na Figura 45.

FIGURA 45 – CLC realizada na condição de fratura para o aço BH220 com 80tf de FPC e sem utilização de *drawbead*.

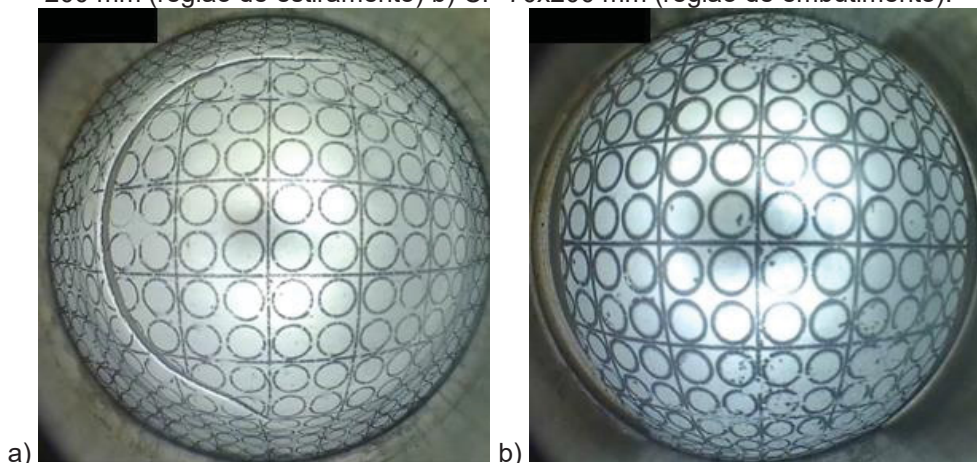


FONTE: O autor (2023).

A CLC obtida na segunda bateria de testes (Figura 45) apresenta maior limite de conformabilidade para o aço BH220, quando comparada a da primeira bateria (Figura 44). Devido, principalmente, a não utilização de *drawbead*. Para a análise de imagem, é desejável uma clara captura da fratura sendo formada até o final, o que permite que o software DIC possa comparar satisfatoriamente a sua evolução a partir da imagem de referência. Para isso foi necessário minimizar o efeito da profundidade da imagem. Consequentemente, na bateria seguinte de testes, foram utilizadas as configurações que produziram menores deformações das amostras: 80tf de força no prensa-chapas e novamente utilização de *drawbead*.

Para os corpos de prova de menor largura, além do efeito de profundidade, notou-se que as fraturas estavam mais próximas ao ombro da matriz, essas por sua vez tiveram pior captação de imagens durante a filmagem do ensaio. Comparando as duas imagens dentro da mesma bateria, entre um de um corpo de prova de maior largura e um corpo de prova de menor largura, fica evidente que, como para o de maior deformação a ruptura inteira pode ser observada na Figura 46.

FIGURA 46 – Comparativa de região de fratura para CPs do mesmo ensaio do BH220. a) CP 200 x 200 mm (região de estiramento) b) CP 70x200 mm (região de embutimento).



FONTE: O autor (2023). NOTA: Para os CP de maior dimensão, consequentemente da região de deformação de estiramento, houve a tendência de a fratura estar no centro na imagem capturada. Isso facilitou a análise DIC para estes CPs trazendo também resultados mais relevantes.

Pode-se dizer então que, para a análise da evolução da fratura pelo DIC, a imagem clara do processo de deformação do material, com boa focalização e enquadramento, são fundamentais. Fraturas mais próximas do polo do punção, como na Figura 46.a, são desejáveis pelo menor efeito de distorção de imagem na captura. Assim, torna-se preferível para um sistema DIC o uso de uma câmera apenas, uma vez que não há nenhum outro mecanismo de planificação da imagem capaz de eliminar o efeito de profundidade da imagem. Durante o desenvolvimento, os corpos de prova de maior largura sofreram fraturas mais próximas ao polo do punção. Como estes corpos de prova representam a região de deformação por estiramento, foram as que apresentaram resultados válidos para o trabalho e, consequentemente, utilizadas na fase seguinte de testes.

5.1.1 Determinação do ponto de estricção

Com o objetivo de finalizar a calibragem do sistema DIC, com dados que viabilizassem a análise de estampabilidade das amostras, a configuração utilizada para a ferramenta de ensaios visou concentrar as fraturas na região do raio do punção. Por ser este o local de maior concentração de tensões para o punção com geometria hemisférica, a localização da fratura neste local da amostra indica o real limite de conformabilidade do aço. Assim, adotou-se o *drawbead* de geometria circular e força

de prensa-chapas de 80tf que, segundo o trabalho de OLIVEIRA (2022), ocasionou a fratura na região do raio do punção.

Esta bateria resultou em gráficos compatíveis com a análise de estrição sendo que, com os dados de deformação extraídos do software, foi possível definir o momento exato do início da estrição localizada. Mesmo após a calibragem e análises, não foi possível eliminar por completo alguns fatores que interferiram na análise de dados para os corpos de prova mais estritos, cujas deformações caracterizam o modo de deformação por embutimento.

Para utilização dos dados oriundos do DIC, sem o efeito da deformação de imagem, foi realizada uma análise comparativa destes com o vídeo obtido durante o ensaio. A Tabela 7 apresenta os dados comparativos entre as informações do software DIC com a gravação de vídeo e os dados oriundos do CLP para cada dimensão de amostra.

TABELA 7 – Dados comparativos entre os tempos de vídeo registrado por ensaio com os dados registrados pelo CLP da prensa hidráulica durante o desenvolvimento do DIC com o aço BH220 com 80tf de FPC e utilização de *drawbead* circular.

	200x200 mm	175x200 mm	150x200 mm
Instante inicial de Deformação - Vídeo (s)	9,86	6,04	12,47
Instante final de Deformação - Vídeo (s)	28,38	23,07	28,66
Ponto de Ruptura - Vídeo (<i>frame</i>)	45	42	40
Ponto de Estrição - Vídeo (<i>frame</i>)	41	36	34
Período de Ensaio - Vídeo (s)	18,52	17,03	16,19
Instante de Estrição - Vídeo (s)	18,12	16,43	15,59
Período Registrado - CLP (s)	29,70	32,10	33,60
Instante de Estrição - CLP (s)	29,06	30,97	32,35
Força Máxima - CLP (kgf)	11201,91	10861,91	8320,91
Força Estrição DIC - CLP (kgf)	10959,97	10479,23	8012,53
95% Força - CLP (kgf)	10641,81	10318,82	7904,86

FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: Tempos de vídeo extraídos da gravação do ensaio. *Frames* são os respectivos quadros da gravação utilizada na análise DIC. O período registrado pelo CLP é contado a partir do funcionamento da máquina para o ensaio. Força Máxima é obtida com o valor de pressão registrado no CLP relacionado com o valor de área do êmbolo da prensa (CHEMIN, 2013). As demais forças são calculadas com este valor de Força Máxima.

Representadas na Tabela 7, as etapas definidas como início de estrição e ruptura foram referenciadas com o tempo do vídeo original. Este intervalo de tempo entre a estrição e ruptura também pôde ser relacionado com a evolução da pressão

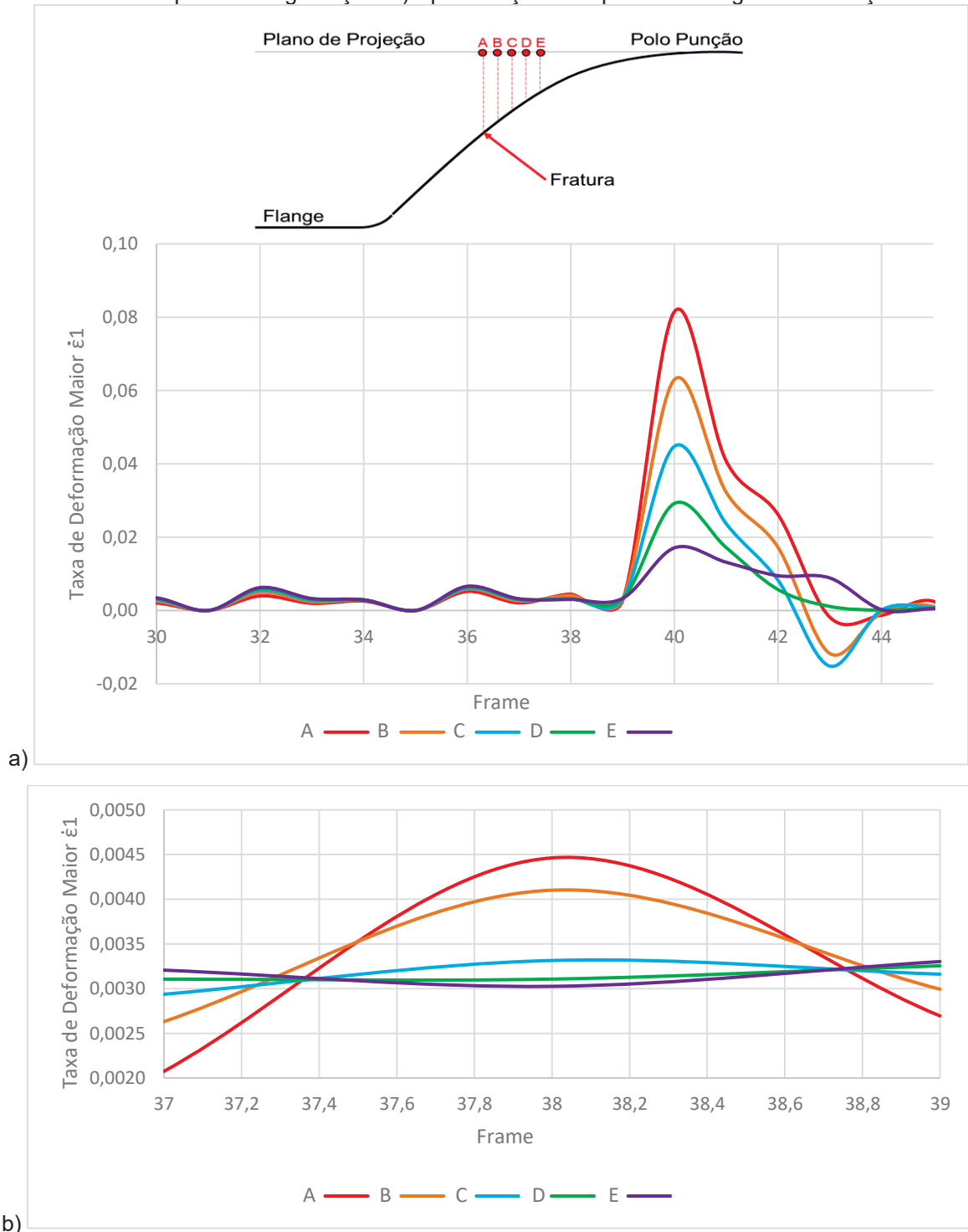
registrada no CLP, pois este registra a pressão sobre o punção a cada pequeno intervalo de deslocamento do êmbolo, como visto no trabalho de CHEMIN (2013).

Esta análise foi realizada apenas para a região de estiramento. Com a correlação de períodos desde o DIC até o registrado pelo CLP, foi possível determinar a força resultante no início da estrição. Com os valores da força de ruptura, força de estrição pela análise DIC e 95% da força de ruptura, tornou-se possível a obtenção de dados quantitativos comparativos entre a análise DIC e os dados provenientes do CLP. Notou-se uma maior força limite de estrição pelo método DIC em relação aos 95% da força de ruptura.

5.2 ANÁLISE DA ESTAMPABILIDADE DO AÇO DP780 COM SISTEMA DIC

Os testes para avaliar a estampabilidade do aço DP780 consistiram em realizar o ensaio Nakazima, modificado conforme Oliveira et al. (2022), até a fratura, realizando posteriormente a análise DIC para determinação do ponto de início de estrição do material. Em seguida, a partir dos ensaios com DIC, limitados à 95% da força de ruptura do aço DP780, foi obtido o gráfico da taxa de deformação representados na Figura 47.a.

FIGURA 47 – Gráfico da taxa de deformação durante a conformação na região de fratura que apresenta região de difusão da estricção acentuada do aço DP780 (80tf e *drawbead* circular). a) Todos os quadros de gravação. b) Aproximação nos quadros da região de estricção.



FONTE: O autor (2023). NOTA: Devido a menor porcentagem de alongamento do DP780 comparado ao BH220, a taxa de deformação no momento da fratura foi muito mais abrupta e por isso a necessidade de aproximação na região de estricção para identificação e análise DIC. LEGENDA: Ao longo do perfil estampado da chapa: (A) no local da fratura, (B), (C), (D) intermediários entre o polo do punção e a trinca, e (E) na região do polo do punção, são pontos equidistantes entre si.

Quando comparados os gráficos dos aços DP780 e BH220, nota-se grande divergência quanto a evolução da taxa de deformação no momento da ruptura, que foi muito mais abrupta para o DP780. Isto se deve principalmente ao menor alongamento do aço DP780. Já a Figura 47.b representa uma aproximação no gráfico nas etapas imediatamente antes da ruptura, para que fosse possível a análise e detecção do início da estrição difusa. Com a aproximação foi possível observar a separação das linhas de (A) até (E), mesmo que de forma mais sutil em relação ao aço BH220.

Foi possível observar ainda nos ensaios com DIC, que o ponto de início de estrição do aço DP780 ocorreu num instante mais próximo à sua ruptura, quando comparado ao BH220. Esse resultado já era esperado, uma vez que o aço DP780 apresenta um regime de deformação plástica muito menor.

A mesma tabela de dados comparativos realizada na etapa de desenvolvimento foi replicada para o aço DP780 como ilustrado na Tabela 8.

TABELA 8 – Dados comparativos entre os tempos de vídeo registrado por ensaio com os dados registrados pelo CLP da prensa hidráulica durante a análise da estampabilidade do aço DP780 com 80tf de FPC e utilização de *drawbead* circular.

	200x200 mm	175x200 mm	150x200 mm
Instante inicial de Deformação - Vídeo (s)	10,21	13,88	18,18
Instante final de Deformação - Vídeo (s)	22,93	23,9	28,66
Ponto de Ruptura - Vídeo (<i>frame</i>)	49	40	48
Ponto de Estrição - Vídeo (<i>frame</i>)	30	38	46
Período de Ensaio - Vídeo (s)	16,41	10,02	10,48
Instante de Estrição - Vídeo (s)	15,92	9,82	10,28
Período Registrado - CLP (s)	12,10	8,8	9,0
Instante de Estrição - CLP (s)	11,74	8,62	88,3
Força Máxima - CLP (kgf)	10575,60	8195,64	7336,71
Força Estrição DIC - CLP (kgf)	10259,82	8032,06	7196,70
95% Força - CLP (kgf)	10046,82	7785,86	6969,88

FONTE: O autor (2023).

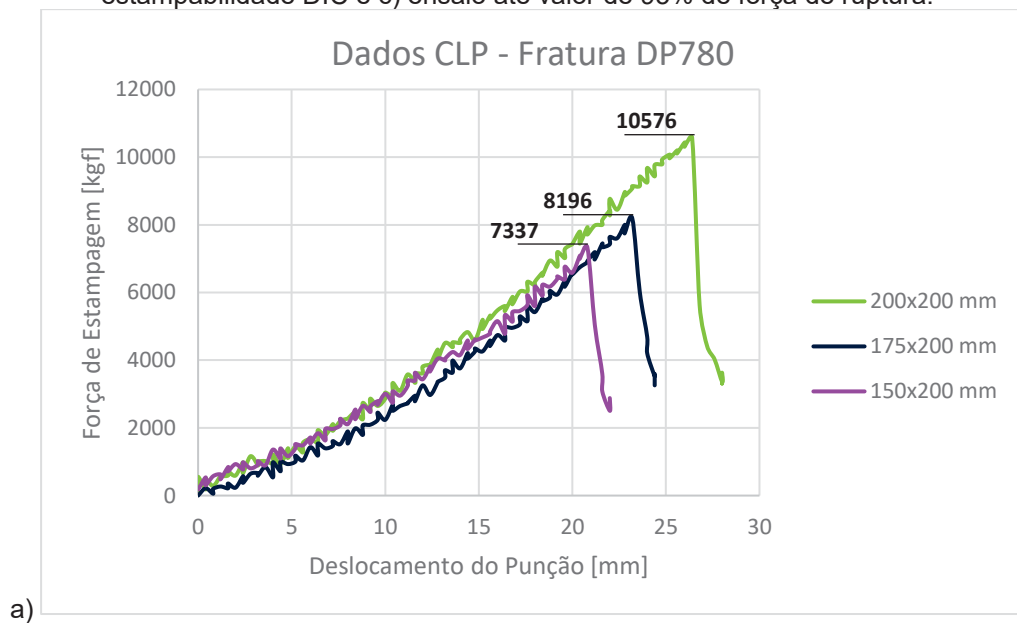
LEGENDA: Tempos de vídeo extraídos da gravação do ensaio. *Frames* são os respectivos quadros da gravação utilizada na análise DIC. O período registrado pelo CLP é contado a partir do funcionamento da máquina para o ensaio. Força Máxima é obtida com o valor de pressão registrado no CLP relacionado com o valor de área do êmbolo da prensa (CHEMIN, 2013). As demais forças são calculadas com este valor de Força Máxima.

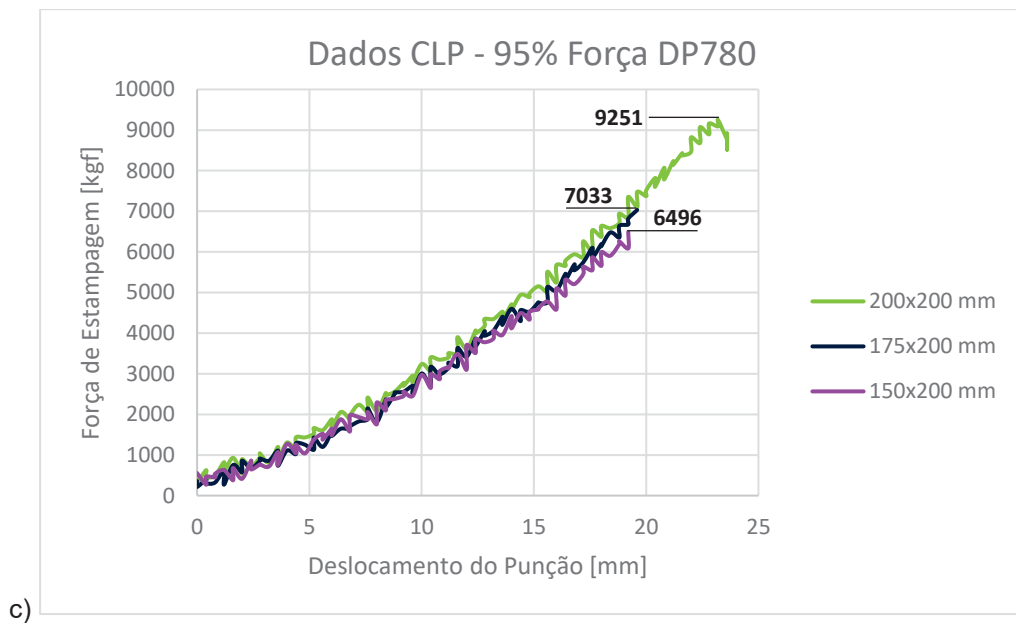
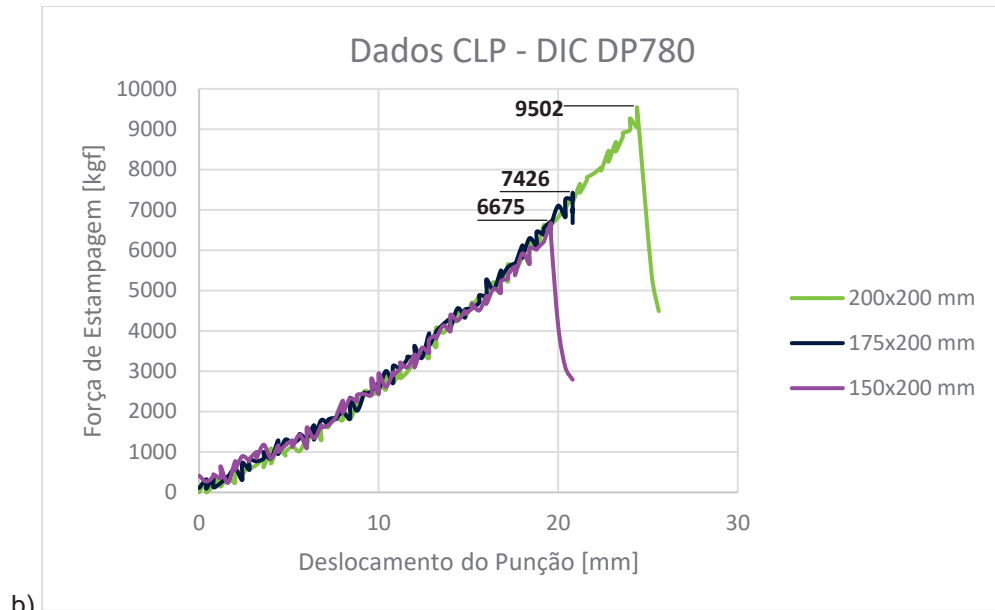
Da mesma forma como fora observado para o BH220, pelos dados da Tabela 8 tornou-se possível a percepção de um incremento da força na estrição pelo método DIC. Isso foi um ponto favorável para este trabalho, pois mostrou que o DIC indica um

aumento no limite da conformabilidade do material que, por sua vez, torna esse resultado mais próximo do ponto real de estricção da chapa.

Para replicar as condições de estricção, conforme dados da Tabela 8, foram realizados os ensaios com as mesmas dimensões dos corpos de provas, porém, com o CLP programado para efetuar a parada da máquina de acordo com os valores de força indicados na Tabela 8. Neste caso, os valores de força obtidos com o DIC apresentaram-se substancialmente maiores do que os valores de 95% da força máxima até a ruptura da chapa. Na Figura 48 é possível observar o gráfico da força de estampagem por tempo de funcionamento do punção, para os ensaios realizados até a ruptura da amostra, até o valor de 95% da força máxima de estampagem e, por fim, com os dados advindos da análise com DIC.

FIGURA 48 – Gráfico dos dados registrados pelo CLP durante o ensaio de análise de estampabilidade do aço DP780 (80tf e *drawbead* circular) com os corpos de prova de tamanho de estiramento (200x200, 175x200 e 150x200 mm) a) ensaio até a fratura b) ensaio até valor de força de estampabilidade DIC e c) ensaio até valor de 95% de força de ruptura.





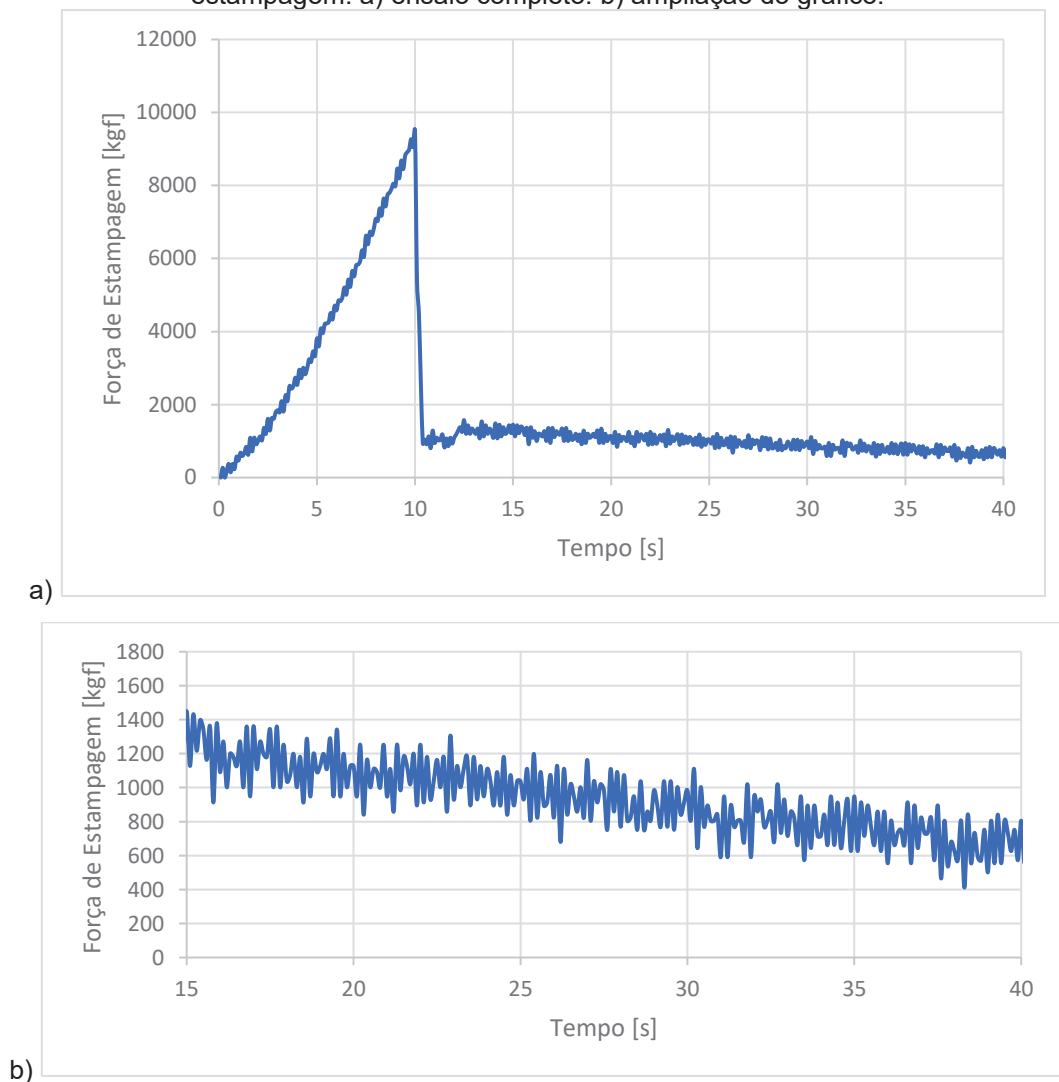
FONTE: O autor (2023). NOTA: Para todos os CPs, alcançou-se maior valor de força de estampabilidade para os dados DIC comparado ao valor de 95% de força de estampabilidade.

LEGENDA: Valores destacados são os valores máximos de força de estampagem.

De acordo com a Figura 48, pode-se dizer ainda que, a análise pelo método DIC aponta uma pressão limite de estrição num maior patamar de deformação do que o valor pré-determinado de pressão em 95% da pressão máxima de ruptura da chapa. Em outras palavras, a análise pelo DIC prevê um maior limite de conformabilidade para o material, superior a deformação em 95% da pressão máxima, uma vez que o limite de estrição da chapa ficou num patamar superior ao previsto por esse referencial empírico.

Outro aspecto observado foi que, durante os ensaios para avaliação da estampabilidade das chapas, alguns corpos de prova romperam com valores de forças inferiores aos valores previstos para a ruptura. Pela análise de causas possíveis, observou-se que o manômetro apresentava significativas oscilações no registro de dados da CLP. A Figura 49 mostra essa oscilação detectada no manômetro no decorrer dos ensaios.

FIGURA 49 – Gráfico dos dados registrados pelo CLP durante o ensaio de análise de estampabilidade do aço DP780 (80tf e *drawbead* circular) com os corpos de prova de tamanho 200x200 mm, demonstrando a instabilidade do manômetro com a oscilação dos valores de força de estampagem. a) ensaio completo. b) ampliação do gráfico.



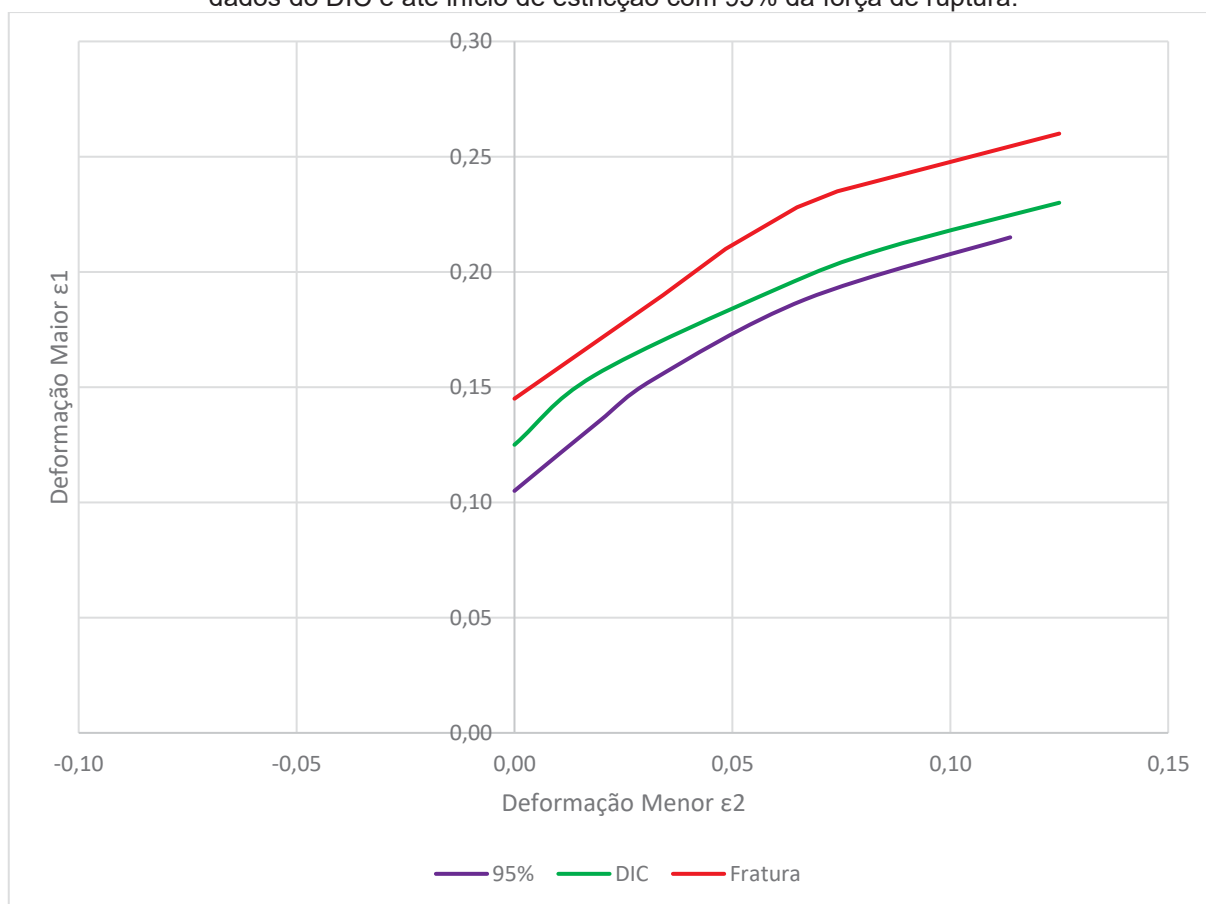
FONTE: O autor (2023).

Considerando a pequena diferença entre os três valores de pressão apontados na Tabela 8, nota-se que a oscilação no registro de dados do manômetro representado na Figura 49.a e, amplificada na Figura 49.b, foi superior a essa

diferença. Desta forma, pode-se dizer que essa oscilação causou significativo impacto aos resultados dos ensaios.

Os dados de pressão/força de estricção calculados através de DIC foram maiores do que a pressão/força de estricção estipulada empiricamente em 95% da força máxima, o que reflete em uma CLC com maior limite de conformação para o aço DP780. Esta melhor representatividade em conformabilidade é vista na Figura 50, quando comparadas as CLCs geradas na região de estiramento. Na figura, a curva representando a CLC obtida com o DIC está acima da CLC originalmente obtida por LIMA (2017).

FIGURA 50 – Comparativas de CLCs da região de estiramento para o aço AHSS DP780 na configuração de 80tf de FPC e *drawbead* circular: CLC na ruptura, CLC até início de estricção com os dados do DIC e até início de estricção com 95% da força de ruptura.



FONTE: O autor (2023). NOTA: Todos os pontos das CLCs foram medidos nos respectivos CPs de forma convencional. As pressões de parada no início da estricção foram reguladas pelo CLP da prensa hidráulica. Houve uma melhor representatividade em conformabilidade comparando o método DIC ao método experimental até 95% da pressão de ruptura. LEGENDA: Fratura é a CLC gerada até o rompimento do CP. DIC é a CLC que foi gerada com os CP sendo deformados até o início da estricção com os dados obtidos pela análise DIC. "95%" é a CLC gerada com os CP sendo deformados até o início da estricção equivalente a 95% da pressão de ruptura para a mesma configuração. Relação estabelecida experimentalmente no trabalho de LIMA (2017).

De acordo com as CLCs da Figura 50, os resultados pelo DIC apontam para um maior limite de conformabilidade até a estricção, para o aço DP780. Apesar de uma maior aproximação da CLC na fratura, a “CLC DIC” foi obtida com dados mais confiáveis, decorrentes dos gráficos de taxa de deformação. Estes gráficos, abordados no trabalho, mostraram que os pontos de parada ocorreram antes do início da estricção, preservando as propriedades de conformabilidade do material.

6 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos para os ensaios de estampagem do aço BH220 e DP780, houve uma considerável diferença nas aproximações dos limites de estricção dos materiais definidos pelo método experimental e o estabelecido no DIC. O limite de estricção determinado pelo DIC foi superior àquele definido em 95% da força máxima de estampagem da chapa, sendo cabíveis análises futuras para maior assertividade dos resultados. Independentemente do refino dos resultados, o trabalho atingiu o objetivo proposto de se desenvolver uma metodologia de análise mais acessível e iterativa para o ensaio de estampagem Nakazima, uma vez que a análise através de correlação de imagem, adotada como ferramenta para isso, se mostrou bastante eficiente.

A aplicação do método em materiais com fratura dúctil deve ser refinada. O aço DP780 apresentou em seus gráficos menores evoluções na região da fratura, sendo mais difícil determinar ao certo o início da estricção difusa através dos gráficos resposta, quando comparado ao BH220, cuja ductilidade é maior.

Pode-se dizer também que o DIC pode ser evoluído ainda mais, com um melhor sistema de captura de imagem e maior controle ou eliminação do efeito de profundidade. Assim, a metodologia adotada também mostra a importância de uma captura de imagem bem focalizada, contemplando toda a região de deformação da chapa até a propagação da trinca. O aprimoramento dos softwares, para redução do tempo de trabalho com os dados e processamento de resultados, ou uma possível automatização do sistema, com interface junto a máquina, ficam como possibilidades para trabalhos futuros.

Por fim, pode-se dizer ainda que, apesar dos AHSS serem aços destinados para aplicações cujas necessidades são de maior resistência mecânica e redução de peso, foi possível utilizar o DIC como uma ferramenta para estabelecer um coeficiente de segurança mais assertivo, de forma mais moderna e condizente com a teoria. Qualquer indicativo de um maior limite de conformabilidade da chapa metálica, seja para o DP780 e outros AHSS é algo relevante para uma análise de performance mais precisa, o que se demonstrou com o sistema implementado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDOLVAHED, K. et al. Numerical determination of the forming limit curves of anisotropic sheet metals using GTN damage model. **Journal of Materials Processing Technology**, 2014.
- ABEYRATHNA, B. et al. A first step towards a simple in-line shape compensation routine for the roll forming of high strength steel. **International Journal of Material Forming**, v. 9, n. 3, p.423-434, 18 abr. 2015.
- AFFRONTI, E.; MERKLEIN, M. Metallographic Analysis of Nakajima Tests for the Evaluation of the Failure Developments. **Procedia Engineering**, v. 183, p. 83-88, 2017.
- AKSEN, T. A. et al. Failure Prediction Capability of Generalized Plastic Work Criterion. **Procedia Manufacturing**, v. 47, p. 1235-1240, 2020.
- ANDRADE, S. L.; BATISTA, J. F.; TAISS, J. M.; ROSA, L. K. ULSAB-AVC – O aço no automóvel do futuro: A estratégia da USIMINAS. In: **55º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2000, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro**, jul. 2000.
- ASGARI, S. A. et al. Statistical Analysis of Finite Element Modeling in Sheet Metal Forming and Springback Analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, 203., p. 129-136, 2008.
- BARLO, A. et al. On the Failure Prediction of Dual-Phase Steel and Aluminium Alloys Exposed to Combined Tension and Bending. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 651, p.012030-12040, nov. 2019.
- BELLONI, V. et al. py2DIC: A New Free and Open-Source Software for Displacement and Strain Measurements in the Field of Experimental Mechanics. **MDPI – sensors**, set. 2019.
- BHADESHIA, H. K. D. H. Bainite in Steels. London. **The Institute of Materials**, 2001.
- BLABER, J.; ANTONIOU, A.; Ncorr Instruction Manual Version 1.2.2. **Georgia Institute of Technology**, 2017.
- BLECK, W.; Kriangyut, P. O. Microalloying of Cold-Formable Multiphase Steel Grades. **Materials Science Forum**, p. 7-113, 2005.
- BUTCHER, C. et al. On the Experimental Characterization of Sheet Metal Formability and the Consistent Calibration of the MK Model for Biaxial Stretching in Plane Stress. **Journal of Material Processing Tech**, v. 287, n.116887, 2021.
- CHEMIN FILHO, R. A. et al. An experimental approach for blankholder force determination for DP600 with different material flow strain rates in the flange during stamping. **Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part B:**

Journal of Engineering Manufacture, [S.L.], v. 227, n. 3, p. 417-422, 6 fev. 2013. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954405412471281>.

CRUZ, M. et al. Influence of the hydraulic press system on advanced high-strength steel formability. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY**, v. 126, p. 4722, 2023.

GOODWIN, G. M. Application of strain analyses to sheet metal forming problems in the press shop. **Metall Italiana**, 60., 764-774, 1968.

GORNI, A. A. Engenharia Microestrutural das Chapas de Aços de Alta Resistência. In: **Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica**, out. 2008.

GÓRSZCZYK, J. et al. Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. **MDPI – materials**, jul. 2019.

HAASE, O. C. Influência da Geometria do Quebra-Rugas na Factibilidade do Processo de Estampagem com Base no Método dos Elementos Finitos. **Influence of drawbead geometry on stamping feasibility based on Finite Elements Method**. 2017

HAUS, S. A et al. A influência do Efeito Bauschinger no Retorno Elástico em Aços TRIP 800. In: **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luís - Maranhão. Anais... São Luís - Maranhão: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas**, ago. 2012.

IQUILIO, R. A. et al. Novel Experimental Method to Determine the Limit Strain by Means of Thickness Variation. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 153-154, p.208-218, abr. 2019.

ISO 12004-2. (2008) Metallic materials - Sheet and Strip - Determination of forming-limit curve. [S.l.]: **European Committe for standardization**, 2008.

JOCHAM, D. et al. Failure Prediction in Direct Press Hardening Through Virtual Forming Limit Curves Based on Measurable Material Properties. **Forming Technology Forum, University of Twente, the Netherlands**, set. 2014.

KE, J. et al. Formability of Sheet Metal Flowing Through Drawbead – an experimental investigation. **Journal Of Materials Processing Technology**, v. 254, p.283-293, abr. 2018.

KEELER, S.; MENACHEM, K. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines. **Worldautosteel**, 2014.

KEELER, S. P. Determination of Forming Limits in Automotive Stampings. **Sheet Met Ind**, 42., p. 683-691, 1965.

KWIECIÉN, M. et al. Study of Deformation Behavior of Multilayered Sheets Using Digital Image Correlation. **Procedia Manufacturing**, v. 47, p. 1257-1263, 2020.

LEOCATA, S. et al. Influence of Binder Pressure Zones on the Robustness of Restraining Forces in Sheet Metal Forming. **Procedia Manufacturing**, v. 29, p.209-216, 2019.

LEONARD, M. E. et al. Métodos Temporales para Determinar Deformaciones Límite en Chapas Metálicas. **Revista Matéria**, ISSN 1517-7076, v. 23, n. 02, 2018.

LIMA, E. Avaliação do Limite de Estricção do Aço Dual Phase DP 600 Através da Curva Limite de Conformação. **37th SENAFOR, 7th International Sheet Metal Forming**, 2017.

LUMELSKYJ, D. et al. Detection of Strain Localization in Nakazima Formability Test - Experimental Research and Numerical Simulation. **Procedia Engineering**, v. 183, p. 89-94, 2017.

MARTÍNEZ-DONAIRE, A.J. et al. New Approaches to Detect the Onset of Localised Necking in Sheets Under Through-Thickness Strain Gradients. **Mater. Des.** 57, 135–145, 2014.

MIN, J. et al. Compensation for process-dependent effects in the determination of localized necking limits. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 117, p. 115-134, out. 2016.

MU, Z. et al. Hardening Model of Anisotropic Sheet Metal During the Diffuse Instability Necking Stage of Uniaxial Tension. **Thin-Walled Structures**, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107198>, out. 2020.

NODER, J.; BUTCHER, C. A Comparative Investigation Into the Influence of the Constitutive Model on the Prediction of In-Plane Formability for Nakazima and Marciniak Tests. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 163, n. 105138, 2019.

NORZ, R.; VOLK, W. Investigation of Non-Proportional Load Paths by Using a Cruciform Specimen in a Conventional Nakajima test. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 651, p.012020-12030, 25 nov. 2019.

OLIVEIRA, A. R. et al. Influence of drawbead geometry and blank holder force on the dual phase steel formability. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY (INTERNET)**, v. 121, p. 4255, 2022.

QIAO, X. et al. Full-Field Strain Mapping for Characterization of Structure-Related Variation in Corneal Biomechanical Properties Using Digital Image Correlation (DIC) Technology. **Medicine in Novel Technology and Devices**, v. 11, n. 100086, 2021.

ROATTA, A. Determination of the Forming-Limit Diagram from Deformations within Necking Instability: A Digital Image Correlation-Based Approach. **Journal of**

Materials Engineering and Performance, <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04908-5>, jun. 2020.

SCHMID, H. et al. Failure Behavior of Different Sheet Metals After Passing a Drawbead. **Procedia Manufacturing**, v. 34, p.125-132, 2019.

SHINMIYA, T. et al. Investigation of Crack Prediction Method Using Limiting Surface Strain in High-Strength Steel Sheets. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 651, p.012065-012080, nov. 2019.

SURAJIT, K. P. Prediction of Complete Forming Limit Diagram from Tensile Properties of Various Steel Sheets by a Nonlinear Regression Based Approach, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 23, p. 192-200, 2016.

SURAJIT, K. P. Controlling Factors of Forming Limit Curve: A Review, **Advances in Industrial and Manufacturing Engineering**, v. 2, n. 100033, 2021.

TIGRINHO, L. M. V. Análise da Fratura de Chapas do Aço Avançado de Alta Resistência DP600 Quando Submetido a Diferentes Estados de Tensões. **129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná**, 2011.

WANG, Z. et al. A Robust and Accurate Geometric Model for Automated Design of Drawbeads in Sheet Metal Forming. **Computer-aided Design**, v. 92, p.42-57, nov. 2017.

WEINMANN, K. J. et al. The Bauschinger Effect of Sheet Metal Under Cyclic Reverse Pure Bending, **Michigan Technological University**, 1988.

WOODTHORPE, J.; PEARCE R. The Effect of r and n Upon the Forming Limit Diagrams of Sheet Metal. **Sheet Metal Industries**. p. 1061-1067, 1969.

YANG, L. et al. Measure Strain Distribution Using Digital Image Correlation (DIC) for Tensile Tests. The Advanced High Strength Steel Stamping Team of the **Auto/Steel Partnership (A/SP) 2010**

ZHANG, R. et al. An Effective Method for Determining Necking and Fracture Strains of Sheet Metals. **Methods**, v. 8, n. 101234, 2021.

ZHANG, R. et al. Biaxial Test Method for Determination of FLCs and FFLCs for Sheet Metals: Validation Against Standard Nakajima Method. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 209, n. 106694, 2021.

ZHONG, H. et al. Swage Autofrettage FEA Incorporating a User Function to Model Actual Bauschinger Effect. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 191, n. 104372, 2021.

ZHOU K. et al. Real-Time Localization of Micro-Damage in Concrete Beams Using DIC Technology and Wavelet Packet Analysis. **Cement and Concrete Composites**, v. 123, n. 104198, 2021.