

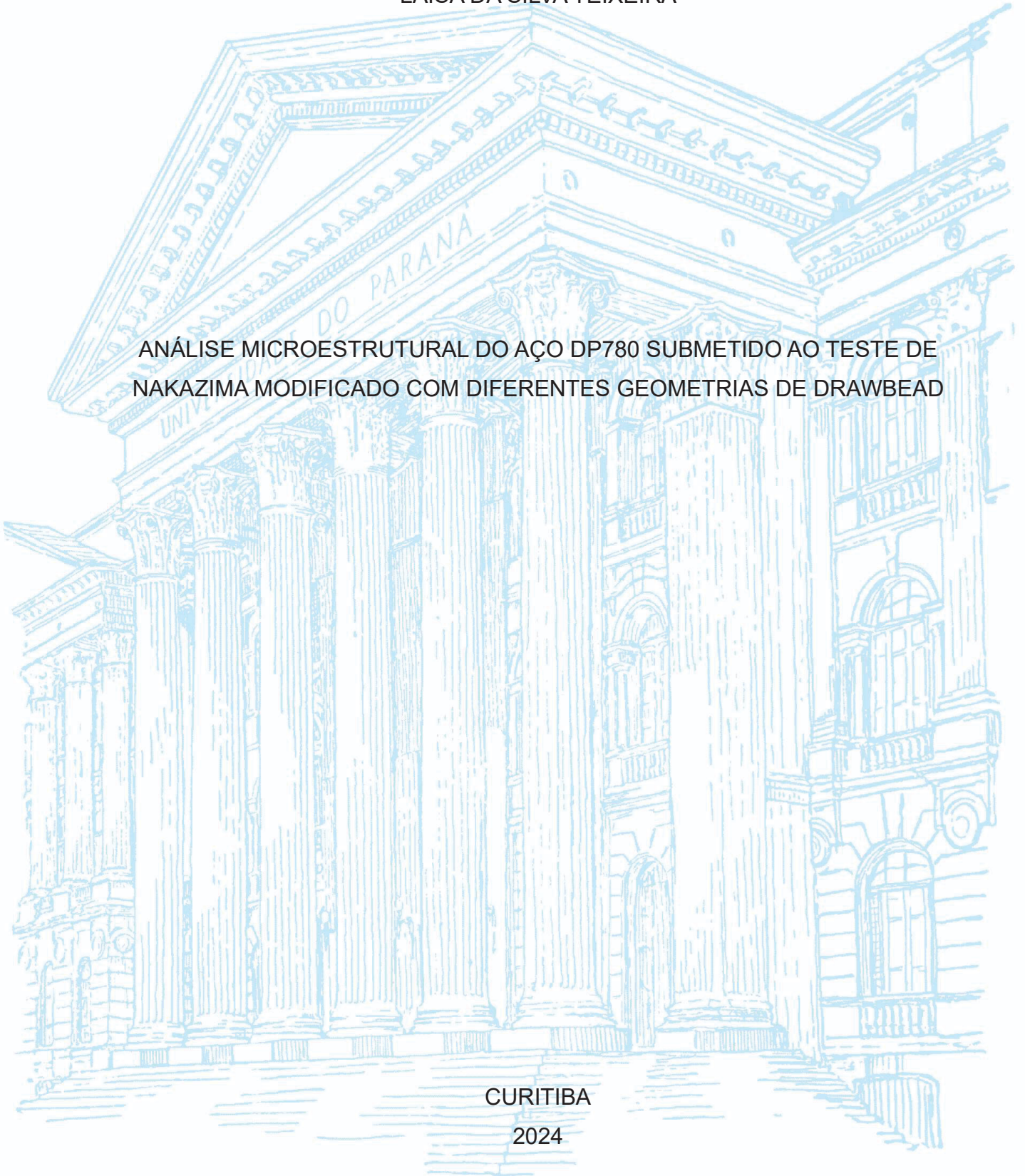
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LAÍSA DA SILVA TEIXEIRA

ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO AÇO DP780 SUBMETIDO AO TESTE DE
NAKAZIMA MODIFICADO COM DIFERENTES GEOMETRIAS DE DRAWBEAD

CURITIBA

2024



LAÍSA DA SILVA TEIXEIRA

ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO AÇO DP780 SUBMETIDO AO TESTE DE
NAKAZIMA MODIFICADO COM DIFERENTES GEOMETRIAS DE DRAWBEAD

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes

Coorientadores: Prof. Dr. Ravilson Antônio Chemin Filho e Profa. Dra. Karin Graf.

CURITIBA

2024

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

Teixeira, Laísa da Silva

Análise microestrutural do aço DP780 submetido ao teste de Nakazima modificado com diferentes geometrias de drawbead / Laísa da Silva Teixeira.
– Curitiba, 2024.

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

Coorientadores: Ravilson Antônio Chemin Filho; Karin Graf

1. Aço – Testes. 2. Aço – Indústria. 3. Estampagem (Metais). 4. Nakazima, Teste de . I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Marcondes, Paulo Victor Prestes. IV. Chemin Filho, Ravilson Antônio. V. Graf, Karin. VI. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

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 **LAÍSA DA SILVA TEIXEIRA** intitulada: **ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO AÇO DP780 SUBMETIDO AO TESTE DE NAKAZIMA MODIFICADO COM DIFERENTES GEOMETRIAS DE DRAWBEAD**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra 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, 20 de Março de 2024.

Assinatura Eletrônica

08/04/2024 15:56:45.0

RAVILSON ANTONIO CHEMIN FILHO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

04/04/2024 13:50:48.0

ALISSON ROCHA MACHADO

Avaliador Externo (PONTIFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANA)

Assinatura Eletrônica

04/04/2024 14:56:31.0

GIOVANA DE FATIMA MENEGOTTO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho à minha família,
aos amigos que estiveram comigo em minha jornada e às minhas filhas felinas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, meus pais, avó e irmão, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram antes mesmo de eu tomar a decisão de buscar a obtenção da titulação de mestre.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná, o local que me inspirou e evidenciou este caminho para minha vida, que ampliou minha visão de mundo e da qual eu tenho verdadeiro orgulho de pertencer, e ao CNPq por financiar meus estudos e os estudos de tantos outros, fortalecendo a ciência no Brasil.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Marcondes e aos meus coorientadores, Prof^a. Dr^a. Karin Graf e Prof. Dr. Ravilson Chemin, meus sinceros agradecimentos pelos conselhos, orientação, disponibilização de espaço e tempo. Aproveito aqui também para agradecer ao LabConf e a todos os seus alunos, professores e técnicos integrantes, que também contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho, em especial aos ex-alunos de iniciação científica Gabriela Bonatto e Raul Batista.

À Siderúrgica ArcelorMittal S/A pelo fornecimento do material estudado ao longo deste trabalho, meus agradecimentos pela contribuição com a ciência e o incentivo à pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PGMec UFPR), seu corpo técnico e Professores colaboradores do Programa, também ao Laboratório de Materiais (LabMat UFPR), corpo técnico, em especial o técnico Rodrigo Metz e a todo o corpo docente, minha gratidão.

Por fim, ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR, em especial ao técnico Deonir, meus sinceros agradecimentos.

Eu não tenho hora pra morrer,
Por isso, sonho. (Rita Lee, 1976)

RESUMO

Devido às necessidades da indústria automotiva de maior eficiência energética associada a construção dos veículos, se faz necessária a redução de peso em sua fabricação. Para garantir estes resultados, além do aumento da segurança atribuída a estes projetos de engenharia, os Aços Avançados de Alta Resistência costumam ser selecionados para a fabricação dos componentes estruturais da carroceria, entre estes aços, os aços bifásicos. A estampagem é o processo de fabricação utilizado para estes componentes, e, por este fator, é importante estudar o comportamento destes materiais quando são alteradas as variáveis de processo na conformação, como o uso ou não de *drawbeads*, velocidade e força atribuídas ao punção, etc. Este trabalho buscou analisar as variações morfológicas na microestrutura do aço bifásico DP780 (ASTM A1079/2012) quando submetido ao ensaio de Nakazima modificado utilizando 4 diferentes tipos de *drawbead*: planar, circular, quadrado e triangular. O ensaio de Nakazima foi realizado em estudo anterior pelo Laboratório de Conformação da Universidade Federal do Paraná, LabConf. Neste estudo, foram analisadas as peças conformadas nas seguintes regiões de interesse: região de contato com o *drawbead*, região do raio da matriz e região ombro da matriz, onde ocorre a falha no ensaio de Nakazima. Para cada uma destas regiões foram medidas as durezas na escala Rockwell D e analisadas a microestrutura através de microscopia eletrônica por varredura e microscopia ótica. As imagens captadas foram estudadas com auxílio de um software de análise de imagens, ImageJ.JS. Os resultados de cada uma das análises de imagem e de dureza foram comparadas com resultados obtidos para uma amostra como recebida, ou seja, não havia sido submetida ao teste de Nakazima, e também foram comparados os resultados das peças conformadas entre si, em busca de analisar as diferenças provocadas pelo uso das diferentes geometrias de *drawbead* sobre a microestrutura do aço DP780. Os estudos mostraram que os efeitos da conformação provocam alterações visíveis na microscopia das peças quando comparadas à amostra como recebida, provocando maior encruamento devido à ocorrência de deformação plástica e maior anisotropia nas peças conformadas, e foi possível verificar que a geometria de *drawbead* circular é aquela que sugere uma maior restrição ao fluxo de escoamento do material. Essa comparação entre as peças conformadas no ensaio de Nakazima em diferentes configurações de *drawbead* mostra alterações sutis, tanto em sua morfologia quanto no resultado dos ensaios de dureza, sendo necessárias mais análises para comprovação de qual das geometrias é mais aplicável para cada situação em que são utilizadas na indústria.

Palavras-chave: DP780. *Drawbead*. Conformação. Microestrutura. Teste de Nakazima.

ABSTRACT

Due to the automotive industry's needs for greater energy efficiency associated with vehicle construction it is necessary to reduce weight in their manufacturing. To guarantee these results, in addition to the increased safety attributed to these engineering projects, Advanced High Strength Steels are usually selected for the manufacture of the body's structural components, including DualPhase steel. Stamping is the manufacturing process used for these components, and, for this reason, it is important to study the behavior of these materials when the process variables in the forming process are changed, such as the use or not of drawbeads, speed and force attributed to the punch, etc. This work sought to analyze the morphological variations in the microstructure of two-phase steel DP780 (ASTM A1079/2012) when subjected to the modified Nakazima test using 4 different types of drawbead: planar, circular, square and triangular. The Nakazima test was carried out in a previous study by the Conformation Laboratory of the Federal University of Paraná, LabConf. In this study, the formed parts were analyzed in the following regions of interest: contact region with the drawbead, matrix radius region and punch radius region, where failure occurs in the Nakazima test. For each of these regions, the hardness Rockwell D scale was measured and the microstructure was analyzed using scanning electron microscopy and optical microscopy. The captured images were studied using image analysis software, ImageJ.JS. The results of each of the image and hardness analyzes were compared with results obtained for a sample as received, that is, it had not been subjected to the Nakazima test, and the results of the formed parts were also compared with each other, in search of analyze the differences caused by the use of different drawbead geometries on the microstructure of DP780 steel. The studies showed that the effects of forming cause visible changes in the microscopy of the parts when compared to the sample as received, causing greater hardening due to the occurrence of plastic deformation and greater anisotropy in the formed parts, and it was possible to verify that the circular drawbead geometry is that which suggests a greater restriction on the flow of the material. This comparison between the pieces formed in the Nakazima test in different drawbead configurations shows subtle changes, both in their morphology and in the results of the hardness tests, requiring further analysis to prove which of the geometries is most applicable for each situation in which they are used. used in industry.

Keywords: DP780. Drawbead. Forming. Microstructure. Nakazima's test.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - ESQUEMA MOSTRANDO AS 3 REGIÕES ANALISADAS NOS CORPOS ENSAIADOS NO TESTE DE NAKAZIMA MODIFICADO..... | 19 |
| Figura 2 - DIAGRAMA CONTENDO A METODOLOGIA RESUMIDA DO PRESENTE TRABALHO..... | 19 |
| Figura 3 - RELAÇÃO ENTRE DUCTILIDADE E RESISTÊNCIA DE VÁRIAS CATEGORIAS DE AÇOS AMPLAMENTE UTILIZADOS NA ESTRUTURA DOS AUTOMÓVEIS..... | 22 |
| Figura 4 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MICROESTRUTURA BIFÁSICA | 23 |
| Figura 5 - MICROSCOPIA ÓPTICA DO AÇO BIFÁSICO (A) TÊMPERA INTERMEDIÁRIA (B) AÇO NÃO TEMPERADO..... | 24 |
| Figura 6 - PROCESSO MAIS COMUM DE FABRICAÇÃO DO AÇO BIFÁSICO..... | 25 |
| Figura 7 - DIFERENTES COMPOSIÇÕES DO AÇO BIFÁSICO CONFORME O PROCESSO DE FABRICAÇÃO..... | 26 |
| Figura 8 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO TESTE DE NAKAZIMA..... | 27 |
| Figura 9 - FERRAMENTAS UTILIZADAS NO TESTE DE NAKAZIMA (A) ESQUEMA DA FERRAMENTA (B) FERRAMENTA CONSTRUÍDA..... | 29 |
| Figura 10 - GRAU DE AFINAMENTO SIMULADO NO ENSAIO DE NAKAZIMA ATRAVÉS DE MEF..... | 30 |
| Figura 11 - REGIÃO MAIS PROVÁVEL DE FALHA NO ENSAIO DE NAKAZIMA..... | 30 |
| Figura 12 - COMPARATIVO DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO OBTIDA ATRAVÉS DE DIFERENTES MÉTODOS..... | 31 |
| Figura 13 - EXEMPLO DE GRADE UTILIZADA PARA ELABORAÇÃO DA CLC..... | 32 |
| Figura 14 - VARIAÇÃO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO NA FLANGE EM FUNÇÃO DA FORÇA DO PRENSA..... | 33 |
| Figura 15 - EXEMPLO DE ENRUGAMENTO DEVIDO A BAIXA FORÇA UTILIZADA NO PRENSA CHAPAS..... | 34 |
| Figura 16 - ESQUEMA DA UTILIZAÇÃO DO DRAWBEAD NA CONFORMAÇÃO DE UMA PEÇA..... | 35 |
| Figura 17 - DEFEITOS NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DECORRENTES DO USO INDEVIDO DO DRAWBEAD..... | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 18 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS FORÇAS DE RESTRIÇÃO IMPOSTAS PELO USO DO DRAWBEAD..... | 36 |
| Figura 19 - ZONAS DE PRESSÃO GERADAS PELO USO DE DRAWBEAD..... | 37 |
| Figura 20 - EXEMPLIFICAÇÃO DA MEDIÇÃO DE DUREZA ROCKWELL C (A) GRÁFICO DE FORÇA X TEMPO (B) GRÁFICO DE PROFUNDIDADE X TEMPO. . | 38 |
| Figura 21 - AMPLITUDE DAS ESCALAS DO ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL..... | 39 |
| Figura 22 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA (5000X) DOS AÇOS DP1200 E DP1400 | 40 |
| Figura 23 - MICROESTRUTURA DO AÇO BIFÁSICO LAMINADO À QUENTE..... | 41 |
| Figura 24 - MICROESTRUTURA DO AÇO BIFÁSICO LAMINADO À FRIO..... | 42 |
| Figura 25 - MICROSCOPIA ÓTICA DE UM AÇO BIFÁSICO, EVIDENCIANDO A PRESENÇA DE SUAS DIFERENTES FASES..... | 43 |
| Figura 26 - EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO BIFÁSICO SUBMETIDO À ENSAIO DE TRAÇÃO EM MICROSCOPIA ELETRÔNICA..... | 44 |
| Figura 27 - INFLUÊNCIA DA FORÇA ATRIBUÍDA AO PRENSA-CHAPAS NA CONFORMABILIDADE DO AÇO DP780..... | 48 |
| Figura 28 - CORPOS DE PROVA CONFORMADOS PELO ENSAIO DE NAKAZIMA | 48 |
| Figura 29 - ESQUEMA QUE DEMONSTRA AS REGIÕES DE ONDE FORAM RETIRADAS AS AMOSTRAS ANALISADAS NO PRESENTE TRABALHO..... | 49 |
| Figura 30 - AMOSTRAS RECORTADAS PARA ANÁLISE METALOGRÁFICA..... | 49 |
| Figura 31 - ESPECIFICAÇÕES DO AÇO BIFÁSICO ESTUDADO..... | 50 |
| Figura 32 - EXEMPLO DE EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DE DUREZA ROCKWELL..... | 51 |
| Figura 33 - EMBUTIDORA METALOGRÁFICA UTILIZADA..... | 52 |
| Figura 34 - EXEMPLO DE EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA LIXAMENTO E POLIMENTO DAS AMOSTRAS..... | 53 |
| Figura 35 - AMOSTRAS EMBUTIDAS E LIXADAS..... | 53 |
| Figura 36 - REGIÃO DE ANÁLISE PREFERENCIAL..... | 54 |
| Figura 37 - IMAGEM OBTIDA EM MICROSCOPIA ÓPTICA (100X) ABERTA NO SOFTWARE..... | 55 |
| Figura 38 - IMAGEM TRANSFORMADA PARA POSSIBILITAR O DESTACAMENTO DAS FASES..... | 56 |
| Figura 39 - DESTAQUE DAS FASES A SEREM ANALISADAS..... | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 40 - TABELA DE DADOS GERADAS A PARTIR DA ANÁLISE DA IMAGEM TRATADA..... | 57 |
| Figura 41 - GRÁFICO DE ANÁLISE GERADA A PARTIR DA TABELA DE DADOS NO SOFTWARE..... | 58 |
| Figura 42 - MICROSCOPIA ÓPTICA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD TRIANGULAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA..... | 62 |
| Figura 43 - MICROSCOPIA ÓPTICA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD PLANAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA..... | 63 |
| Figura 44 - MICROSCOPIA ÓPTICA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD CIRCULAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA..... | 64 |
| Figura 45 - MICROSCOPIA ÓPTICA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD QUADRADO, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA..... | 65 |
| Figura 46 - FASE MARTENSÍTICA DESTACADA PARA A PEÇA N, COM 100X DE AMPLIAÇÃO..... | 66 |
| Figura 47 - DESTAQUE DA FASE MARTENSÍTICA, PEÇA T2 E RT, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA..... | 68 |
| Figura 48 - DESTAQUE DA FASE MARTENSÍTICA, PEÇA C2 E RC, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA..... | 71 |
| Figura 49 - DESTAQUE DA FASE MARTENSÍTICA, PEÇA P2 E RP, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA..... | 73 |
| Figura 50 - DESTAQUE DA FASE MARTENSÍTICA, PEÇA Q2 E RQ, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA..... | 75 |
| Figura 51 - RESUMO DAS MICROSCOPIAS ÓPTICAS NA AMPLIAÇÃO DE 100X ANALISADAS NO SOFTWARE IMAGEJ.JS..... | 78 |
| Figura 52 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, PEÇA VIRGEM, AMPLIAÇÃO 1000X..... | 85 |
| Figura 53 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD TRIANGULAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA, AMPLIAÇÃO DE 1000X..... | 86 |

| | |
|--|----|
| Figura 54 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD CIRCULAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA, AMPLIAÇÃO DE 1000X..... | 87 |
| Figura 55 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD PLANAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA, AMPLIAÇÃO DE 1000X..... | 88 |
| Figura 56 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD QUADRADO, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA, AMPLIAÇÃO DE 1000X..... | 89 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| GRAFICO 1 - ANÁLISE DE VALORES OBTIDOS PARA DUREZA..... | 60 |
| GRAFICO 2 - GRÁFICO DE CIRCULARIDADE X ÁREA OBTIDO A PARTIR DA ANÁLISE MORFOLÓGICA DA FASE MARTENSÍTICA DA PEÇA N..... | 67 |
| GRAFICO 3 - GRÁFICOS DE CIRCULARIDADE X ÁREA, PEÇA T2 E RT, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAI0 DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA | 69 |
| GRAFICO 4 - GRÁFICOS DE CIRCULARIDADE X ÁREA, PEÇA C2 E RC, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAI0 DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA | 72 |
| GRAFICO 5 - GRÁFICOS DE CIRCULARIDADE X ÁREA, PEÇA P2 E RP, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAI0 DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA | 74 |
| GRAFICO 6 - GRÁFICOS DE CIRCULARIDADE X ÁREA, PEÇA Q2 E RQ, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAI0 DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA | 76 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - ENSAIOS DE NAKAZIMA MODIFICADO REALIZADOS NO ESTUDO DE OLIVEIRA (2021)..... | 46 |
| Tabela 2 - CÓDIGOS ASSOCIADOS AOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS NESTE ESTUDO..... | 47 |
| Tabela 3 - VALORES OBTIDOS NOS TESTES DE DUREZA ROCKWELL D..... | 59 |

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

| | |
|------|--|
| AAAR | - Aços Avançados de Alta Resistência |
| AHSS | - <i>Advanced High Strength Steel</i> |
| CLC | - Curva Limite de Conformação |
| DP | - <i>Dual Phase</i> |
| FLC | - <i>Forming Limit Curve</i> |
| HSLA | - <i>High Strength Low Alloy</i> |
| HSS | - <i>High Strength Steel</i> |
| MEF | - Método dos Elementos Finitos |
| MEV | - Microscopia Eletrônica de Varredura |
| TRIP | - <i>Transformation Induced Plasticity</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA..... | 16 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 17 |
| 1.2.1 Objetivo geral..... | 17 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 18 |
| 1.3 METODOLOGIA..... | 18 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA..... | 20 |
| 2.1 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA..... | 20 |
| 2.2 AÇO BIFÁSICO (<i>DUAL PHASE - DP</i>)..... | 23 |
| 2.3 TESTE DE NAKAZIMA..... | 26 |
| 2.4 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC)..... | 30 |
| 2.5 ANTI-RUGAS (<i>DRAWBEAD, DB</i>)..... | 32 |
| 2.6 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL..... | 37 |
| 2.7 ENCRUAMENTO..... | 40 |
| 2.8 MICROSCOPIA ÓTICA E ELETRÔNICA..... | 42 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 45 |
| 3.1 SELEÇÃO DAS AMOSTRAS..... | 45 |
| 3.2 ENSAIO DE DUREZA..... | 50 |
| 3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA..... | 51 |
| 3.4 CONFIGURAÇÃO DO SOFTWARE DE ANÁLISE DE IMAGENS..... | 54 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 59 |
| 4.1 ENSAIO DE DUREZA..... | 59 |
| 4.2 MICROSCOPIA ÓTICA..... | 61 |
| 4.3 ANÁLISE DAS IMAGENS ATRAVÉS DO SOFTWARE..... | 66 |
| 4.4 IMAGENS OBTIDAS ATRAVÉS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)..... | 78 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 80 |
| 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 80 |
| REFERÊNCIAS..... | 82 |
| APÊNDICE 1 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA..... | 85 |

1 INTRODUÇÃO

A necessidade da indústria automotiva de tornar os veículos mais seguros e reduzir a emissão de carbono faz com que os aços avançados de alta resistência sejam cada vez mais utilizados nos processos de fabricação. Esses aços possuem propriedades que aumentam sua resistência, fazendo com que os mesmos sejam mais resistentes ao impacto quando comparados aos aços convencionais, porém, ao contrário dos aços convencionais, nos quais ocorre a perda de ductilidade com o aumento da resistência mecânica, os AHSS (*Advanced High Strength Steels*) conseguem manter uma boa ductilidade – característica importante para a fabricação de peças de veículos através de processos de conformação (Gorni, 2008). Além disso, os mecanismos de fabricação dos AHSS os tornam mais competitivos em relação a outros materiais de baixa densidade, como o alumínio por exemplo, tornando-os economicamente mais viáveis (Hulka, 2002).

O Dual Phase (DP) é um aço avançado de alta resistência, e objeto desse estudo, cuja microestrutura é composta por uma matriz macia ferrítica e uma composição entre 10-40% de martensita, um componente duro que fica disperso na matriz, conforme Kuziak et al, 2008, descrevem em seu trabalho. Ainda segundo Kuziak et al., o DP possui menor razão entre seu limite de escoamento e resistência à tração, sendo um aço indicado para produção de peças que estarão sujeitas à conformação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Dentre os processos de fabricação existentes na indústria metal/mecânica, os mais utilizados para fabricação de peças automotivas, principalmente a carenagem do veículo, são os processos de conformação.

Uma metodologia amplamente utilizada na conformação de peças de grande porte, como na fabricação de elementos da carroceria de um automóvel, por exemplo, é a inserção de *drawbeads* na matriz de conformação, visto que esses elementos colaboram com o escoamento mais uniforme do material na matriz, fazendo com que o componente fabricado possua qualidade superior do que aqueles fabricados sem o uso deste mecanismo.

Sendo assim, em um estudo anterior do grupo de pesquisas do LabConf (Laboratório de Conformação) realizado por Oliveira (2021), do Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, foram realizados ensaios de Nakazima modificados, para avaliar o efeito de diferentes formatos de *drawbead* na conformação do aço Dual Phase 780, e traçar suas respectivas curvas limite de conformação.

A partir deste trabalho, surgiu também a necessidade de avaliar a microestrutura das amostras submetidos a este teste, para avaliar os principais impactos da alteração do formato dos *drawbeads* na microestrutura deste aço conformado, permitindo assim visualizar o efeito dessa alteração na resposta mecânica do material.

1.2 OBJETIVOS

Este estudo tem por objetivo principal, dar continuidade ao trabalho realizado por Oliveira, 2021, no Laboratório de Conformação da Universidade Federal do Paraná (LabConf), e aprofundar os resultados encontrados.

Em seu trabalho, Oliveira (2021) e Oliveira et al. (2022) estudaram chapas do aço DP780 submetendo-as ao ensaio de Nakazima modificado alterando a força do punção, dimensões do corpo de prova e alterando a geometria dos *drawbeads* utilizados. Para cada uma destas variações foi obtida a curva limite de conformação, que permite inferir sobre as condições do material conformado e foi avaliada a qualidade superficial dos corpos de prova após submetidos à conformação.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a microestrutura e a dureza do aço DP780, após submetido ao teste de Nakazima modificado com diferentes formatos de *drawbeads*, através de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e ensaio de dureza Rockwell D, identificando, pontuando e analisando as diferenças provocadas pela alteração das geometrias de *drawbead* na microestrutura e na dureza do material.

1.2.2 Objetivos específicos

Determinar uma metodologia que possibilite a análise qualitativa do encruamento sofrido pelos corpos de prova analisados, através do uso de softwares de análise das imagens (ImageJ.JS) obtidas através da microscopia ótica.

Avaliar a influência da geometria de *drawbead* utilizada no experimento de Nakazima modificado sobre a microestrutura e dureza superficial de cada uma das regiões selecionadas para estudo neste trabalho: região de contato da chapa com o *drawbead*, região do raio da matriz e região de ocorrência da trinca, e comparar a microestrutura de peças que foram submetidas ao ensaio com uma peça que não foi submetida ao teste de Nakazima, de maneira a acompanhar sua evolução microestrutural (antes e após o experimento).

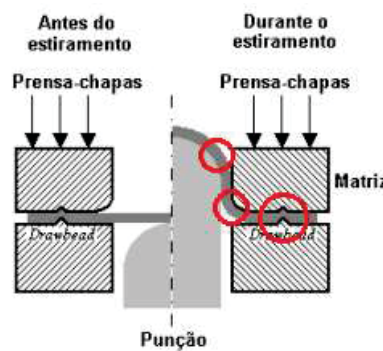
1.3 METODOLOGIA

As amostras do aço Dual Phase, ensaiadas através do teste de Nakazima modificado, com configurações de drawbead: 1. Planar, 2. Circular, 3. Quadrado e 4. Triangular, foram preparadas para análise metalográfica nas seguintes regiões do perfil de embutimento: Drawbead (região diretamente comprida pelo prensa-chapas), Raio da matriz (região na qual é evidenciada o maior escoamento durante o processo de conformação) e trinca. Foi preparada também uma amostra do mesmo material que não foi testada através de Nakazima, para ser utilizada como referência para as análises. Os corpos de prova foram submetidos aos seguintes estudos:

- Ensaio de Dureza – Foi utilizado o ensaio de dureza Rockwell D para analisar a dureza superficial de cada uma das amostras analisadas
- Microscopia Ótica – Foi realizada ao atacar a peça com o reagente Nital 3%, de maneira a revelar a dispersão de fases na matriz metalográfica, nas ampliações de 50X e 100X.
- Microscopia Eletrônica de Varredura – Realizada nas mesmas regiões observadas por meio da microscopia ótica. Foram obtidas tanto as imagens SEI (geradas pelos elétrons de alta resolução), quanto as imagens BSE (Imagem obtida dos elétrons retro espalhados, de baixa resolução), nas ampliações de 300X, 700X e 1000X.

Na FIGURA 1 é possível observar um esquema que mostra as três regiões analisadas no corpo de prova conformado por ensaio de Nakazima modificado. A região destacada mais à direita corresponde à região de contato com o *drawbead*, a região central corresponde à região do raio da matriz e a região mais à esquerda e superior às outras duas corresponde a região do ombro da matriz, onde ocorre a trinca. Na FIGURA 2 é possível observar o diagrama que resume a metodologia aplicada no presente trabalho.

Figura 1 - ESQUEMA MOSTRANDO AS 3 REGIÕES ANALISADAS NOS CORPOS ENSAIADOS NO TESTE DE NAKAZIMA MODIFICADO



FONTE: AUTORA (2023)

Figura 2 - DIAGRAMA CONTENDO A METODOLOGIA RESUMIDA DO PRESENTE TRABALHO



FONTE: AUTORA (2023)

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção serão introduzidos todos os assuntos de relevância para o estudo, que embasam o conhecimento necessário para compreensão da análise realizada e dos resultados obtidos.

2.1 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA

A indústria automobilística, na busca de projetos com custos 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 de tornar os componentes mais leves, sem perda de resistência e sem causar grandes impactos financeiros. Quando se combina um material com um processo termomecânico adequado, é possível obter inúmeras combinações de propriedades, tais como: alta resistência associada à ductilidade, tenacidade e conformabilidade. Com a existência de diferentes características mecânicas só se torna possível em decorrência da presença de diferentes microconstituintes, segundo Bhadeshia (2001), Bleck (2005) e Gorni (2008).

O desenvolvimento de novas ligas metálicas para a indústria automotiva é de grande importância, pois diversos projetos estão em andamento, envolvendo muitos 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 Jeanneau et al. (2000).

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. Um dos objetivos deste grupo é o desenvolvimento de ligas metálicas que possibilitem a manufatura de componentes de maior qualidade para garantir a segurança dos veículos fabricados, mantendo um baixo custo de fabricação, e conferindo consumo de combustível reduzido, proporcionado por uma redução na massa dos veículos e responsabilidade ambiental. O desenvolvimento oriundo dessa grande iniciativa foi à 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), conforme observado no trabalho de Shaw, et al. (2002). Este projeto foi avaliado satisfatoriamente em relação aos objetivos almejados principalmente no que se refere à segurança e redução no consumo de combustível.

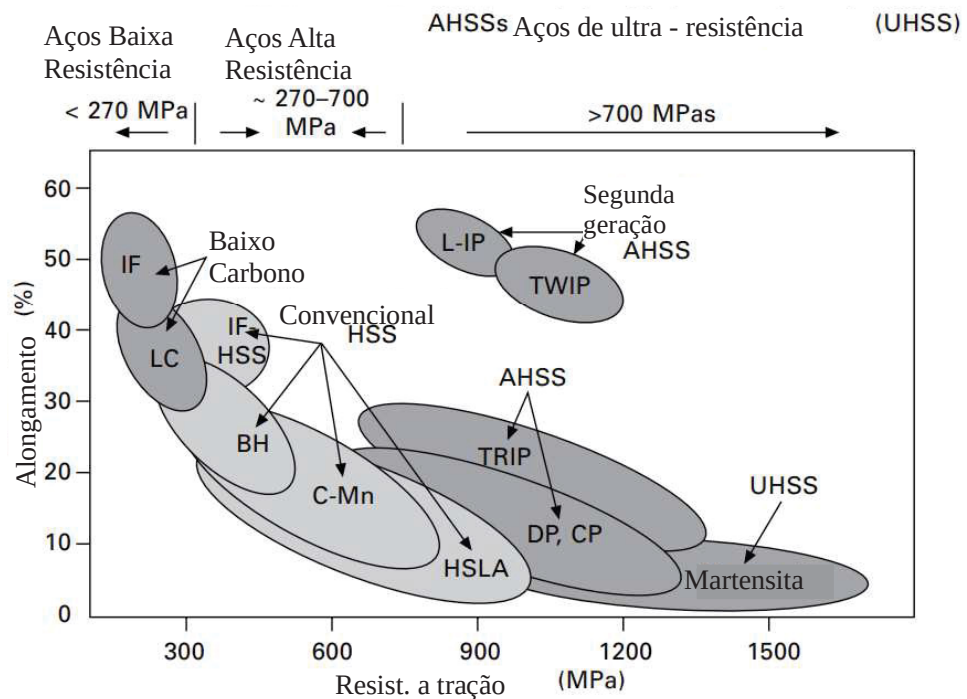
Abeyrathna et al. (2020) afirmam que os aços AHSS e os UHSS cada vez mais estão sendo usados na indústria automotiva em componentes de geometrias complexas, devido à sua maior resistência em relação aos aços convencionais e baixo custo associado à sua fabricação. No processo de fabricação destes aços são formadas bobinas para um armazenamento mais eficiente e após este processo é realizado o tratamento térmico de acordo com as especificações do cliente final. Nestes processos de fabricação, o material destas bobinas pode ter formações heterogêneas (por exemplo, a formação de diferentes fases que não são esperadas para determinado material, formação de compostos com os elementos de liga diferentes daqueles especificados inicialmente, etc.) na sua estrutura em uma mesma bobina, esse problema de formação pode causar alterações de conformabilidade no produto, como a ocorrência de defeitos. Por isso é importante que se realize estudos experimentais para entender o comportamento das diversas ligas de aços de alta resistência que existem na indústria automotiva.

Schmid et. al. (2017) usaram ligas de aço DC 04 e DP 800 e uma liga de alumínio AA6014, todos com espessura de um milímetro e amplamente usados na indústria automotiva em diferentes componentes, em seus estudos sobre o comportamento de falhas, em especial o enrugamento, que possam ocorrer em chapas metálicas de diferentes características químicas e mecânicas no processo de embutimento após e antes de passar pelos antirrugos ou *drawbead*, evidenciando a necessidade de mais estudos quanto ao uso dos AHSS, bem como de outros aços e materiais amplamente utilizados pela indústria automotiva.

A FIGURA 3 é uma comparação da família de aços de alta resistência utilizados na carroceria dos automóveis e permite comparar as características do limite de escoamento e ductilidade destes tipos de aços utilizados na indústria automotiva. O aumento do nível de resistência mecânica do produto leva quase inevitavelmente à redução de seu alongamento total, ou seja, de sua estampabilidade. Contudo, o uso de microestruturas adequadas permite minimizar a

perda de ductilidade mesmo para maiores níveis de resistência mecânica, (HORVATH, 2021). No diagrama de ashby, é possível visualizar a relação entre o alongamento e a resistência à tração de diferentes aços. Através do gráfico é possível verificar que os AHSS possuem maior resistência à tração para um mesmo nível de alongamento quando comparados aos aços convencionais e aos HSS (*High Strength Steel* – Aços de Alta Resistência).

Figura 3 - RELAÇÃO ENTRE DUCTILIDADE E RESISTÊNCIA DE VÁRIAS CATEGORIAS DE AÇOS AMPLAMENTE UTILIZADOS NA ESTRUTURA DOS AUTOMÓVEIS

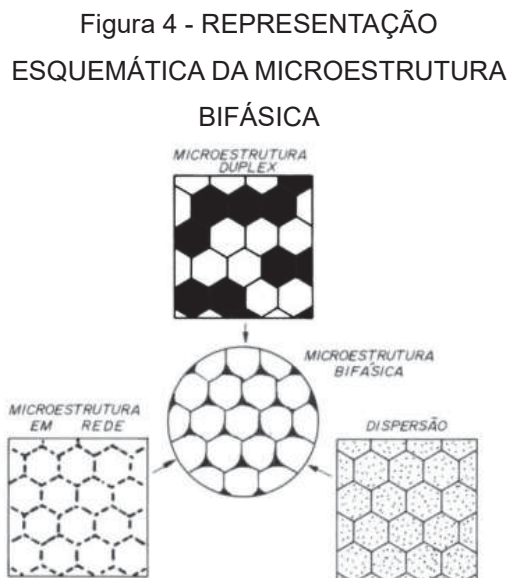


As características mecânicas das diversas ligas de aços da família dos AHSS, utilizados na indústria automotiva, são obtidas através dos tratamentos termomecânicos ao qual cada um destes materiais é submetido em sua fabricação. O Aço Bifásico por exemplo, normalmente é submetido à laminação à quente, possibilitando a transformação da austenita em ferrita e posterior resfriamento abrupto, que possibilita a formação das ilhas de martensita em sua microestrutura. Essas particularidades no processo de fabricação de cada um destes materiais tem influência direta no processo de produção por conformação mecânica, pois os materiais se tornam mais resistentes sem a perda do alongamento. Por este motivo

é importante o desenvolvimento de pesquisa para entender o comportamento e o fluxo do material na estampagem de peças de toda a carroceria dos diversos modelos fabricados nas diversas indústrias automotivas espalhadas pelo mundo.

2.2 AÇO BIFÁSICO (*DUAL PHASE - DP*)

O aço Dual Phase é uma liga ferrosa constituída por uma microestrutura bifásica, onde uma fase mais resistente, normalmente martensítica, fica dispersa na matriz mais dúctil, composta por ferrita. A FIGURA 4 mostra como a disposição dessas fases pode ocorrer nesse tipo de microestrutura. Através da análise da figura, pode-se verificar que a fase martensítica pode estar dispersa de diferentes formas na matriz ferrítica. Na microestrutura em rede, a fase martensítica fica dispersa apenas nos contornos de grão do material, a fase martensítica se encontra dispersa na formação de cada um dos grãos, enquanto na microestrutura duplex, há grãos de martensita dispersos na matriz ferrítica. A configuração da fase martensítica depende da composição do aço e das variáveis utilizadas em seu processo de fabricação.



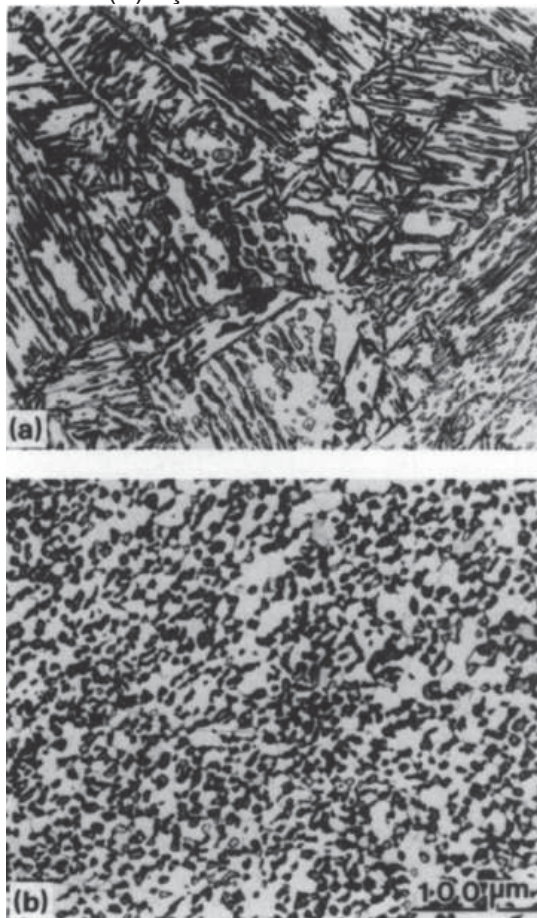
FONTE: GORNI, 2008.

Conforme descreve Hulka (2002) em seu trabalho, a microestrutura do aço afeta a curva de tensão x deformação, visto que a deformação plástica do aço é

determinada pela fase mais dúctil. Ao submeter o material a um nível maior de tensão, o microconstituente mais resistente é, acionado mecanicamente, conferindo assim maior resistência ao material.

A quantidade de martensita, com relação à ferrita, pode variar na composição desses aços. Em seu estudo, Kim, et al. (1986) demonstram, através de ensaios de tração, microscopia óptica e microscopia eletrônica em diferentes tipos de aços bifásicos, que as amostras que continham quantidades aproximadamente iguais de ferrita e martensita distribuídas igualmente, em morfologia mais refinada (*needle-like*, “forma de agulha” – FIGURA 5), apresentaram uma combinação ótima de resistência à tração e ductilidade, resistindo melhor ao teste de impacto, devido à fração do volume da martensita presente nesta composição.

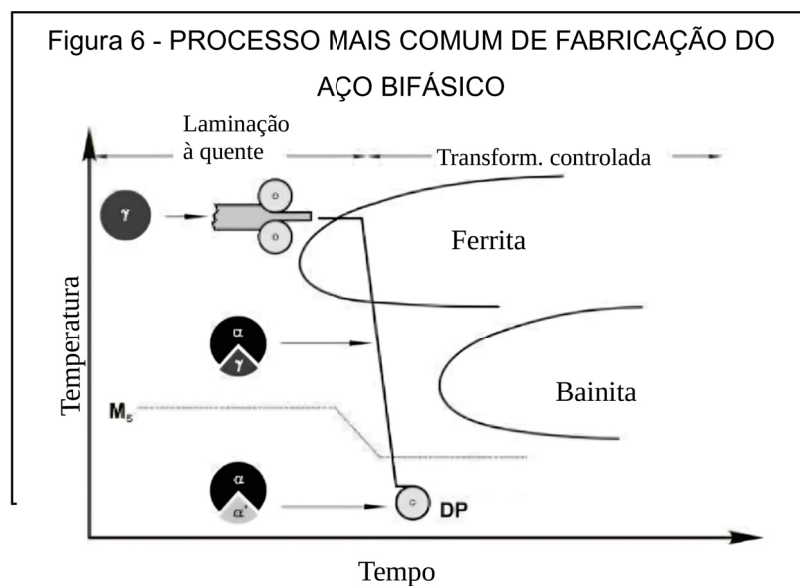
Figura 5 - MICROSCOPIA ÓPTICA DO AÇO BIFÁSICO (A) TÊMPERA INTERMEDIÁRIA (B) AÇO NÃO TEMPERADO



FONTE: KIM ET AL., 1986

Devido a essa configuração, o aço bifásico é utilizado na indústria automotiva, juntamente a outros AHSS. Quando comparadas as propriedades do DP com o aço TRIP (transformation induced plasticity), outro AHSS, foi possível observar que a fabricação do DP possui custo menor de fabricação, além de ser observado que o DP possui maior capacidade de absorver energia, demonstrando mais que 10% de alongamento, segundo estudo realizado por Oliver et al. (2007)

O DP normalmente é fabricado na indústria metalúrgica conforme explica Kuziak et al. (2008) em seu trabalho: O aço deve ser laminado à quente, possibilitando a transformação da austenita na matriz ferrítica (FIGURA 6), e então resfriado abruptamente para possibilitar a formação das ilhas de martensita. Há também a possibilidade de formação de ilhas de bainita, dependendo da forma como a transformação controlada ocorre especialmente nos casos onde o processamento do aço ocorre por laminação à quente, conforme também observado na FIGURA 6.



FONTE: KUZIAK ET AL. (2008)

Rashid et al. (1981) mostra em seu artigo de análise sobre o processamento do aço bifásico na indústria que existem outras maneiras de realizar a fabricação deste aço. Em todas elas, é necessário realizar a têmpera, ou seja, o tratamento térmico que possibilita a formação martensítica na microestrutura deste aço.

O autor revela ainda que, além da martensita e da bainita, que são as fases mais resistentes e esperadas para este aço, é possível que seja formado também a

perlita, microconstituente composto por cementita e ferrita obtido normalmente através de resfriamento lento, e pode ocorrer a formação de carbonetos nos contornos de grão deste aço, devido aos elementos de liga mais comuns de serem adicionados em sua composição, conforme mostrado na FIGURA 7.

Figura 7 - DIFERENTES COMPOSIÇÕES DO AÇO BIFÁSICO CONFORME O PROCESSO DE FABRICAÇÃO

| Referência | Resfriamento | Composição, wt. % |
|-----------------------------|------------------|--|
| Recozimento Contínuo | | |
| Hayami (1) | Ar - natural | 0.09 C, 0.92 Si, 0.97 Mn, 0.32 Cr |
| Matsuoka and Yamomouri (11) | Água | 0.07 C, 0.39 Si, 2.96 Mn, |
| Rashid (2) | Ar - natural | 0.12 C, 0.51 Si, 1.46 Mn, 0.11 V |
| Bucher (14) | Ar - rápido | 0.11 C, 0.5 Si, 1.4 Mn, 0.06 V |
| Laminação a quente | | |
| Coldren (16) | Ar - natural | 0.06 C, 0.9 Si, 1.2 Mn, 0.6 Cr, 0.4 Mo |
| Recozimento por lote | | |
| Parker (23) | Fornalha (14°/h) | 0.08 C, 0.3 Si, 3.0 Mn |

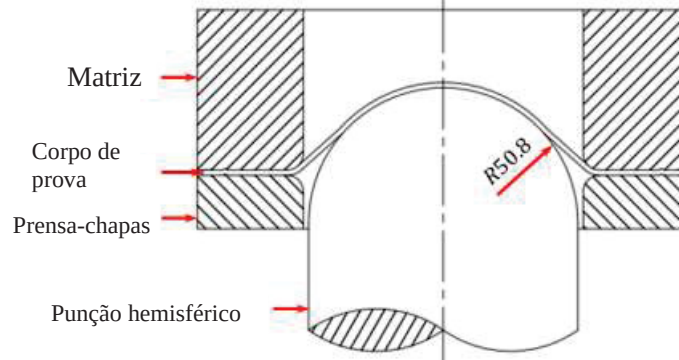
^aI = intercritical, S = supercritical.

FONTE: RASHID ET AL. (1981)

2.3 TESTE DE NAKAZIMA

O teste de Nakazima é utilizado para obtenção das Curvas Limite de Conformação (CLC) para diferentes tipos de chapas, especialmente àquelas de aços avançados de alta resistência. Ele consiste na realização de um embutimento na chapa do material que se deseja analisar, conforme o esquema mostrado na FIGURA 8.

Figura 8 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO TESTE DE NAKAZIMA



FONTE: ZHANG ET AL. (2017)

Segundo Tigrinho et al. (2005) o teste de Nakazima consiste na utilização de punção hemisférico com diâmetro de 100mm, raio do punção de 50mm e matriz com diâmetro de 106mm – sendo esta metodologia utilizada para análise de chapas de aço com até 3mm de espessura. O ensaio deve ser realizado utilizando velocidade controlada e constante, e o corpo de prova deverá ser marcado com uma malha geométrica, normalmente sendo utilizada uma malha circular, que possibilite a medição dos alongamentos após a realização do ensaio. O ensaio deverá ser conduzido até a ruptura do material, que deve ocorrer em apenas um dos lados do copo estampado.

Poderá ser realizada a modificação no ensaio ao alterar suas propriedades, como por exemplo, no estudo de Tigrinho et al. (2005) foram utilizados diferentes tipos de lubrificantes durante a realização do ensaio, sendo que o ensaio de Nakazima é normalmente efetuado sem a utilização destes lubrificantes. Pode ser alterada também a força aplicada no prensa-chapas, por exemplo, e também a aplicação de drawbeads no prensa-chapaz, conforme o objeto deste estudo.

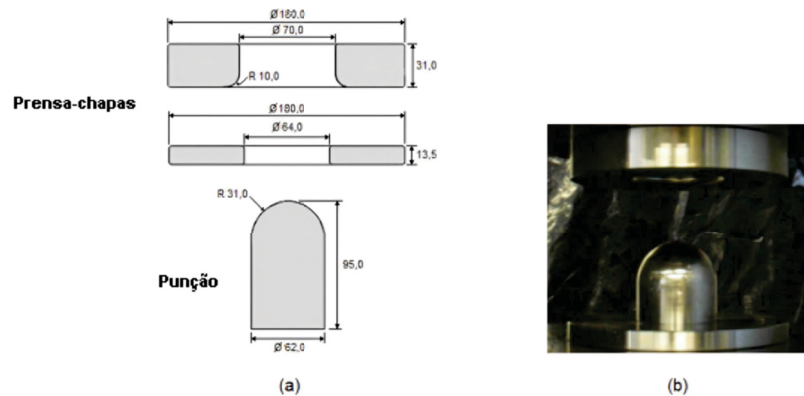
Existem mais testes associados à geração das curvas limite de conformação, porém o teste de Nakazima é aquele que melhor se aplica no estudo dos AHSS, conforme Santos (2007) e Feistle et al. (2022) mostram em seus estudos. Ainda existem questões relacionadas a variabilidade dos parâmetros na realização do teste de Nakazima, como o efeito da fricção, velocidade e força associados ao puncionamento, que continuam sendo objetos de estudo.

Em seu estudo, Feistle et al. realizam uma comparação entre um aço com alta quantidade de manganês FeMn900 e um aço bifásico 650/980 quanto à sua

suscetibilidade à ocorrência de trincas, e neste estudo, o autor tem por objetivo estudar o mecanismo de ocorrência de trinca nos processos de conformação, através de diferentes metodologias e testes. Este estudo foi realizado com base no teste de Nakazima, cuja conformação da chapa deve ser realizada até a ocorrência da fratura (sendo a região ideal para ocorrência da trinca a área do raio da matriz) e com base em ensaios de tração. No trabalho, o aço FeMn900 exibiu deformabilidade superior, apesar de seu módulo de elasticidade reduzido em relação ao aço DP 650/980. Como o objetivo do trabalho é apenas o estudo das trincas através de diferentes tipos de testes, os autores não se aprofundam no porquê desta diferença na deformabilidade. Porém nesse estudo foram utilizados materiais comumente utilizados nos processos conformativos, e o aço bifásico foi selecionado junto do FeMn900 devido à sua ampla usabilidade neste tipo de processo de fabricação.

Bornancin et al. (2023) realizam em seu estudo uma comparação entre o teste de Nakazima e o método de Banabic - método mais recente para obtenção das CLCs. Em seu estudo, Banabic et al (2010) desenvolvem uma nova metodologia, utilizando um formato diferente de estampagem, mais voltado para a análise computacional através de softwares que possibilitam a análise por elementos finitos - para obtenção das curvas limite de conformação (CLCs). Ambos os testes são realizados sobre o aço DP600 e ambos são desenvolvidos através de simulação numérica utilizando o método dos elementos finitos para obtenção da CLC para cada um dos métodos. Nesse estudo, Bornancin et al. (2023) puderam concluir que o método de Banabic possui vantagens quando comparado ao teste de Nakazima (FIGURA 9) devido a maior facilidade de indução da fratura próximo ao pólo do punção, para as mesmas condições de fricção, e pela maior facilidade associada à confecção dos corpos de prova. No entanto, o método Nakazima é mais conhecido e mais utilizado na indústria, sendo necessários mais estudos como este para comprovação da efetividade do método de Banabic, um método relativamente novo, para obtenção das CLC.

Figura 9 - FERRAMENTAS UTILIZADAS NO TESTE DE NAKAZIMA (A)
ESQUEMA DA FERRAMENTA (B) FERRAMENTA CONSTRUÍDA



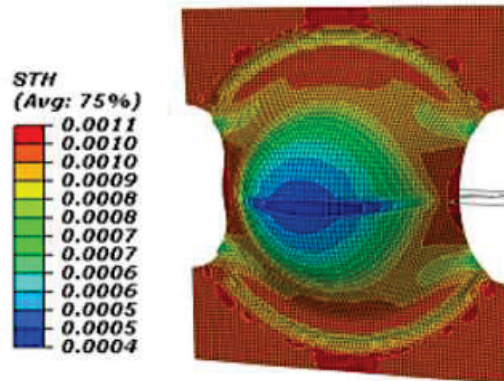
FONTE: BORNANCIN ET AL. (2023)

Alipour et al. (2019) realizam uma análise através do método de elementos finitos (MEF) do ensaio de Nakazima em um aço bifásico utilizando corpos de prova com diferentes dimensões, na busca de analisar o efeito da morfologia da martensita sobre a conformabilidade do aço estudado.

Em seus testes, os autores realizam tanto o procedimento experimental em laboratório quanto a simulação computacional referente ao mesmo processo, de maneira a determinar com precisão o local de ocorrência da falha para o processo.

Na FIGURA 10 é demonstrado o grau de diminuição da espessura sofrida pela peça, indicando a região com maior probabilidade de ocorrência do empescoçamento, ou seja, de falha, na cor azul. É possível notar por meio desta imagem que a maior deformação é causada na região do ombro da matriz. No raio da matriz ocorre uma deformação plástica semelhante a uma dobra, o que não acarreta em perda de espessura nesta região. Neste trabalho não foi analisado o efeito do *drawbead*.

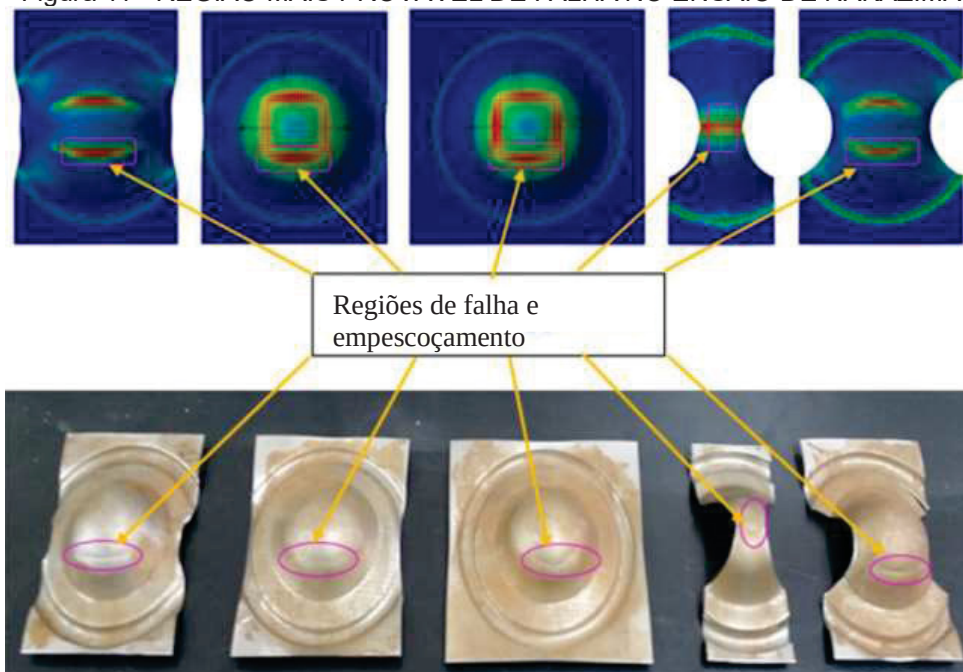
Figura 10 - GRAU DE AFINAMENTO
SIMULADO NO ENSAIO DE NAKAZIMA
ATRAVÉS DE MEF



FONTE: ALIPOUR ET AL. (2019)

Na FIGURA 11 os autores demonstram com precisão as regiões mais prováveis de falha ao realizar o teste de Nakazima com diferentes corpos de prova e mostra que seu método é válido pois foi preciso em prever as regiões com maior probabilidade de falha ao comparar com os ensaios feitos em laboratório.

Figura 11 - REGIÃO MAIS PROVÁVEL DE FALHA NO ENSAIO DE NAKAZIMA



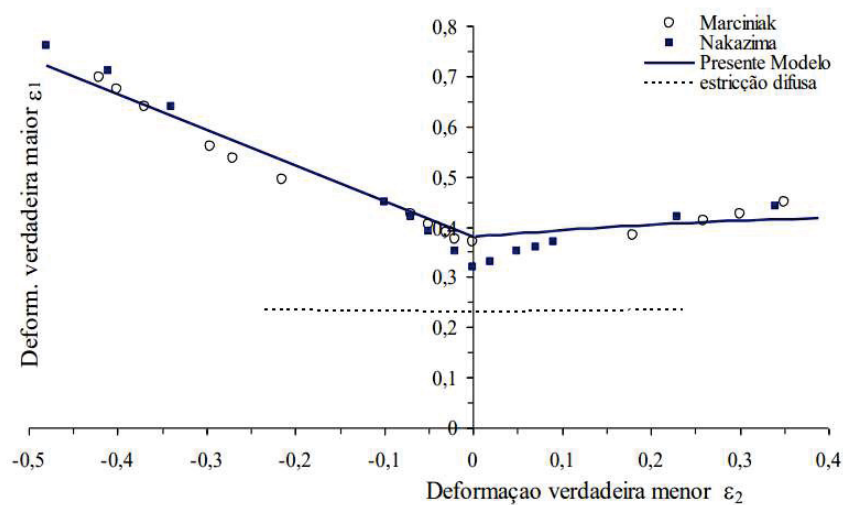
FONTE: ALIPOUR ET AL. (2019)

2.4 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC)

A curva de limite de conformação (CLC, ou *forming limit curve, FLC*) é de extrema importância no processo de estampagem de aços avançados de alta resistência (AHSS) porque fornece uma maneira conveniente de prever a falha de chapas metálicas durante o processo de estampagem. Ela é determinada por meio de extensas investigações experimentais e teóricas, experimentalmente através dos testes de Nakazima ou teste de Marciniack por exemplo, – no primeiro é utilizado punção hemisférico, enquanto no segundo é utilizado punção cilíndrico com bordas arredondadas, entre outras variáveis que podem diferir entre estes testes - e sua realização é crucial para garantir a integridade e a qualidade das peças estampadas, conforme observado no estudo de Santos et al (2007). Santos et al (2007) também desenvolveram uma análise através de modelo computacional para comparação entre estes métodos, sendo que as CLCs obtidas em seu estudo podem ser observadas na FIGURA 12.

Além disso, a CLC é influenciada pela temperatura da chapa, o que destaca a importância de considerar a variação de temperatura da chapa na predição da conformabilidade. Portanto, a compreensão e aplicação da CLC são fundamentais para o sucesso dos diferentes processos de estampagem dos avançados de alta resistência, conforme observado no trabalho de Ma et al. (2017).

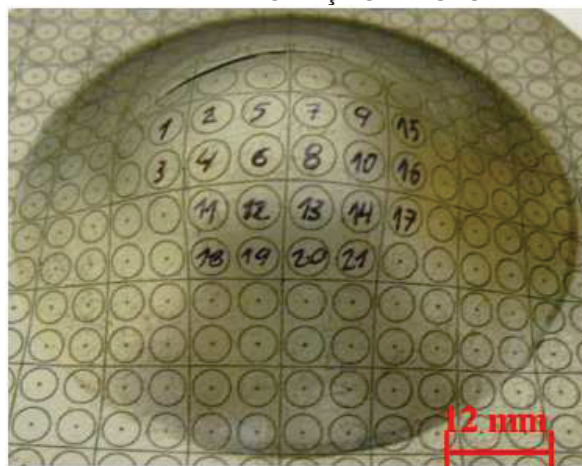
Figura 12 - COMPARATIVO DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO
OBTIDA ATRAVÉS DE DIFERENTES MÉTODOS



FONTE: DOS SANTOS, 2007.

Para obtenção da CLC, deve ser gravada na chapa que será utilizada como corpo de prova para o teste uma grade que possibilitará a medição das regiões conformadas. No trabalho de Bornancin et al (2023) foi utilizada uma grade circular. Após a realização do teste, são selecionadas elipses para que seja realizada a medição (conforme demonstrado na FIGURA 13). Com base nesta medição, são elaboradas as Curvas Limite de Conformação.

Figura 13 - EXEMPLO DE GRADE UTILIZADA PARA ELABORAÇÃO DA CLC



FONTE: BORNANCIN ET AL. (2023)

2.5 ANTI-RUGAS (*DRAWBEAD, DB*)

Um dos fatores de grande importância no processo de produção de peças estampadas e objeto de estudo de diversos pesquisadores é a prensa-chapas. Esse componente tem a função de restringir ou travar totalmente a chapa metálica no instante em que o punção é acionado para conduzir o material para o interior da matriz, possibilitando assim a conformabilidade do material.

Chemin (2013) constatou que a força do prensa-chapas tem influência na conformabilidade do aço DP 600. Ele usou três cargas distintas no prensa-chapas para restringir a movimentação do material. Observou-se, conforme a FIGURA 14, que o aumento da carga em toneladas força, melhorou a conformabilidade do material.

Figura 14 - VARIAÇÃO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO NA FLANGE EM FUNÇÃO DA FORÇA DO PRENSA



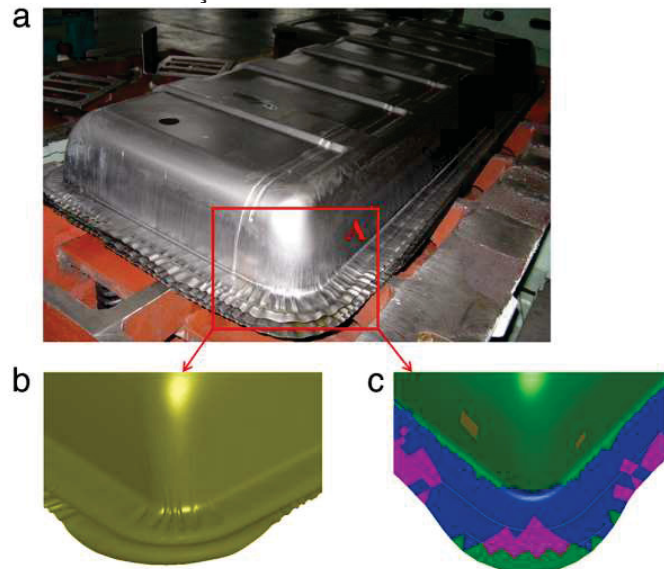
FONTE: CHEMIN, 2013

Já KOVÁČ et al. (2010) desenvolveram um modelo de simulação numérica usando elementos finitos para definir a força de restrição do prensa-chapas, que pode ser definido como a soma da força de flexão e fricção, e é o principal parâmetro para controlar a conformabilidade de um produto.

O *drawbead* é montado ou conectado no prensa-chapas e o valor da força do prensa-chapas depende da geometria do *drawbead*. A definição da força de restrição da prensa-chapas é considerada uma variável de processo e é prevista no estágio inicial do projeto da ferramenta.

A prensa-chapas pode ser projetada com ou sem *drawbead* (cordão de restrição), sempre com o objetivo de restrição do material ou do seu fluxo para o interior da matriz. O *drawbead* é inserido no projeto da prensa-chapas quando ela não é capaz de restringir o fluxo do material em posições críticas da peça, e nestas áreas é inserido o *drawbead* para reter ainda mais o fluxo do material. Ele deve estar previsto no projeto em posições estratégicas da ferramenta de estampagem ou nas áreas críticas, onde o fluxo em excesso do material pode comprometer a qualidade do produto. Causando, por exemplo, rugas conforme FIGURA 15, e trincas.

Figura 15 - EXEMPLO DE ENRUGAMENTO DEVIDO A
BAIXA FORÇA UTILIZADA NO PRENSA CHAPAS



FONTE: WANG, 2017

Wang et al (2017) desenvolveram um método de simulação de elementos finitos e realizou testes experimentais para validação deste método. Constatou-se, conforme a FIGURA 14, que o design da ferramenta tem influência no formato final da peça. No processo de estampagem profunda ou embutimento pode ocorrer o *springback* (retorno elástico), enrugamento de partes críticas e até mesmo trincas no produto. Na simulação constatou que, se utilizado o *drawbead*, a qualidade da estampagem tem uma melhora considerável.

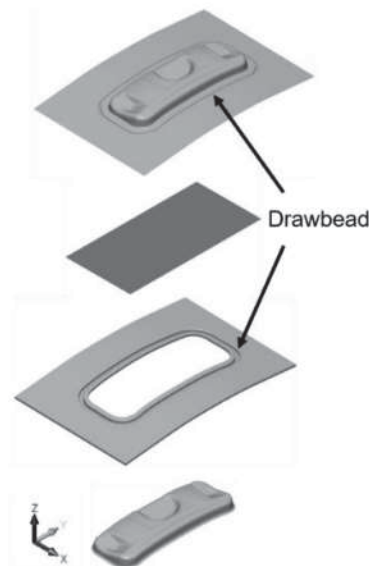
Segundo Wang et al (2017), o *drawbead* é um dos componentes mais importantes para controlar o fluxo de material e a qualidade da peça no processo de conformação. A força de restrição dos *drawbeads* está principalmente relacionada com a sua geometria, por isso a qualidade da conformação de peças de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

De acordo com Maier et al. (2011) o *drawbead* tem influência considerável na quantidade de deformação sofrida pela peça, visto que ele restringe o movimento da chapa, o que, somado à carga imposta pelas ferramentas de estampagem, pode causar o estiramento, levando a reduções da espessura na chapa metálica quando se compara com o mesmo produto estampado sem a utilização de *drawbead*.

Haase et al. (2018) utilizaram o método de elementos finitos para desenvolver um modelo de simulação computadorizado para analisar o

comportamento do material DP 500 no processo de conformação, conforme a FIGURA 16.

Figura 16 - ESQUEMA DA UTILIZAÇÃO DO DRAWBEAD NA CONFORMAÇÃO DE UMA PEÇA



FONTE: HAASE ET AL. (2018)

As simulações foram realizadas com e sem a utilização do *drawbead*, e com o auxílio da curva limite de conformação (CLC) foi possível obter dados importantes do comportamento do material DP 500. Após as simulações, considerando a curva CLC do material DP 500, foi possível comparar se houve melhoras na conformação do material em estudo.

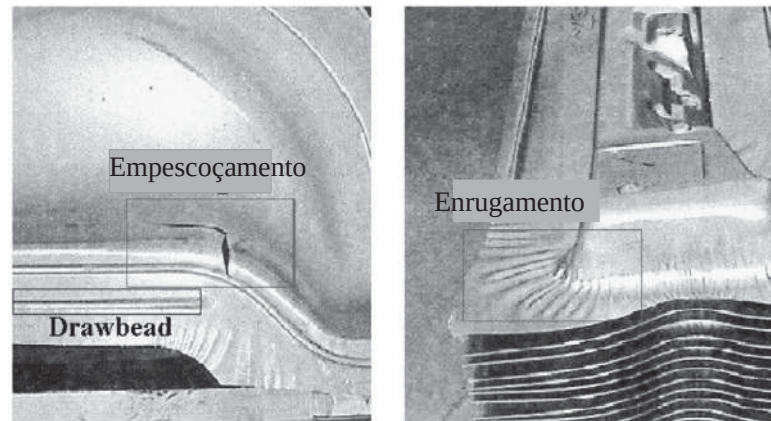
Para Haase et. al. (2018), durante o processo de estampagem, em função da geometria da peça que se deseja produzir podem ocorrer a redução ou aumento na espessura da chapa em diferentes regiões, resultando em enrugamento ou fraturas em casos extremos.

As forças de restrição do *drawbead* são um parâmetro que tem influência na qualidade de peças estampadas e a sua geometria pode aumentar ou diminuir o fluxo do material para o interior da matriz.

Segundo Naceur et. al. (2001) o *drawbead* é um dos parâmetros mais importantes para controlar o fluxo do material no processo de conformação, portanto

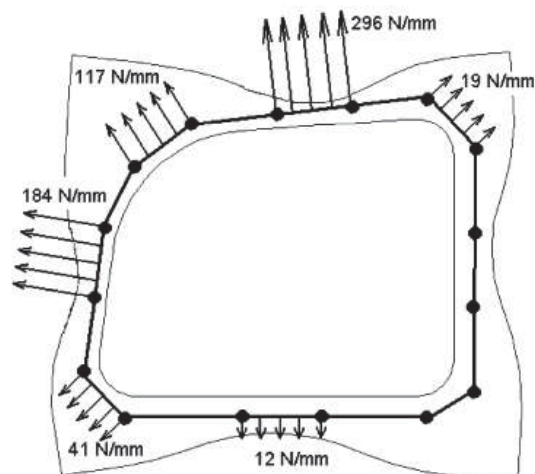
forças de restrição muito fortes impedem a folha de escoar e pode causar estrias, mas forças insuficientes podem levar a rugas conforme FIGURA 17. As forças de restrição causadas pelo *drawbead* são sempre positivas, mas podem ser negativas, para estudar onde a tração deve ser evitada ou facilitada conforme FIGURA 18.

Figura 17 - DEFEITOS NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO
DECORRENTES DO USO INDEVIDO DO DRAWBEAD



FONTE: Naceur (2001)

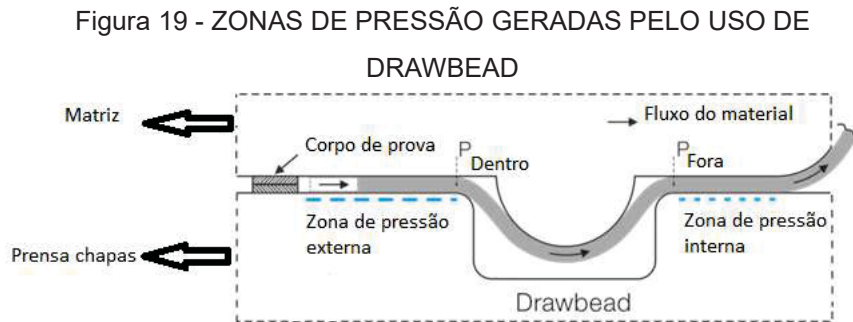
Figura 18 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS
FORÇAS DE RESTRIÇÃO IMPOSTAS PELO
USO DO DRAWBEAD



FONTE: Naceur (2001)

Leocata et. al. (2019^a) defendem que a força de restrição varia para diferentes zonas de pressão do *drawbead*. Os autores observaram que o fluxo através do cordão causa um desgaste superficial, o que diminui a sensibilidade do

atrito às variações em relação à quantidade de lubrificante. Como resultado, a dispersão da força de restrição devido a efeitos de atrito é menor para a zona de pressão interna do que para a zona de pressão externa conforme FIGURA 19.



FONTE: LEOCATA (2019)

Para mensurar as forças de restrições dos *drawbeads* e o coeficiente de conformabilidade dos aços de alta resistência os ensaios são de grande importância para validação dos resultados obtidos e estes devem ter uma excelente confiabilidade. Diferentes autores vêm desenvolvendo ensaios e equipamentos para testes experimentais, para validação de seus trabalhos, conforme os trabalhos citados anteriormente.

2.6 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL

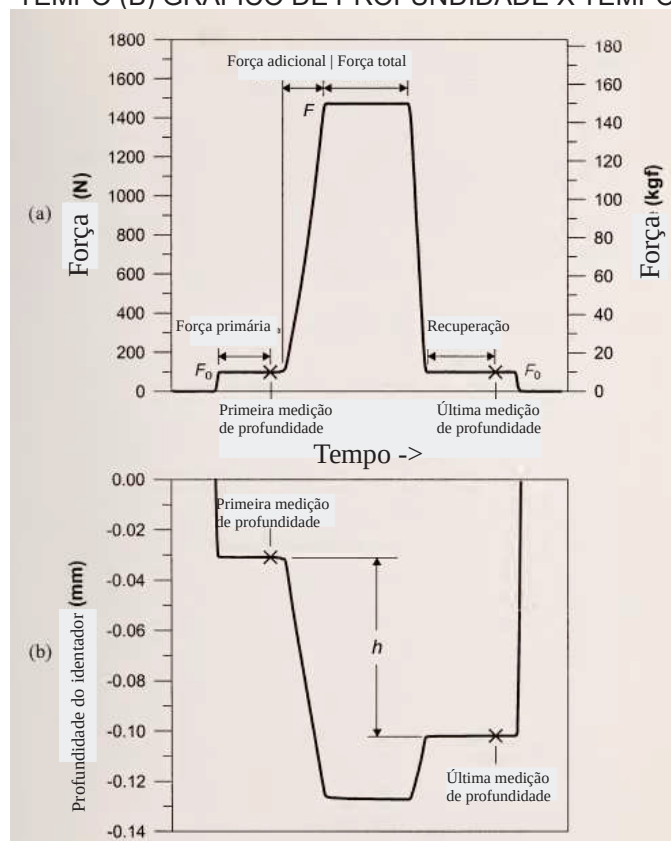
A medição de dureza é uma prática essencial em ciência de materiais e engenharia para avaliar a resistência mecânica de um material, especialmente à deformação plástica ou à indentação. Essa propriedade é crucial em diversas indústrias, como manufatura, construção e metalurgia, pois fornece informações sobre a resistência, durabilidade e adequação de um material para aplicações específicas.

Em seu estudo, Low et al (1999) mostram que existem várias técnicas empregadas para a medição de dureza, cada uma adaptada a diferentes materiais e requisitos de teste. O teste de dureza Rockwell envolve a aplicação de uma carga menor, que supere o limite de elasticidade do material, seguida por uma carga maior que gere apenas a deformação plástica e que provoca a indentação, dessa forma, tem-se a certeza de que apenas a resistência mecânica superficial será obtida neste

teste localizado, exemplificado na FIGURA 20. Deve ser realizada então a medição da profundidade da indentação deixada pelo penetrador. O resultado é expresso como um número de dureza Rockwell (HRC, HRB, etc.), que corresponde à dureza do material, uma medida de sua resistência mecânica localizada.

Por ser um teste local, é recomendada a realização de mais de uma medição, gerando assim um grupo amostral que poderá representar melhor a dureza do material analisado como um todo, através de inferência estatística.

Figura 20 - EXEMPLIFICAÇÃO DA MEDIÇÃO DE DUREZA ROCKWELL C (A) GRÁFICO DE FORÇA X TEMPO (B) GRÁFICO DE PROFUNDIDADE X TEMPO



FONTE: LOW, 1999

Ainda segundo Low et al (1999), a definição da escala de dureza a ser utilizada depende do material e perfil a serem analisados. Cada combinação de indentador e força a ser aplicada gera uma escala de medição diferente, para o qual pode ser definida uma escala de dureza com a amplitude de medição de cada uma das escalas a serem utilizadas, conforme mostrado na FIGURA 21.

Figura 21 - AMPLITUDE DAS ESCALAS DO
ENSAIO DE DUREZA ROCWELL

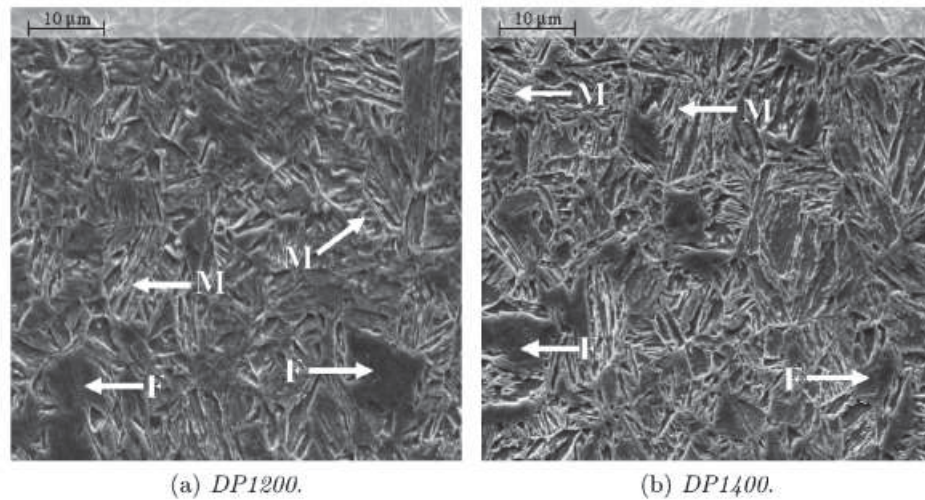
| Amplitudes recomendadas escala Rockwell | |
|---|----------------|
| 20 to 88 HRA ^A | 70 to 94 HR15N |
| 20 to 100 HRB ^B | 42 to 86 HR30N |
| 20 to 70 HRC | 20 to 77 HR45N |
| 40 to 77 HRD | 67 to 93 HR15T |
| 70 to 100 HRE | 29 to 82 HR30T |
| 60 to 100 HRF | 1 to 72 HR45T |
| 30 to 94 HRG | |
| 80 to 100 HRH | |
| 40 to 100 HRK | |

FONTE: LOW, 1999

Os testes de dureza normalmente são analisados em conjunto com outros tipos de ensaio para determinações mais precisas quanto as características do material. Cardoni, et al. (2016) fazem uma comparação entre os aços bifásicos DP1200 e DP1400, realizando a microscopia eletrônica por varredura, ensaio de tração e ensaio de dureza Rocwell C para ambos os materiais. O aço DP1400 apresentou maior resistência quando comparado ao aço DP1200 devido a maior presença da fase martensítica em sua microestrutura (FIGURA 22). O aço DP1200 apresentou dureza de RC52 enquanto o aço DP apresentou dureza de RC55. A espessura dos corpos de prova analisados foi de 2mm.

Na FIGURA 22, é possível visualizar que o aço DP1400 possui a formação de maior quantidade de martensita em sua microestrutura do que o aço DP1200. Isso se deve ao fato de que o aço DP1400 possui maior concentração de martensita em sua fabricação, e por isso é esperado que a resistência mecânica do aço DP1400 seja superior à do aço DP1200 pois a martensita é um microconstituente mais resistente que a matriz ferrítica, mais dúctil.

Figura 22 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA (5000X) DOS AÇOS DP1200 E DP1400



FONTE: CARDONI ET AL (2016)

Avendaño, et. al (2018) utilizam a escala Rockwell B em seu estudo para determinar a influência do tamanho de grão das fases ferríticas e martensíticas sobre o mecanismo de fratura dos aços bifásicos, onde a espessura das amostras analisadas era de 3,4mm.

2.7 ENCRUAMENTO

O encruamento, também conhecido como deformação a frio, refere-se ao aumento da dureza e da resistência de um material após ter sido submetido a processos de deformação plástica a temperaturas abaixo da sua temperatura de recristalização. Essa mudança nas propriedades mecânicas ocorre devido ao rearranjo da estrutura cristalina do material durante o processo de deformação.

A deformação plástica, que pode ocorrer através de processos como laminação, trefilação, forjamento ou estiramento a frio, leva a uma alteração na estrutura cristalina do material. Os grãos do material se tornam alongados e distorcidos, aumentando a densidade de discordâncias na microestrutura.

Os principais efeitos do encruamento em um material incluem:

1. Aumento da Dureza: O encruamento geralmente resulta em um aumento significativo na dureza do material. Isso ocorre devido à introdução de discordâncias e à formação de subestruturas que dificultam o movimento de outras discordâncias;

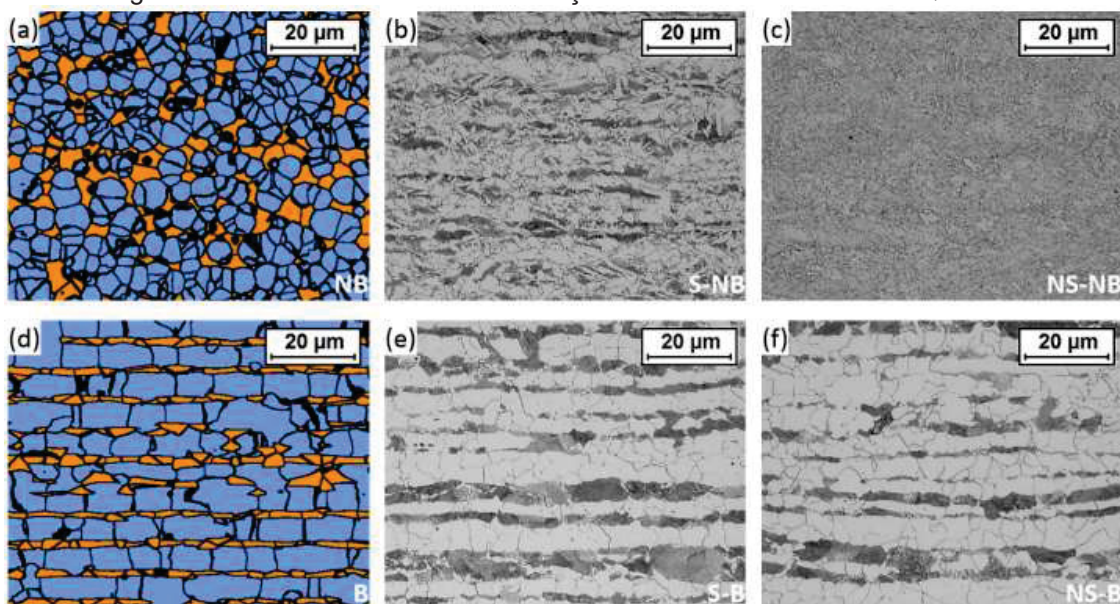
2. Aumento da Resistência Mecânica: A resistência à tração e a resistência à deformação plástica aumentam com o encruamento. Isso torna o material mais resistente a esforços mecânicos;

3. Diminuição da Ductilidade: Embora o encruamento melhore a resistência do material, geralmente resulta em uma diminuição na ductilidade. Isso significa que o material se torna menos capaz de se deformar antes de falhar;

Ennis et al. (2018) realizam um estudo que demonstra como a composição química e a organização microestrutural afetam o comportamento do encruamento de um aço bifásico, comparando a microestrutura do material quando laminado a frio e laminado à quente. Os ensaios mecânicos revelaram uma redução significativa na resistência à tração em estruturas laminadas à quente, enquanto mostraram uma resistência maior quando laminados a frio. O trabalho mostra uma comparação das microestruturas obtidas, conforme as FIGURAS 23 E 24.

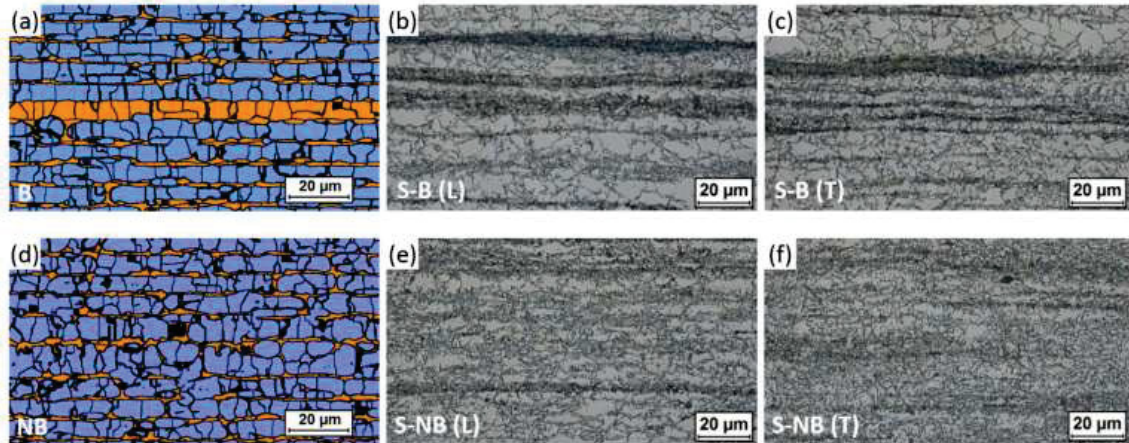
Na FIGURA 23 é mostrada a microestrutura do aço bifásico laminado à quente. As figuras “a” e “d” mostram uma análise gerada por um software de análise de imagens sobre as microestruturas “b” e “e” respectivamente, e as figuras “b”, “c”, “e” e “f” mostram a microestrutura do material analisada através de microscopia ótica, para diferentes regiões do corpo de prova. É possível verificar que a microestrutura mostrada nessas imagens evidencia a presença de formações mais uniformes e equiaxiais que àquelas mostradas na FIGURA 24, onde é apresentado o mesmo esquema de análises porém, agora, para o aço bifásico laminado à frio.

Figura 23 - MICROESTRUTURA DO AÇO BIFÁSICO LAMINADO À QUENTE



FONTE: ENNIS ET AL. (2018)

Figura 24 - MICROESTRUTURA DO AÇO BIFÁSICO LAMINADO À FRIO



FONTE: ENNIS ET AL. (2018)

2.8 MICROSCOPIA ÓTICA E ELETRÔNICA

Com o advento de novas tecnologias para análise de imagens, como a microscopia eletrônica por varredura, microscopia eletrônica de alta definição, EBSD, entre outras técnicas, a microscopia ótica pode estar ficando defasada quanto à ampliação alcançada através desta tecnologia. Porém, essas novas tecnologias requerem equipamentos mais robustos e caros, que muitas vezes não são uma opção economicamente viável para a indústria. Além disso, o manuseio deste tipo de equipamento requer mão de obra específica e qualificada, além de requerer mais tempo, tanto para o preparo correto das amostras, quanto para a análise em si.

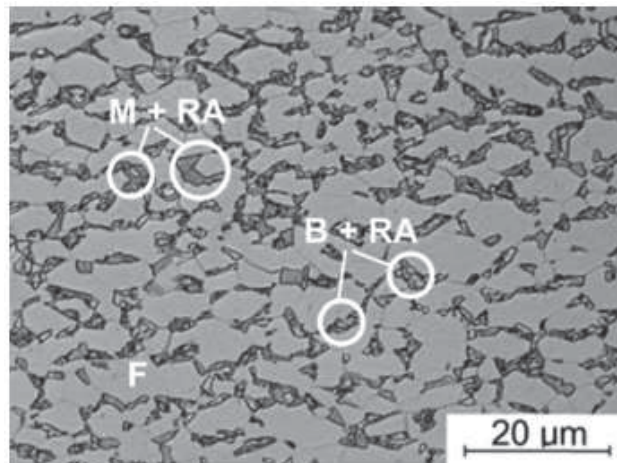
Por este motivo, a microscopia ótica continua sendo uma opção mais viável para análises mais pontuais, especialmente quando se trata da indústria de fabricação de peças, visto que a análise de suas imagens apresentam características que as tornam úteis e muitas vezes suficientes para conclusões mais rápidas que sejam necessárias à rotina da fábrica.

Radwanski et al (2016) realizam um estudo onde são analisados três aços multifásicos: um aço ferrítico-perlítico produzido em laboratório, cujas condições foram controladas, um aço DP600 e aço TRIP700 através de microscopia ótica,

microscopia eletrônica de alta definição, e a difração de elétrons retro-espalhados (EBSD). Em seu estudo, Radwanski et al (2016) citam que é possível diferenciar certas particularidades na microestrutura dos aços por meio da análise por microscopia ótica realizando um ataque químico com o reagente Nital.

Na FIGURA 25, os autores evidenciam a presença de Martensita, identificado por “M”, austenita retida, identificado por “RA”, bainita, identificado por “B” e da matriz ferrítica, identificado por “F”, na microestrutura do aço DP600, fabricado através de um processo de recozimento contínuo, apenas através da microscopia ótica utilizando o nital como reagente.

Figura 25 - MICROSCOPIA ÓTICA DE UM AÇO BIFÁSICO, EVIDENCIANDO A PRESENÇA DE SUAS DIFERENTES FASES



FONTE: RADWANSKI. (2016)

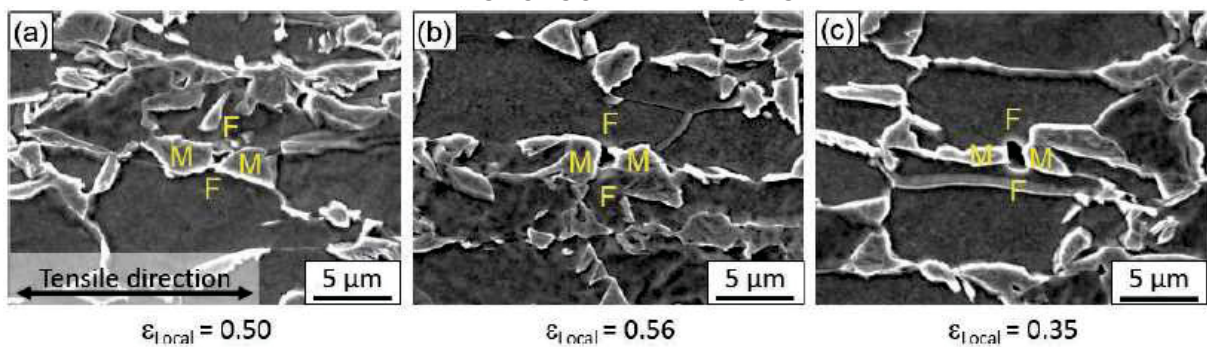
O autor constata que, na microscopia ótica, se torna mais difícil observar e identificar determinadas fases devido a suas diferenças morfológicas muito sutis, e conclui que, para uma análise melhor detalhada, a microscopia eletrônica de alta definição e o EBSD geram resultados mais satisfatórios, que inclusive, podem ser quantificados com maior precisão, ou seja, a microscopia ótica possui limitações.

Entretanto, o autor confirma que existem benefícios no seu uso quanto à identificação morfológica de determinadas estruturas com maior facilidade, especialmente quando aplicado contraste de cores sobre as imagens obtidas por microscopia ótica.

Uehata et al. (2018) realizam uma análise da evolução microestrutural de um aço bifásico laminado à quente submetido a um ensaio de tração através da microscopia ótica.

Em seu estudo, o autor define uma metodologia para quantificar a deformação causada sobre a peça submetida ao ensaio de tração apenas utilizando a microscopia ótica, porém, para uma análise mais aprofundada da microestrutura do material, ele recorre ao uso da tecnologia da microscopia eletrônica de varredura, conforme a FIGURA 26.

Figura 26 - EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO BIFÁSICO SUBMETIDO À ENSAIO DE TRAÇÃO EM MICROSCOPIA ELETRÔNICA



FONTE: UEHATA. (2018)

Na FIGURA 26, o autor mostra a evolução, da imagem “a” até a imagem “c” na microestrutura do aço bifásico conforme o alongamento foi aplicado no corpo de prova.

É possível verificar nas imagens que ocorre uma distorção da microestrutura e que a fase martensítica se torna mais alongada conforme o corpo é submetido à deformação plástica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada no presente trabalho consistiu na execução dos seguintes processos:

1. Seleção e aquisição das peças conformadas pelo ensaio de Nakazima modificado. (Realizado no trabalho de Oliveira, 2021);
2. Definição e corte das regiões de interesse;
3. Medição de dureza Rockwell D;
4. Preparação dos corpos de prova;
5. Ataque químico e microscopia ótica;
6. Microscopia eletrônica de varredura;
7. Uso do software ImageJ.JS para análise das imagens.

3.1 SELEÇÃO DAS AMOSTRAS

O processo experimental utilizou as chapas de aço que já haviam sofrido a estampagem em teste de Nakazima modificado, administrado por Oliveira (2021), que realizou o ensaio efetuando as seguintes alterações nos parâmetros: 1) força atribuída ao prensa-chapas (569, 785 e 1157 kN), variação do tamanho dos corpos de prova ensaiados através de Nakazima (200x200, 200x175, 200x150, 200x125, 200x100, 200x90, 200x80 e 200x70mm) e alteração das geometrias de *drawbead* (perfis planar – perfil padrão, que não gera deformação e pressão extra na região, triangular, circular e quadrado). Essas alterações foram realizadas no estudo para confecção das curvas limite de conformação e análise de como os diferentes parâmetros afetam a qualidade final das peças conformadas. A TABELA 1 mostra um resumo de todas as peças que foram ensaiadas no estudo realizado por Oliveira (2021).

Tabela 1 - ENSAIOS DE NAKAZIMA MODIFICADO REALIZADOS NO ESTUDO DE OLIVEIRA (2021).

| | | Região ideal | | | | | | | | | Região de transição | | | | | | Região crítica | | | | | | | | |
|---------------------|-------------------|--------------------------|-----|-----|--|-----|-----|---------------------------|-----|-----|---------------------|-----|-----|---|-----|-----|----------------|-----|-----|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|
| | | 200x200 mm | | | 200x175 mm | | | 200x150 mm | | | 200x125 mm | | | 200x100 mm | | | 200x90 mm | | | 200x80 mm | | | 200x70 mm | | |
| Drawbead planar | Sample dimensions | 200x200 mm | | | 200x175 mm | | | 200x150 mm | | | 200x125 mm | | | 200x100 mm | | | 200x90 mm | | | 200x80 mm | | | 200x70 mm | | |
| | BH Force/Samples | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| | 569 KN | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 | P16 | P17 | P18 | P19 | P20 | P21 | P22 | P23 | P24 |
| | 785 KN | P25 | P26 | P27 | P28 | P29 | P30 | P31 | P32 | P33 | P34 | P35 | P36 | P37 | P38 | P39 | P40 | P41 | P42 | P43 | P44 | P45 | P46 | P47 | P48 |
| 1157 KN | P49 | P50 | P51 | P52 | P53 | P54 | P55 | P56 | P57 | P58 | P59 | P60 | P61 | P62 | P63 | P64 | P65 | P66 | P67 | P68 | P69 | P70 | P71 | P72 | |
| Drawbead circular | Sample dimensions | 200x200 mm | | | 200x175 mm | | | 200x150 mm | | | 200x125 mm | | | 200x100 mm | | | 200x90 mm | | | 200x80 mm | | | 200x70 mm | | |
| | BH Force/Samples | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| | 569 KN | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 | C15 | C16 | C17 | C18 | C19 | C20 | C21 | C22 | C23 | C24 |
| | 785 KN | C25 | C26 | C27 | C28 | C29 | C30 | C31 | C32 | C33 | C34 | C35 | C36 | C37 | C38 | C39 | C40 | C41 | C42 | C43 | C44 | C45 | C46 | C47 | C48 |
| 1157 KN | C49 | C50 | C51 | C52 | C53 | C54 | C55 | C56 | C57 | C58 | C59 | C60 | C61 | C62 | C63 | C64 | C65 | C66 | C67 | C68 | C69 | C70 | C71 | C72 | |
| Drawbead triangular | Sample dimensions | 200x200 mm | | | 200x175 mm | | | 200x150 mm | | | 200x125 mm | | | 200x100 mm | | | 200x90 mm | | | 200x80 mm | | | 200x70 mm | | |
| | BH Force/Samples | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| | 569 KN | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | T8 | T9 | T10 | T11 | T12 | T13 | T14 | T15 | T16 | T17 | T18 | T19 | T20 | T21 | T22 | T23 | T24 |
| | 785 KN | T25 | T26 | T27 | T28 | T29 | T30 | T31 | T32 | T33 | T34 | T35 | T36 | T37 | T38 | T39 | T40 | T41 | T42 | T43 | T44 | T45 | T46 | T47 | T48 |
| 1157 KN | T49 | T50 | T51 | T52 | T53 | T54 | T55 | T56 | T57 | T58 | T59 | T60 | T61 | T62 | T63 | T64 | T65 | T66 | T67 | T68 | T69 | T70 | T71 | T72 | |
| Drawbead quadrado | Sample dimensions | 200x200 mm | | | 200x175 mm | | | 200x150 mm | | | 200x125 mm | | | 200x100 mm | | | 200x90 mm | | | 200x80 mm | | | 200x70 mm | | |
| | BH Force/Samples | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| | 569 KN | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q6 | Q7 | Q8 | Q9 | Q10 | Q11 | Q12 | Q13 | Q14 | Q15 | Q16 | Q17 | Q18 | Q19 | Q20 | Q21 | Q22 | Q23 | Q24 |
| | 785 KN | Q25 | Q26 | Q27 | Q28 | Q29 | Q30 | Q31 | Q32 | Q33 | Q34 | Q35 | Q36 | Q37 | Q38 | Q39 | Q40 | Q41 | Q42 | Q43 | Q44 | Q45 | Q46 | Q47 | Q48 |
| 1157 KN | Q49 | Q50 | Q51 | Q52 | Q53 | Q54 | Q55 | Q56 | Q57 | Q58 | Q59 | Q60 | Q61 | Q62 | Q63 | Q64 | Q65 | Q66 | Q67 | Q68 | Q69 | Q70 | Q71 | Q72 | |
| SUBTITLE | | Trinca no raio do punção | | | Escorregamento do material, sem ocorrência de trinca | | | Trinca no ombro da matriz | | | Trinca no drawbead | | | Trinca entre o drawbead e o ombro da matriz | | | | | | | | | | | |

FONTE: OLIVEIRA ET AL. (2022)

Para realização da metodologia utilizada neste trabalho, foram selecionadas apenas as peças que foram ensaiadas na configuração de força do prensa-chapas de 569 KN, dimensões da peça de 200x200 mm, para todas as configurações de *drawbead*, cuja trinca ocorreu na região ideal, ou seja, na região do raio do punção, onde é esperada a ocorrência de trinca no ensaio de Nakazima. Adquiridas as chapas de aço ensaiadas por Nakazima, foram escolhidas as seguintes regiões de análise: região de ocorrência da trinca (raio do punção), raio da matriz e região de contato com o *drawbead* para serem analisadas no experimento. Essas amostras foram cortadas e retiradas da peça conformada, totalizando 12 amostras, três regiões analisadas para cada um dos 4 tipos de drawbead utilizados no estudo anterior (plano, triangular, quadrado e circular). Os corpos de prova possuem aproximadamente 1mm de espessura.

Foi preparada também uma amostra do material como recebido, que não foi ensaiado através de Nakazima, como referência para cada uma das amostras analisadas.

Foram adotados os códigos mostrados na TABELA 2 para as amostras analisadas neste estudo, de maneira a facilitar sua identificação. Os códigos

associados às amostras estudadas neste estudo se relacionam com aqueles utilizados por Oliveira (2021) na TABELA 1.

Tabela 2 - CÓDIGOS ASSOCIADOS AOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS NESTE ESTUDO

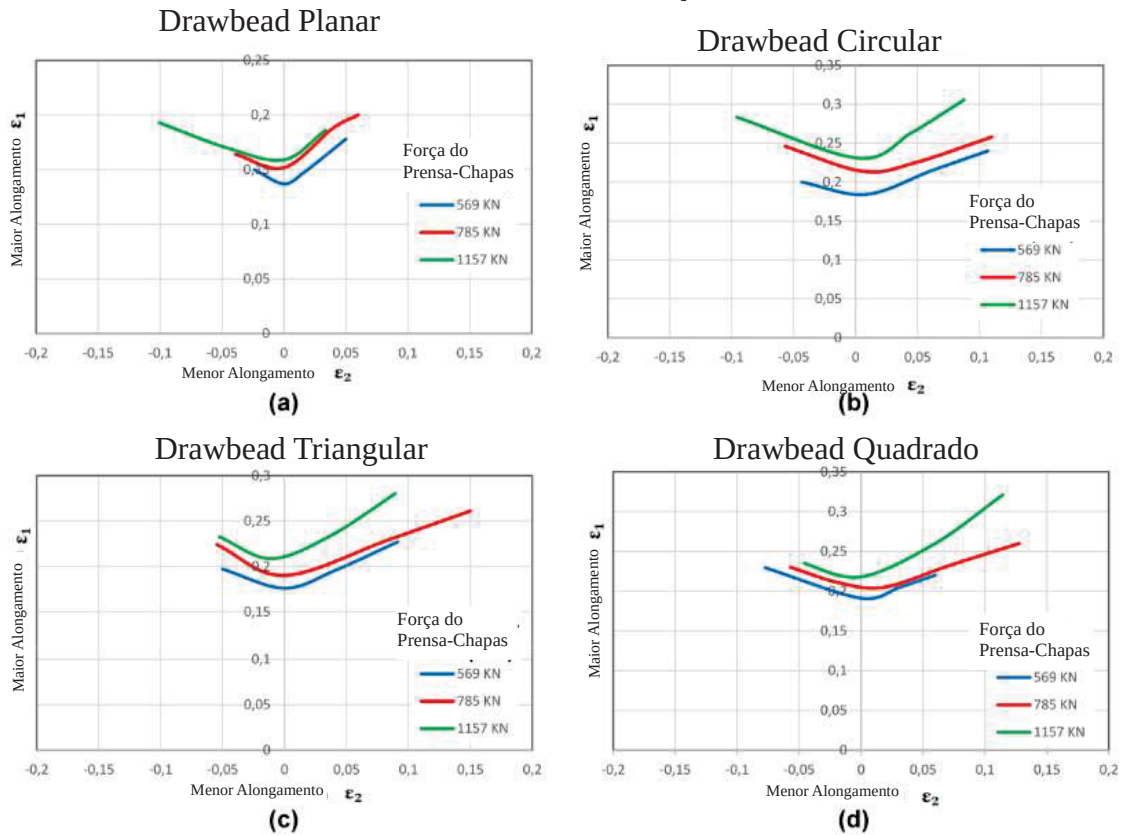
| <i>Geometria do corpo de prova: 200x200; Pressão aplicada na ferramenta: 58tf; Trinca ocorreu no raio do punção para todas as amostras analisadas.</i> | Região do drawbead e Trinca | Raio da Matriz |
|--|------------------------------------|-----------------------|
| Geometria do Drawbead | Grupo 2 | Grupo 2 |
| P (Plana) | P2 | RP |
| C (Circular) | C2 | RC |
| T (Triangular) | T2 | RT |
| Q (Quadrada) | Q2 | RQ |
| N (Amostra Neutra) | - | - |

FONTE: AUTORA (2022)

Dentre os experimentos realizados no estudo de Oliveira (2021), mostrados na FIGURA 27, foram selecionados os corpos de prova com geometria 200x200 por representarem uma situação mais comum na indústria. A TABELA 1 evidencia o grupo escolhido para análise no presente trabalho, destacados na cor laranja.

A força selecionada para o prensa chapas, de 569 KN, foi escolhida por representar a ocorrência mais crítica dentre as forças utilizadas para realização do experimento, conforme mostrado nas curvas limite de conformação apresentadas na FIGURA 27, onde pode-se observar pela curva da cor azul que na força de 569 KN ocorrem os menores alongamentos.

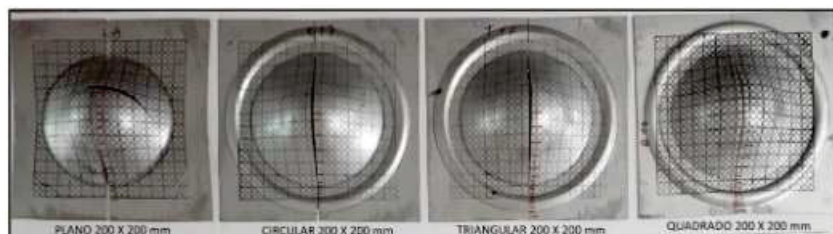
Figura 27 - INFLUÊNCIA DA FORÇA ATRIBUÍDA AO PRENSA-CHAPAS NA CONFORMABILIDADE DO AÇO DP780



FONTE: OLIVEIRA ET AL. (2022)

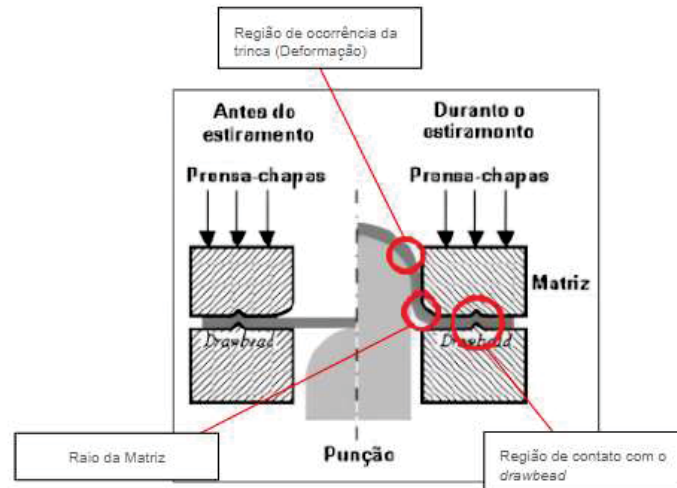
Os corpos de prova conformados pelo ensaio de Nakazima podem ser observados na FIGURA 28. Na FIGURA 29 é apresentado um esquema que mostra a região de corte para obtenção de cada uma das regiões analisadas neste trabalho.

Figura 28 - CORPOS DE PROVA CONFORMADOS PELO ENSAIO DE NAKAZIMA



FONTE: OLIVEIRA ET AL. (2022)

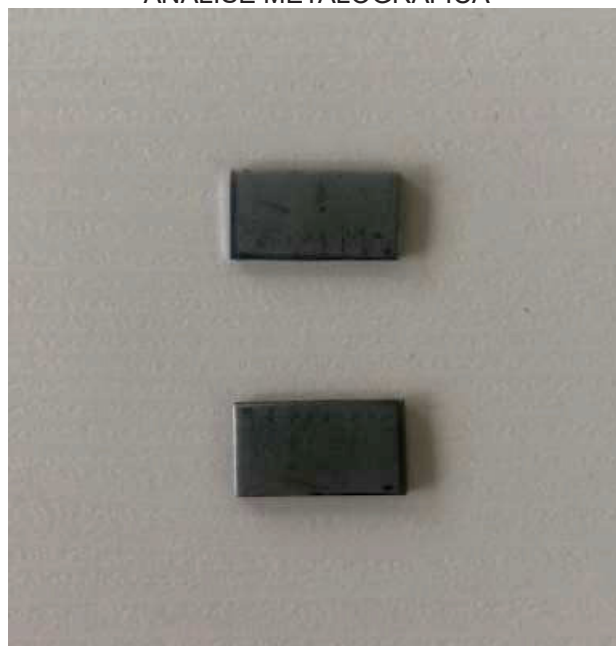
Figura 29 - ESQUEMA QUE DEMONSTRA AS REGIÕES DE ONDE FORAM RETIRADAS AS AMOSTRAS ANALISADAS NO PRESENTE TRABALHO



FONTE: AUTORA (2022)

As regiões escolhidas para análise foram recortadas da peça conformada com o auxílio de um disco de corte. Cada uma das amostras retiradas possui aproximadamente 10 mm de altura e 20 mm de largura, conforme mostrado na FIGURA 30.

Figura 30 - AMOSTRAS RECORTADAS PARA ANÁLISE METALOGRAFICA



FONTE: AUTORA (2022)

Para melhor embasamento das análises sobre o material, foi consultado também o catálogo do fabricante do aço bifásico DP780 cedido para este estudo pela empresa Arcelor Mittal, conforme a FIGURA 31. Nela, é possível observar a composição do material, bem como outros dados de engenharia. Conforme observado no catálogo do fabricante, este aço é fabricado através do processo de laminação à frio.

Figura 31 - ESPECIFICAÇÕES DO AÇO BIFÁSICO ESTUDADO

| ESPECIFICAÇÃO / specification | | | | Esp./Thk (mm) | COMPOSIÇÃO QUÍMICA / chemical composition (%) | | | | | PROPRIEDADES MECÂNICAS / mechanical properties | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|--|-----------------------|------------|------------|---|---|----------------|------------------------------------|---------------------|------------|------------|---------------------|
| Normal/ standard | DRALINGRADE | Grnu AMV/ AMV Grade | Revestimento / Coating | | C (máx) | Mn (máx) | P (máx) | S (máx) | Outros/ Other | LE/Y8 (MPa) | LR/T8 (MPa) | Base medida/ Gauge Length | Al/Elong min (%) | r (min) | n (min) | BH min. (Mpa) |
| ASTM A1079 (2012) | DP 600T340Y11 | DP600 | | 0,00-2,00 | 0,17 | 4,75 ^(máx) | | | Cu ^(máx) = 0,20% (Cr+Mo) ^(máx) = 1,4% (V+Cb+Ti) ^(máx) = 0,35% Ni ^(máx) = 0,50% | 340 min | 500 min | | 21 | - | 0,14 | |
| | DP 780T420Y11 | DP780 | | 1,05-2,00 | 0,18 | 5,40 ^(máx) | 0,080 | 0,015 | | 420 min | 780 min | | 14 | - | 0,11 | |
| | DP 600T600Y11 | DP600 | | 1,20-1,50 | 0,23 | 0,00 ^(máx) | | | | 250 min | 300 min | | 3 | - | - | |
| | TRIP 780T 440Y11 | TRIP 780 | GI/GA | 1,20-1,60 | 0,30 | 6,70 ^(máx) | 0,120 | 0,015 | | 440 min | 780 min | 30 | 19 | - | 0,10 | 30 |

FONTE: CATÁLOGO ARCELOR MITTAL (2015)

3.2 ENSAIO DE DUREZA

Antes da preparação das amostras para metalografia, foram realizados ensaios de dureza Rockwell D nesses corpos de prova, na região próxima à área que seria analisada através de microscopia. O ensaio de dureza Rockwell foi determinado pela escala D, que possui a faixa de utilização entre 40 a 77 HDR, que consistiu na escala que se adequou a dureza medida nas amostras. A dureza Rockwell foi selecionada por ser um ensaio mais amplamente utilizado na indústria metalúrgica.

O ensaio foi realizado em uma máquina manual na marca NEWAGE modelo VERSITRON para medição de dureza, utilizando-se um indentador cônico 120°, de diamante, exemplificado na FIGURA 32.

Figura 32 - EXEMPLO DE
EQUIPAMENTO UTILIZADO
PARA MEDIÇÃO DE DUREZA
ROCKWELL



FONTE: TECNOFERRAMENTAS (Acesso em 2024)

Para melhorar a confiabilidade de cada um dos testes, foram efetuadas pelo menos cinco medições de dureza para cada uma das peças analisadas, na região lateral da peça, próximo à área analisada por microscopia. O resultado final foi obtido com base na média aritmética simples dos valores obtidos, excluindo-se os valores com dispersão muito alta.

3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Com a finalidade de analisar a região da espessura, e para diminuir o número de peças a serem embutidas, foram unidas as regiões de trinca e *drawbead* de cada uma das peças analisadas, para que ambas fossem embutidas em conjunto.

O conjunto foi inserido em uma embutidora metalográfica à quente da marca TECLAGO, modelo EM40D, onde foi utilizada a baquelite para embutimento das amostras, mostrada na FIGURA 33.

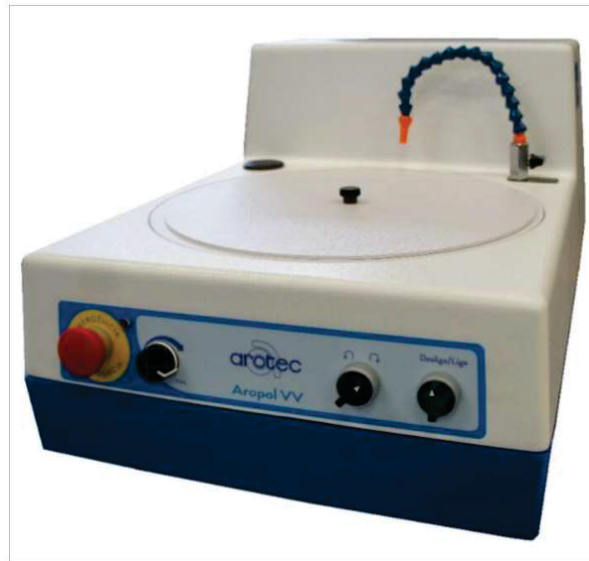
Figura 33 - EMBUTIDORA METALOGRÁFICA
UTILIZADA



FONTE: AUTORA (2022)

As amostras foram submetidas ao lixamento em lixadeira metalográfica da marca AROTEC, utilizando-se lixas d'água nas granulações de 100, 220, 320, 600, 800 e 1200, exemplificado na FIGURA 34. As amostras preparadas são exemplificadas na FIGURA 35.

Figura 34 - EXEMPLO DE EQUIPAMENTO
UTILIZADO PARA LIXAMENTO E POLIMENTO DAS
AMOSTRAS



FONTE: AROTEC (Acesso em 2024)

Figura 35 - AMOSTRAS
EMBUTIDAS E LIXADAS



FONTE: AUTORA (2022)

Usando um pano de polimento anexado a uma politriz circular APL-4, foi usada alumina, com granulometria de 1 micrón, como agente polidor e água como lubrificante para retirar cada uma das marcas provenientes do lixamento.

O ataque químico dos corpos de prova polidos foi feito com nital 3% (mistura de ácido nítrico com álcool), sendo mantido por cerca de 7 segundos em cada amostra utilizando a técnica de ataque por imersão à superfície da amostra. Foram

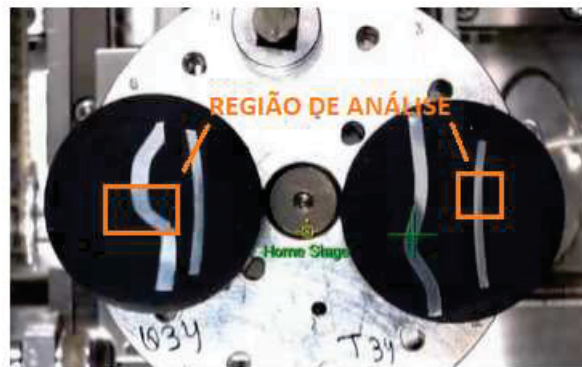
realizados testes quanto à concentração e tempo de aplicação do reagente, e os melhores resultados foram observados nas configurações aplicadas.

Após a preparação metalográfica, as peças foram analisadas e suas imagens obtidas, a partir do microscópio óptico (nas ampliações de 50x e 100x) e através do microscópio eletrônico de varredura (nas ampliações de 300x, 700x e 1000x). Foram executados testes para a microscopia eletrônica por varredura, nos quais foram obtidas imagens para as seguintes situações:

1. Peças preparadas, sem ataque químico;
2. Peças preparadas, com ataque químico (Nital, 3%);

As regiões analisadas estão destacadas na FIGURA 36. À esquerda na imagem, é evidenciada a região da peça onde houve o contato direto com o *drawbead*, enquanto à direita, é mostrada a região de ocorrência da fratura. Para as peças provenientes do raio da matriz e para a peça virgem, buscou-se analisar a região central da amostra, semelhante à região da trinca, mostrada à direita na imagem.

Figura 36 - REGIÃO DE ANÁLISE
PREFERENCIAL



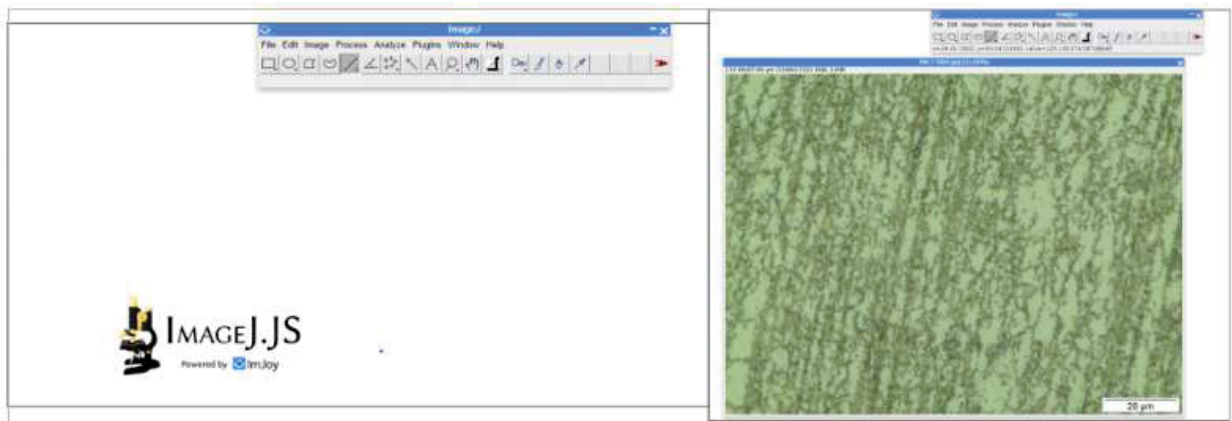
FONTE: AUTORA (2022)

3.4 CONFIGURAÇÃO DO SOFTWARE DE ANÁLISE DE IMAGENS

As imagens obtidas no microscópio óptico, na ampliação de 100x, foram analisadas através de um software para análise de imagens denominado Imagej.JS, acessado em 2023. O software foi configurado da seguinte maneira:

1. Foi utilizada a versão ImageJ.JS pois através dela a análise é realizada diretamente através da página do navegador de internet, de forma gratuita. Ao abrir o site, será necessário abrir uma imagem de referência e então realizar a calibração da escala do software, o que possibilitará as medições de dados, mostrado na FIGURA 37.

Figura 37 - IMAGEM OBTIDA EM MICROSCOPIA ÓPTICA (100X) ABERTA NO SOFTWARE



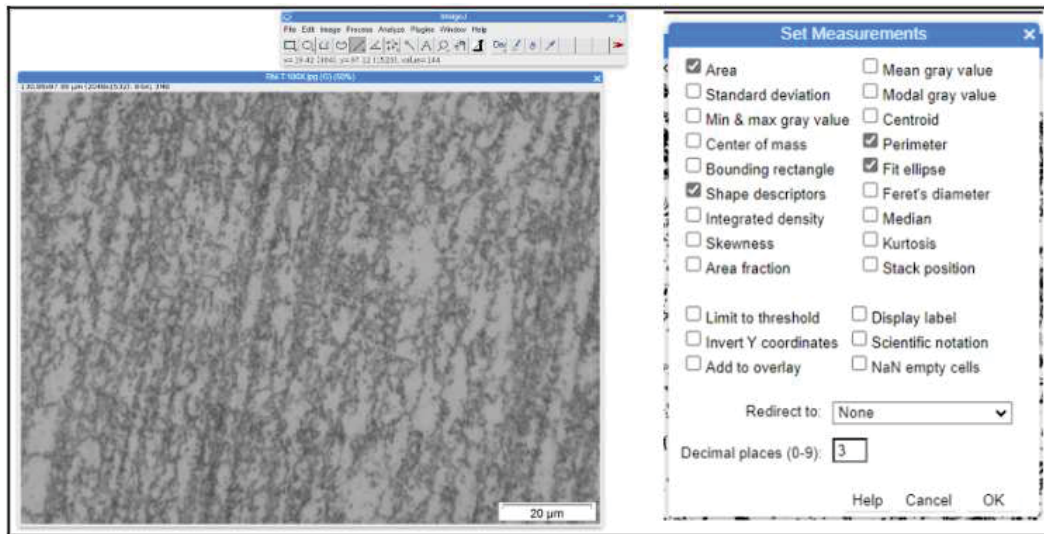
FONTE: AUTORA (2023)

Para calibrar a escala do software, pode-se utilizar a referência da própria imagem. No caso, a medida em pixels da escala presente na imagem de referência é de 309px, para 20µm. Esta medida foi informada no campo “analyze > set scale” do site e ficou configurada para as imagens obtidas através da microscopia óptica em 100x.

2. Para identificar as nuances de análise das imagens, é necessário transformá-las, utilizando o caminho “image > type > 8-bit” resultando na imagem presente da FIGURA 38.

3. A configuração das medidas que deverão ser analisadas devem ser marcadas em “analyze > set measurements”. Para este trabalho, foram marcadas as medidas conforme a FIGURA 38.

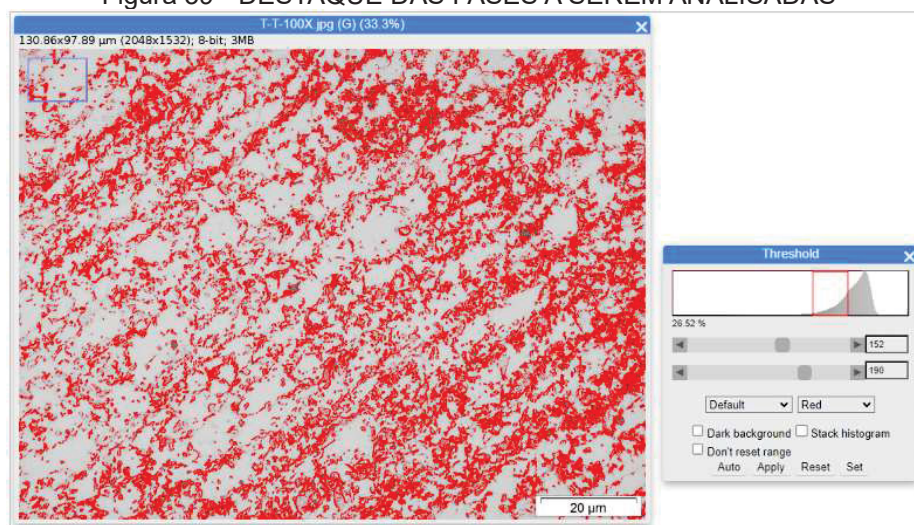
Figura 38 - IMAGEM TRANSFORMADA PARA POSSIBILITAR O DESTACAMENTO DAS FASES



FONTE: AUTORA (2023)

4. O comando “image > adjust > threshold” confere o destaque das partes da imagem que se deseja analisar. Para este trabalho, o destaque foi dado às regiões escuras da imagem, que compõem a fase martensítica do aço Dual Phase. Essa fase foi destacada da matriz ferrítica para sua análise morfológica, conforme a FIGURA 39.

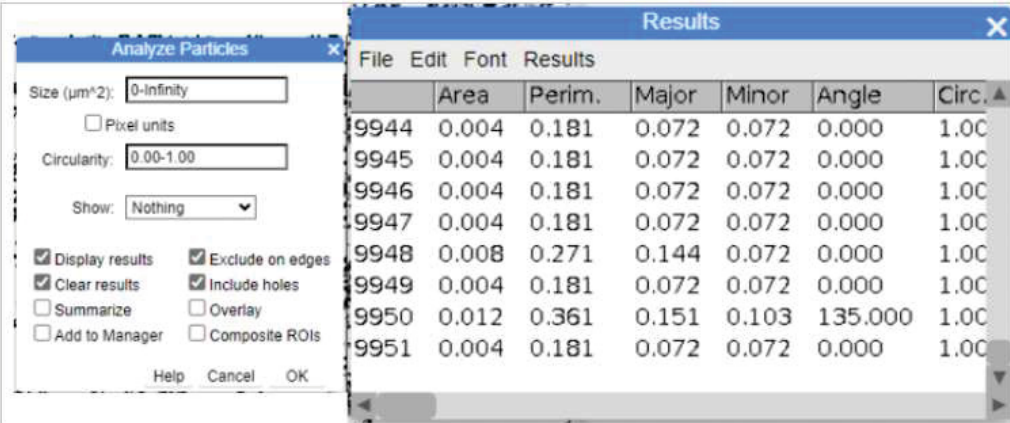
Figura 39 - DESTAQUE DAS FASES A SEREM ANALISADAS



FONTE: AUTORA (2023)

Após determinar a fase a ser analisada, o comando “analyze > analyze particles” possibilita a extração das medidas conforme os parâmetros que foram estabelecidos na FIGURA 37. Ao analisar as regiões com cores distintas, que no caso da microscopia, revela as fases existentes, o programa gerará uma tabela com todos os valores parametrizados para a fase destacada, e possibilitará a obtenção de gráficos com base nos valores destas tabelas, mostrados na FIGURA 40 e FIGURA 41. Os dados são medidos em micrômetros, configurados no programa durante a configuração da escala.

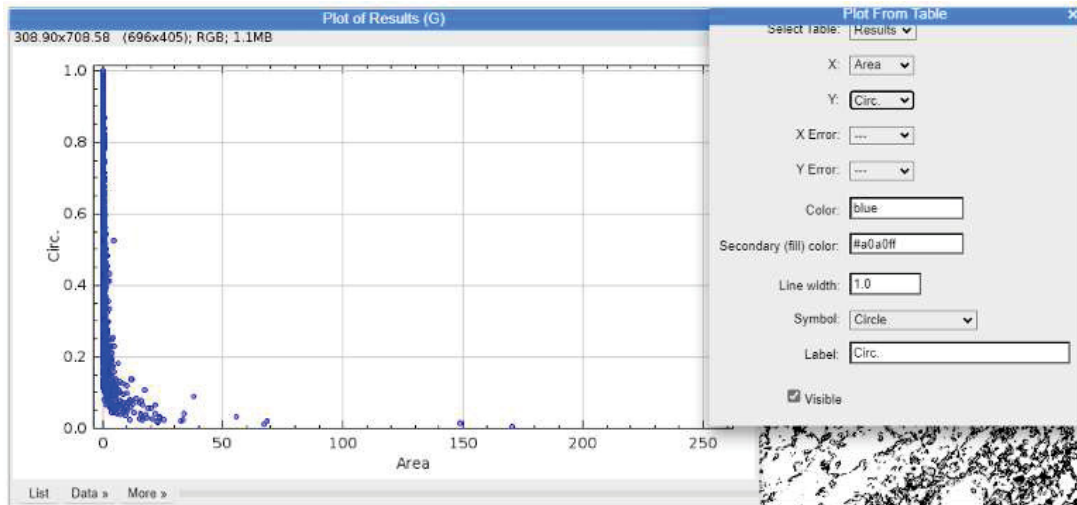
Figura 40 - TABELA DE DADOS GERADAS A PARTIR DA ANÁLISE DA IMAGEM TRATADA



| | Area | Perim. | Major | Minor | Angle | Circ. |
|------|-------|--------|-------|-------|---------|-------|
| 9944 | 0.004 | 0.181 | 0.072 | 0.072 | 0.000 | 1.00 |
| 9945 | 0.004 | 0.181 | 0.072 | 0.072 | 0.000 | 1.00 |
| 9946 | 0.004 | 0.181 | 0.072 | 0.072 | 0.000 | 1.00 |
| 9947 | 0.004 | 0.181 | 0.072 | 0.072 | 0.000 | 1.00 |
| 9948 | 0.008 | 0.271 | 0.144 | 0.072 | 0.000 | 1.00 |
| 9949 | 0.004 | 0.181 | 0.072 | 0.072 | 0.000 | 1.00 |
| 9950 | 0.012 | 0.361 | 0.151 | 0.103 | 135.000 | 1.00 |
| 9951 | 0.004 | 0.181 | 0.072 | 0.072 | 0.000 | 1.00 |

FONTE: AUTORA (2023)

Figura 41 - GRÁFICO DE ANÁLISE GERADA A PARTIR DA TABELA DE DADOS NO SOFTWARE



FONTE: AUTORA (2023)

A circularidade, mostrada no gráfico acima, é uma medida adimensional, cujos valores vão de 0 a 1 e quanto mais próximo de um, maior a tendência circular da fase destacada. A área, por sua vez, é medida em μm^2 .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIO DE DUREZA

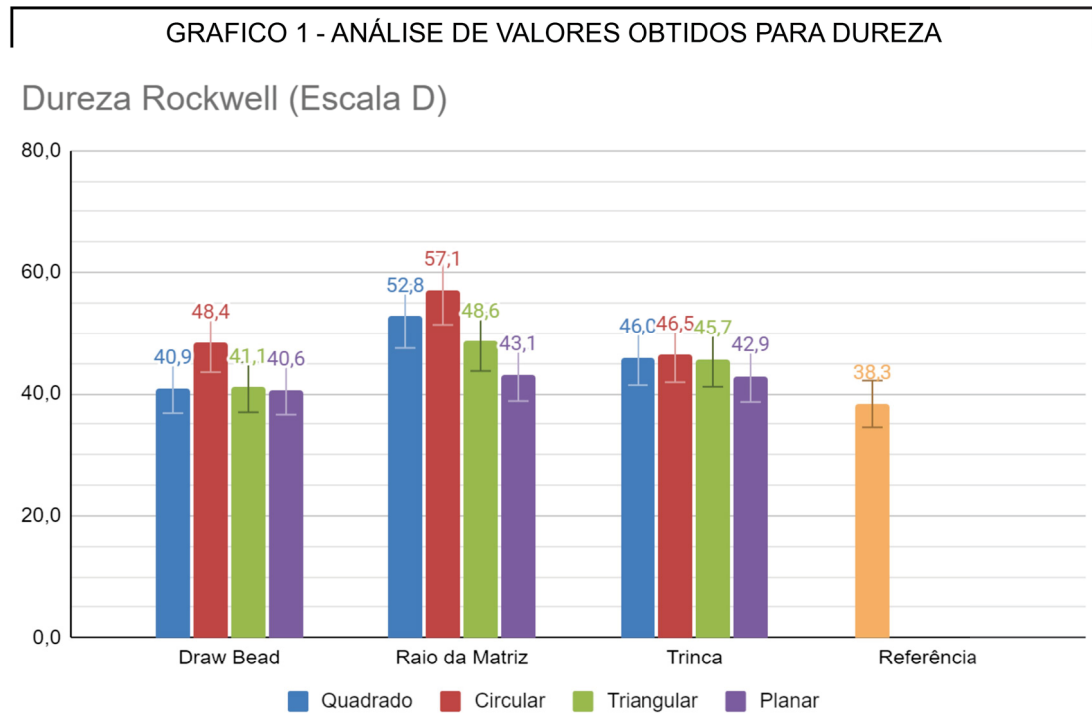
Ao realizar o ensaio de dureza Rockwell D nas amostras, nas regiões analisadas (*drawbead*, raio da matriz e ombro da matriz, onde ocorre a fratura) foram obtidos os resultados demonstrados na TABELA 3 e no GRÁFICO 1 mostrados abaixo, que possibilita a comparação entre os resultados obtidos no ensaio entre si, e também os resultados obtidos para a medição de dureza da peça virgem, chamada de “Referência (N)”.

Tabela 3 - VALORES OBTIDOS NOS TESTES DE DUREZA ROCKWELL

| D | | | | |
|-----------------------|------|------|------|------|
| | Q2 | C2 | T2 | P2 |
| Trinca | | | | |
| 1 | 45,3 | 47,3 | 45,8 | 42,5 |
| 2 | 47 | 46,2 | 45,4 | 42 |
| 3 | 45,7 | 46,1 | 45,9 | 44,3 |
| Drawbead | | | | |
| 1 | 41,3 | 58,4 | 41,3 | 40,4 |
| 2 | 40,3 | 45,7 | 41,1 | 41,2 |
| 3 | 41,1 | 41 | 40,8 | 40,3 |
| Raio da Matriz | | | | |
| 1 | 56,2 | 48,5 | 48,4 | 37 |
| 2 | 42,9 | 56 | 38,4 | 48 |
| 3 | 49,6 | 55,4 | 47 | 42 |
| 4 | 62,4 | 68,6 | 60,5 | 45,4 |

| Referência (N) | |
|----------------|------|
| 1 | 39,4 |
| 2 | 38,1 |
| 3 | 38,2 |
| 4 | 38,1 |
| 5 | 37,8 |

FONTE: AUTORA (2023)



FONTE: AUTORA (2023)

Ao analisar os resultados dos testes de dureza apresentados, é possível ressaltar as seguintes relações:

1. Para todas as geometrias de *drawbead* analisadas, os valores de dureza associados a região do raio da matriz são superiores àqueles obtidos para as outras regiões analisadas. Este fator pode estar vinculado ao fato de que a região do raio da matriz costuma ser a região onde ocorre maior estrição durante o processo de embutimento, ou seja, a maior deformação plástica, sendo assim, conforme observado na revisão bibliográfica, é esperado maior encruamento nesta região.

2. Com relação às geometrias, é possível observar que os menores valores de dureza foram obtidos para as regiões advindas da peça conformada com o *drawbead* planar, enquanto os maiores valores estão associados ao *drawbead* circular.

O *drawbead* planar não limita o escoamento do material da chapa conformada para a matriz, o que pode diminuir a estrição nesta chapa e ocasionar um menor alongamento em sua microestrutura, acarretando um encruamento menor do que o observado nas peças onde a geometria *drawbead* gera um bloqueio para o escoamento livre do material. Essa discussão poderá ser aprofundada na análise

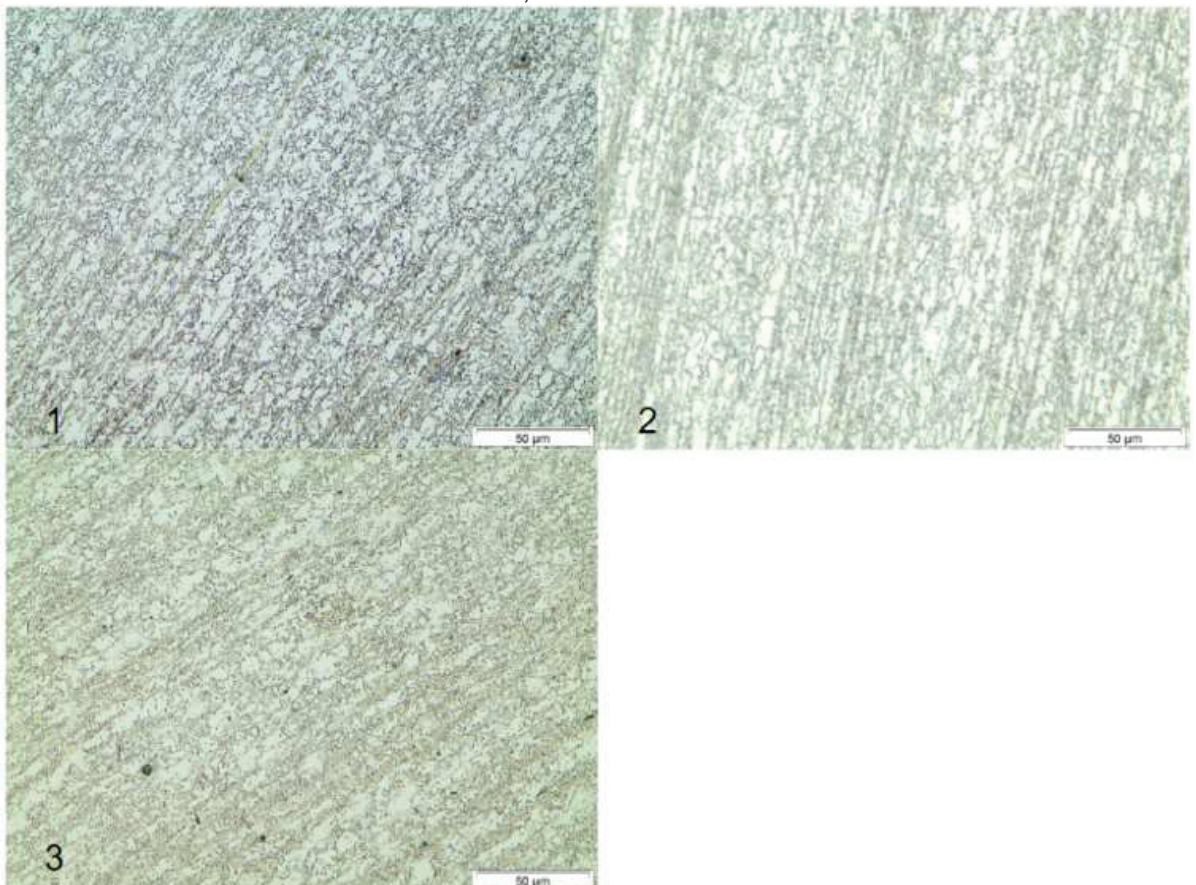
microestrutural, onde pode ser possível discorrer sobre o motivo da peça advinda do *drawbead* circular apresentar os maiores valores.

3. Todos os valores de dureza obtidos para as amostras que sofreram a conformação, através do teste de nakazima modificado, são maiores que os valores de dureza obtidos para o material de referência, peça N, o que é um resultado esperado, devido à deformação plástica sofrida pelos materiais conformados.

4.2 MICROSCOPIA ÓTICA

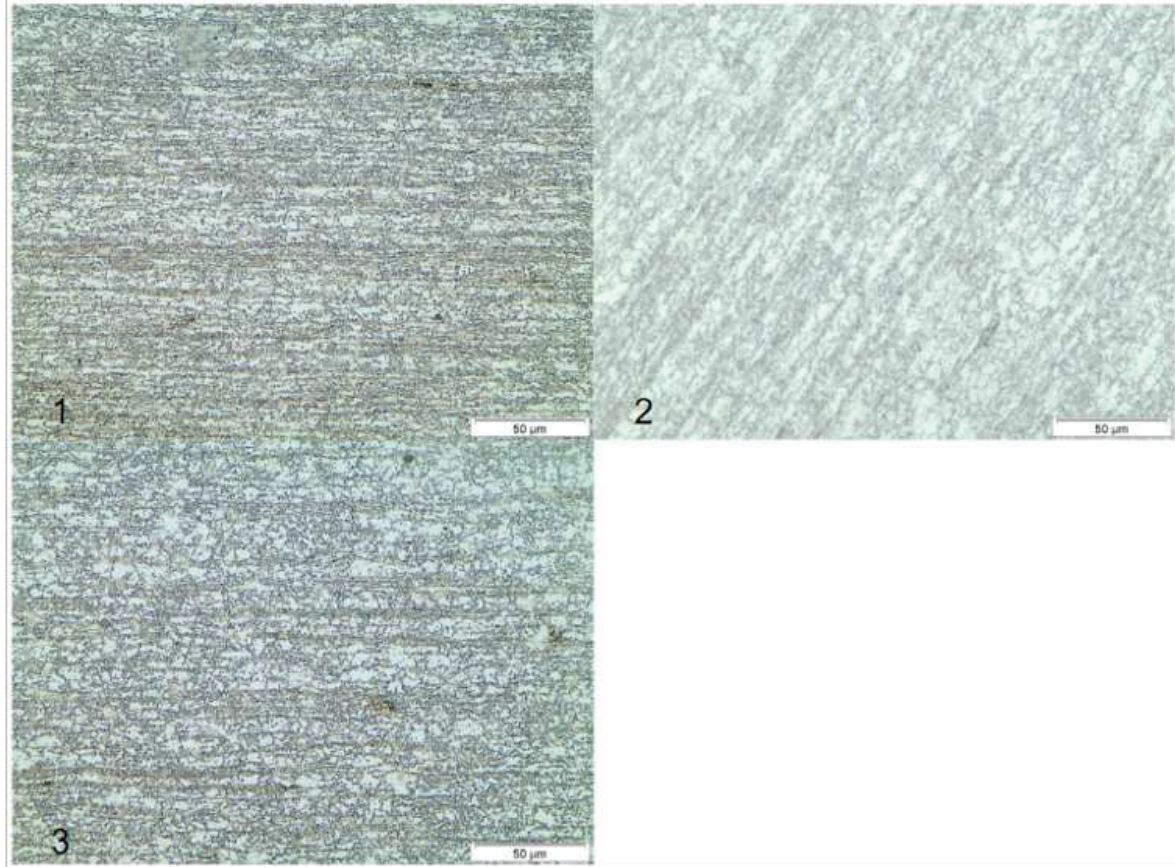
Nas figuras abaixo são demonstradas as imagens obtidas a partir da microscopia óptica, em ampliação de 50X, para as diferentes peças analisadas no presente trabalho. As peças foram categorizadas com base no tipo de *drawbead* com as quais foram ensaiadas no ensaio de Nakazima modificado. As FIGURAS 42, 43, 44 e 45 correspondem às três regiões analisadas (região do *drawbead*, região do raio da matriz e região de ocorrência da fratura) conforme o índice nas legendas.

Figura 42 - MICROSCOPIA ÓPTICA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD TRIANGULAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



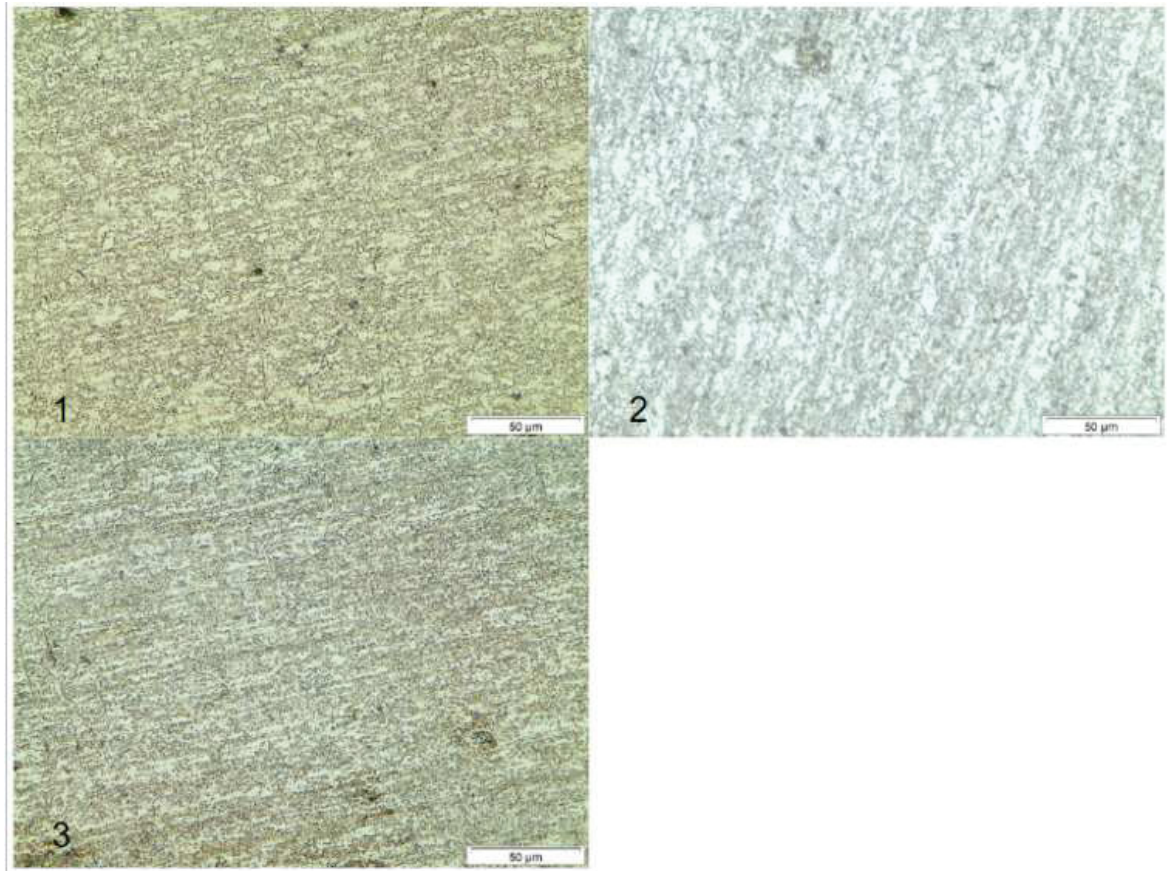
FONTE: AUTORA (2023)

Figura 43 - MICROSCOPIA ÓPTICA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD PLANAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



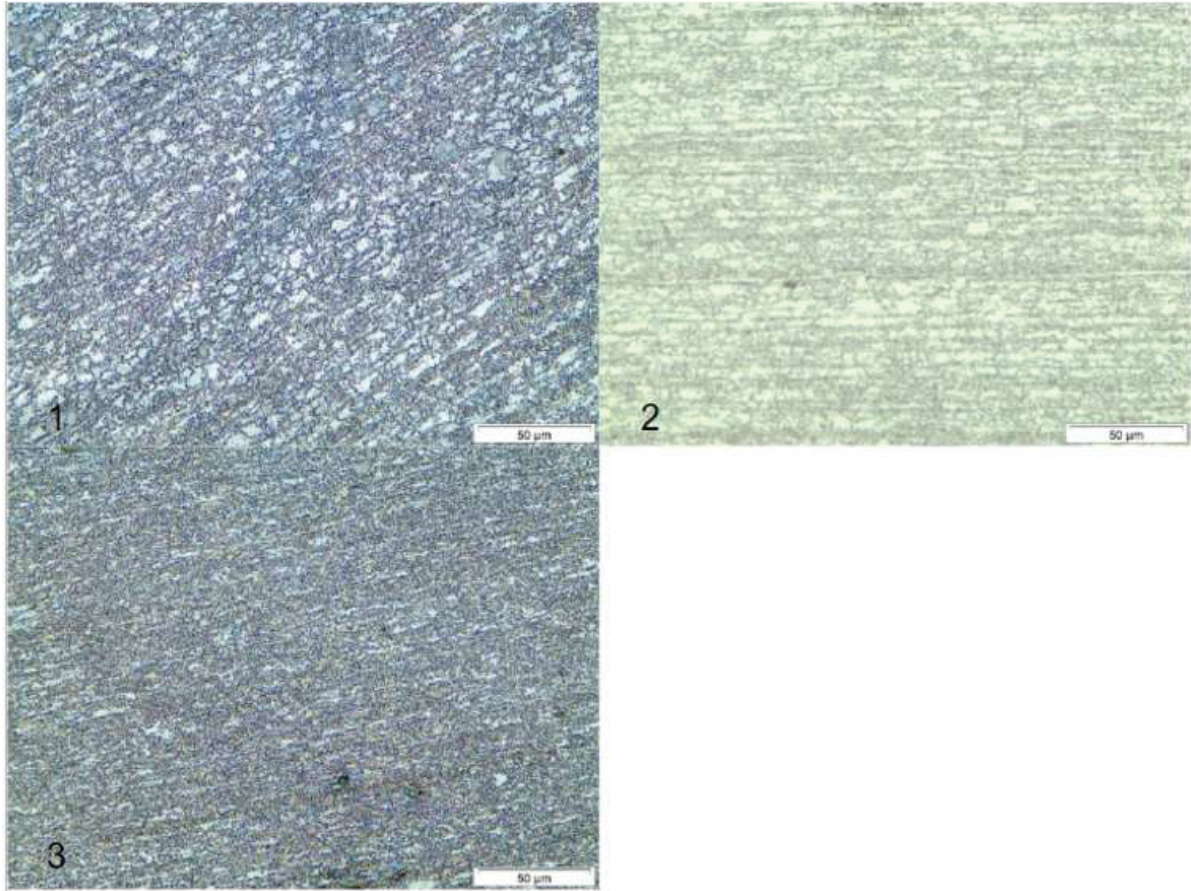
FONTE: AUTORA (2023)

Figura 44 - MICROSCOPIA ÓPTICA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD CIRCULAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



FONTE: AUTORA (2023)

Figura 45 - MICROSCOPIA ÓPTICA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD QUADRADO, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



FONTE: AUTORA (2023)

Com base no que foi observado nos artigos listados na revisão bibliográfica sobre os aços bifásicos, nas imagens acima, todas as regiões claras correspondem a matriz ferrítica do material, mais dúctil, enquanto as regiões escuras correspondem ao microconstituente martensítico que compõe a segunda fase esperada para este aço. Não foi possível analisar os contornos de grão deste material através do ataque químico com Nital 3%. Foram realizados vários testes quanto ao tempo e inclusive, concentrações mais altas da mistura, porém os resultados nas imagens se mantiveram como os mostrados acima. As diferenças de contrastes e cores entre cada uma das imagens obtidas se referem à resposta ao ataque químico sofrido por cada uma das peças.

Ao analisar a literatura, como nos trabalhos de Radwanski (2016) e Uehata (2018), foi possível verificar que as imagens obtidas para trabalhos sobre o aço bifásico, tanto na microscopia ótica quanto para a microscopia eletrônica de

varredura são semelhantes às obtidas neste trabalho, mesmo com o uso de outras soluções para realização do ataque químico. Apenas para aços bifásicos processados através de laminação à quente é possível observar os contornos de grão.

É importante ressaltar que, conforme a revisão dos artigos que embasam esta discussão, nas regiões mais escuras também pode ocorrer a presença de bainita, outro microconstituente que apresenta maior resistência do que a matriz ferrítica, porém que tem menores chances de ser encontrado devido à necessidade de uma transformação mais controlada para sua obtenção, e carbonetos provenientes da adição de alguns elementos de liga comuns à composição destes aços, que podem acarretar um maior endurecimento do aço por se alojarem nos contornos de grão do material.

Para aprofundar a leitura e comparação das imagens obtidas através da microscopia óptica, foi utilizado o ImageJ.JS para análise das imagens na ampliação de 100X.

4.3 ANÁLISE DAS IMAGENS ATRAVÉS DO SOFTWARE

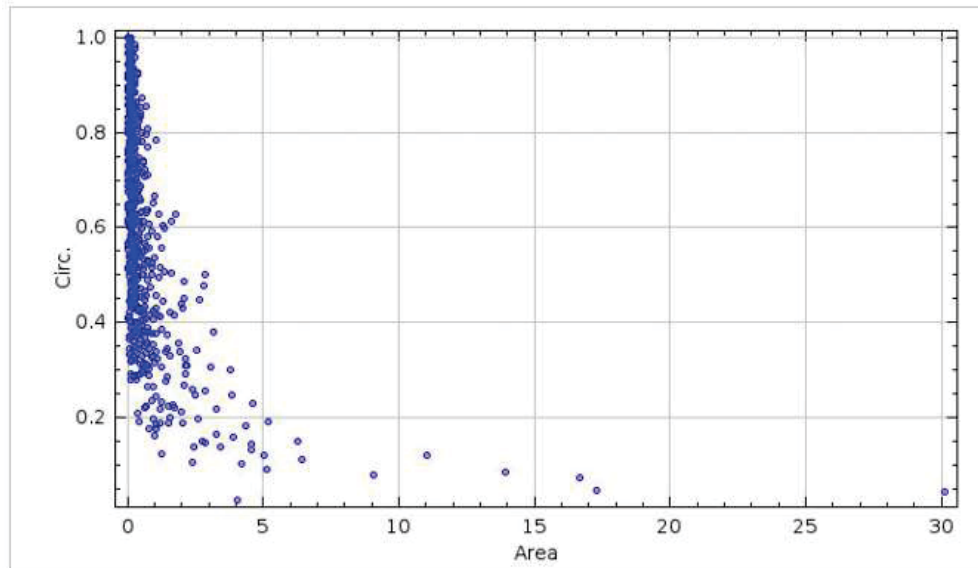
Ao realizar a análise através do software ImageJ.JS no corpo de prova N, foram obtidas a FIGURA 46 e o GRÁFICO 2.

Figura 46 - FASE MARTENSÍTICA DESTACADA PARA A PEÇA N,
COM 100X DE AMPLIAÇÃO



FONTE: AUTORA (2023)

GRAFICO 2 - GRÁFICO DE CIRCULARIDADE X ÁREA OBTIDO A PARTIR DA ANÁLISE MORFOLÓGICA DA FASE MARTENSÍTICA DA PEÇA N



FONTE: AUTORA (2023)

As regiões marcadas em preto na FIGURA 46 correspondem ao destacamento da fase martensítica existente no aço. É possível notar através da análise morfológica da fase martensítica que, em geral, a microestrutura do aço apresenta certo grau de alongamento, mesmo a peça não tendo passado pela conformação através do ensaio de Nakazima modificado.

Com relação aos gráficos apresentados, de circularidade por área, devem ser lidos da seguinte forma: quanto mais próximo de 1, mais circular se apresentou a morfologia da fase martensítica destacada nas imagens. A área, medida pelo programa ImageJ.JS, corresponde a área de cada uma das seleções de fase identificadas através dos comandos utilizados.

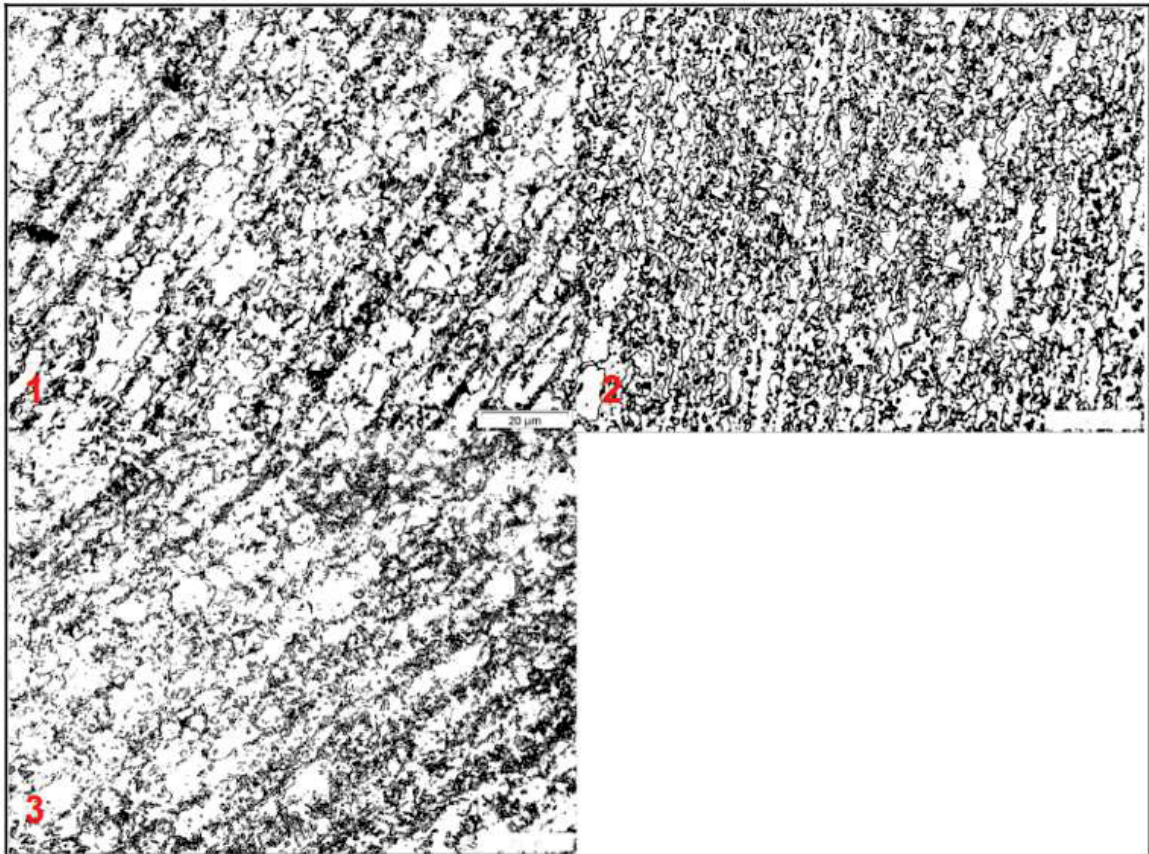
Isso ocorre pelo fato de que este aço bifásico foi processado através da laminação a frio, o que gera um certo alongamento na microestrutura, na direção de laminação da chapa, conforme foi observado na revisão bibliográfica, porém, trata-se de um alongamento menor do que aquele encontrado nas peças que sofreram um processo de conformação posterior, conforme observado adiante neste trabalho.

O GRÁFICO 2, por sua vez, apresenta uma relação entre a circularidade (adimensional, valor de 0 a 1) das regiões destacadas (eixo vertical) e a área de cada uma destas regiões (eixo horizontal), em micrômetros. No geral, quanto maior a área da região martensítica analisada, menor sua circularidade. Regiões maiores, conforme pode ser observado na FIGURA 46, tendem a ser mais alongadas.

Isso ocorre pois, durante o processo de conformação do aço, a microestrutura do material é comprimida, o que gera o encruamento – processo de endurecimento que decorre da deformação plástica à frio do material, conforme revisado na literatura. Esse rearranjo cristalino do material faz com que as regiões de martensita se alonguem. Combinado a isso, o aumento do número de discordâncias na rede cristalina do aço faz com que regiões que antes estavam isoladas na microestrutura, acabam se unindo após a deformação plástica, gerando essas áreas maiores.

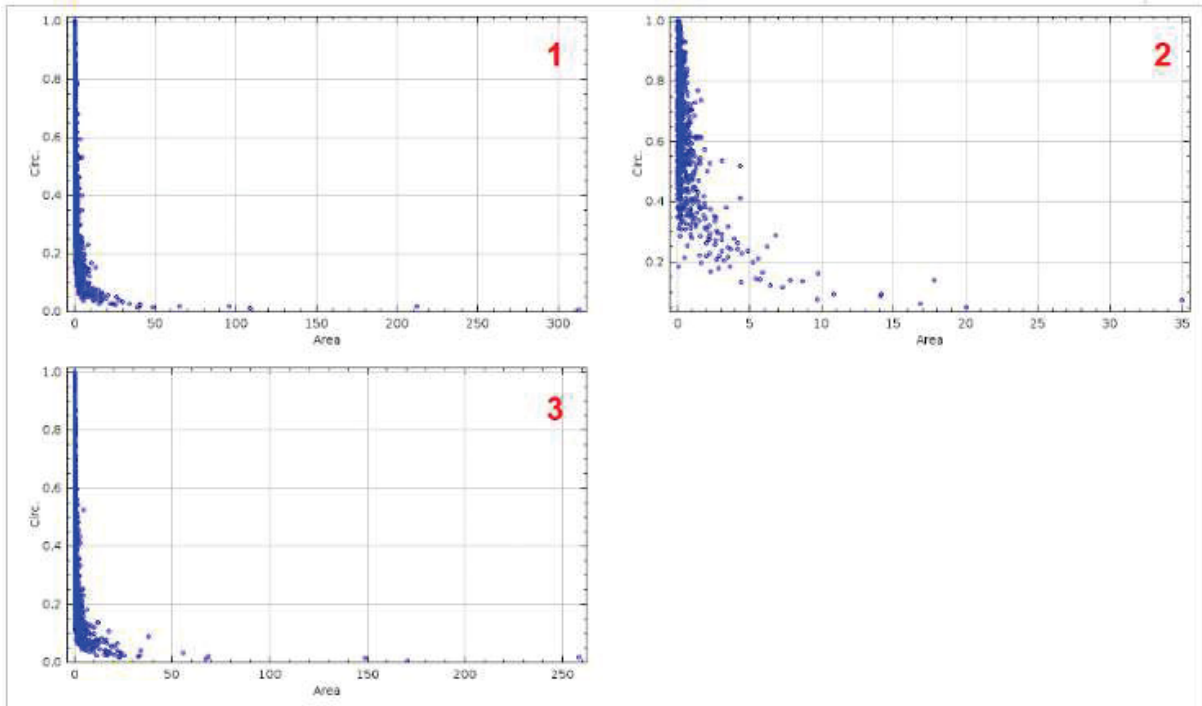
Para a geometria de *drawbead* triangular, foram geradas a FIGURA 47 e o GRÁFICO 3.

Figura 47 - DESTAQUE DA FASE MARTENSÍTICA, PEÇA T2 E RT, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



FONTE: AUTORA (2023)

GRAFICO 3 - GRÁFICOS DE CIRCULARIDADE X ÁREA, PEÇA T2 E RT, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



FONTE: AUTORA (2023)

Para facilitar a comparação e observação das imagens e dos gráficos, elas foram agrupadas por peça, seguindo o fluxo de cada região conformada no corpo de prova durante o teste de Nakazima, sendo então 1 – Região de ação do drawbead, 2 – região do raio da matriz e 3 – região do ombro da matriz, onde ocorreu a fratura em todos os casos analisados neste trabalho.

Ao comparar diretamente a morfologia da fase martensítica das três regiões analisadas para a peça T2 (FIGURA 47) com a peça N (FIGURA 46), pode-se observar que as três regiões observadas na peça T2 apresentam características mais anisotrópicas, indicando maior nível de encruamento em relação à peça N. Este nível maior de encruamento é esperado, devido ao processo de embutimento – teste de nakazima modificado – ao qual a peça T2 foi submetida. A deformação plástica gera um nível de encruamento maior.

Com relação aos gráficos, é possível notar a presença de áreas maiores no eixo horizontal das regiões analisadas para a peça T2, áreas essas formadas pelo destacamento da fase martensítica na FIGURA 47. A presença de áreas maiores

destacadas também são um indicativo de maior encruamento na peça T2 com relação à peça N.

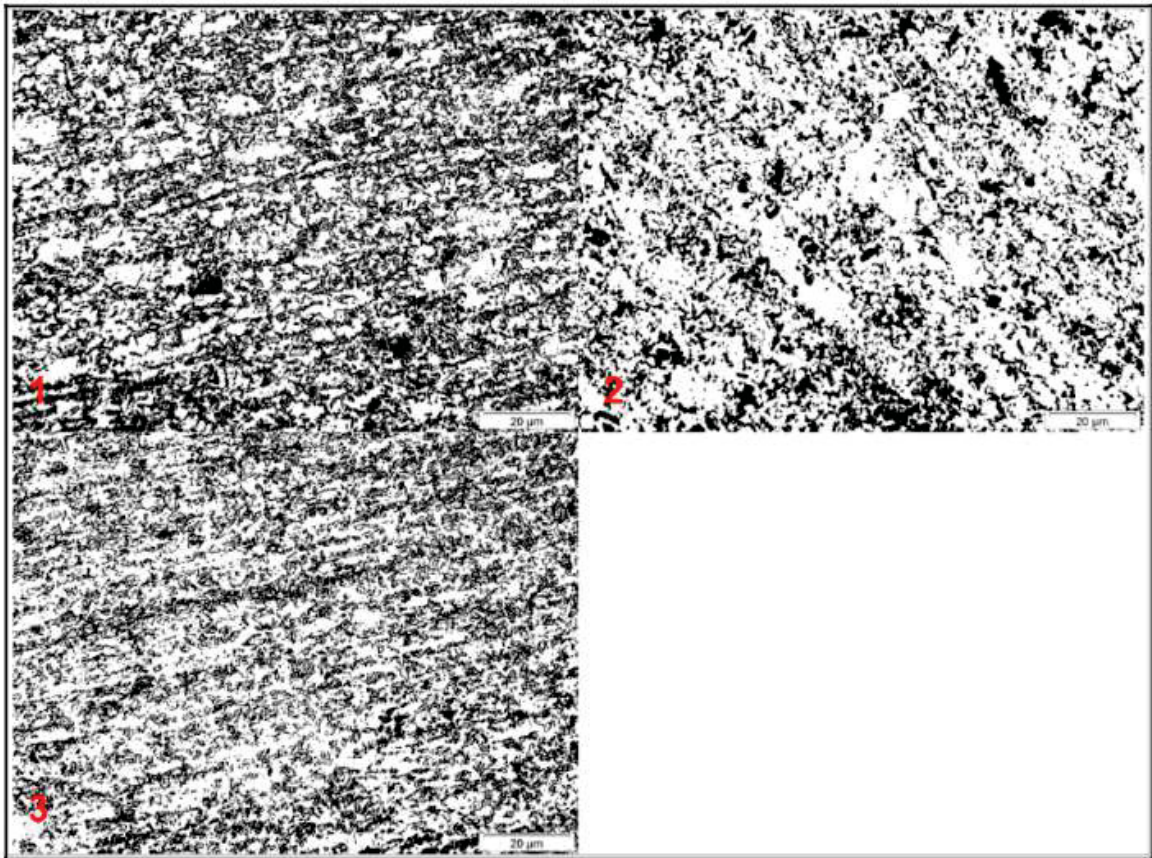
Conforme observado na literatura acerca do encruamento e da microscopia nos aços bifásicos, ao sofrer uma deformação plástica, a estrutura cristalina do material sofre uma distorção, e, conseqüentemente, as fases ferrítica e martensítica observadas nestas imagens também sofrem uma distorção, o que pode fazer com que regiões martensíticas que inicialmente não se encontravam na microestrutura do material, após a deformação plástica que gera uma transformação martensítica devido ao trabalho mecânico, passam a se encontrar formando assim regiões maiores, conforme observado no gráfico.

Observando apenas a FIGURA 47, entre as regiões 1, 2 e 3 analisadas, a região 2 - que indica a peça proveniente do raio da matriz - é a que mais se destaca pois, analisando qualitativamente a morfologia apresentada na figura, é possível notar a presença de mais regiões isoladas da fase martensítica, o que é comprovado no GRÁFICO 3, devido às áreas menores indicadas no eixo horizontal para esta região. Tanto graficamente, quando na análise da figura, a peça do raio da matriz é a que mais se assemelha à peça N.

Isso ocorre pois, conforme observado na literatura, a região do raio da matriz sofre uma deformação plástica semelhante a uma dobra, o que não gera uma distorção tão significativa nas fases ferrítica e martensítica observadas.

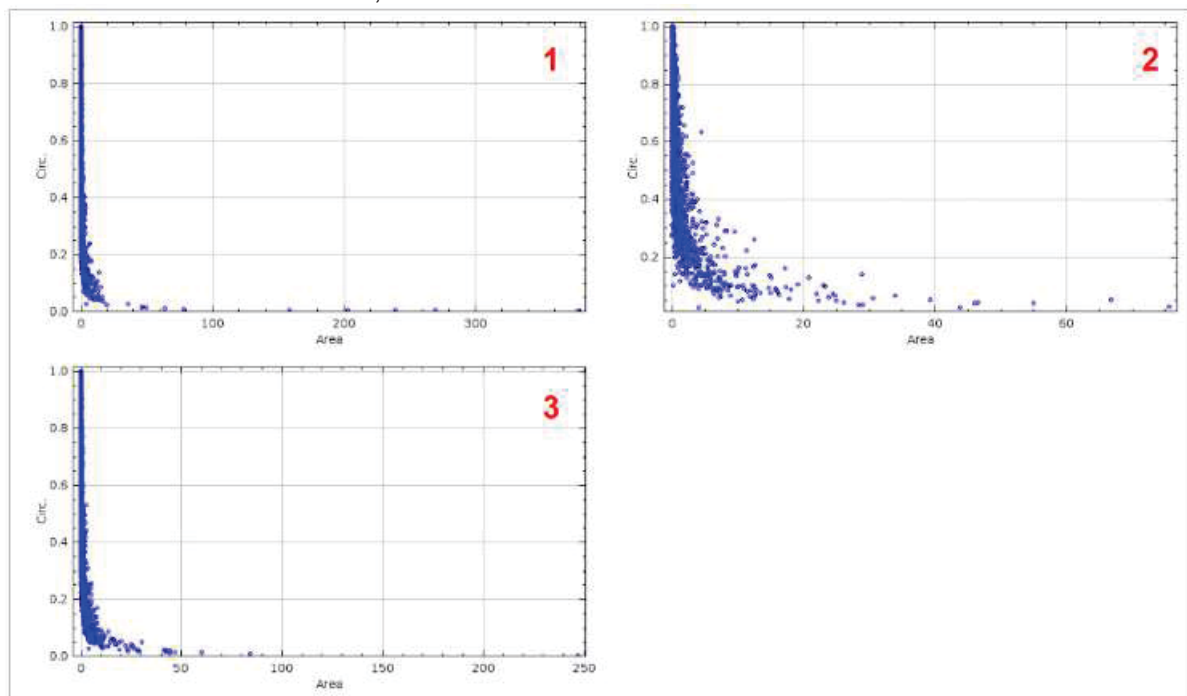
Para a geometria de drawbead circular, foram geradas as FIGURA 48 e GRÁFICO 4.

Figura 48 - DESTAQUE DA FASE MARTENSÍTICA, PEÇA C2 E RC, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



FONTE: AUTORA (2023)

GRAFICO 4 - GRÁFICOS DE CIRCULARIDADE X ÁREA, PEÇA C2 E RC, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



FONTE: AUTORA (2023)

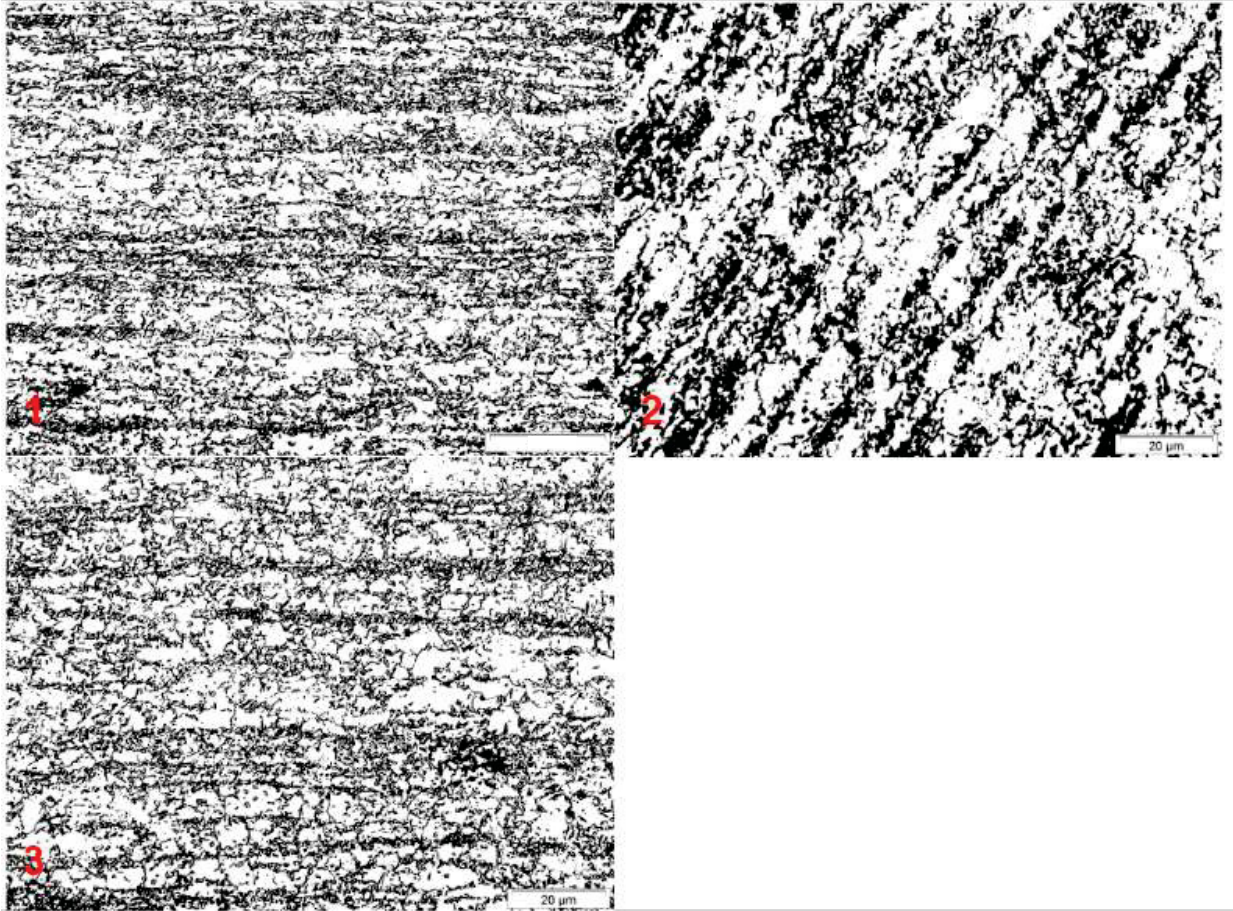
A comparação dos resultados obtidos para a peça C2 com os resultados obtidos para a peça N, tanto na análise da morfologia de fases, quanto na análise gráfica, geram observações muito semelhantes à comparação da peça analisada anteriormente (peça T2) com a peça N.

Há portanto uma morfologia da fase martensítica mais alongada nas regiões do drawbead e no ombro da matriz, onde ocorreu a falha, quando comparada a morfologia da peça N (FIGURA 45). Esse fato também é comprovado pela presença de áreas maiores no GRÁFICO 4 para essas duas regiões.

Tanto para peça C2 (FIGURA 48) quanto para T2 (FIGURA 47) a região da do raio da matriz (indicados pela imagem 2 nas FIGURAS 47 e 48 e GRÁFICOS 3 e 4) é a região que mais se assemelha com a imagem e gráficos obtidos na análise da peça N, fator justificado pela ocorrência de uma deformação plástica de dobra, e não de estrição nesta região.

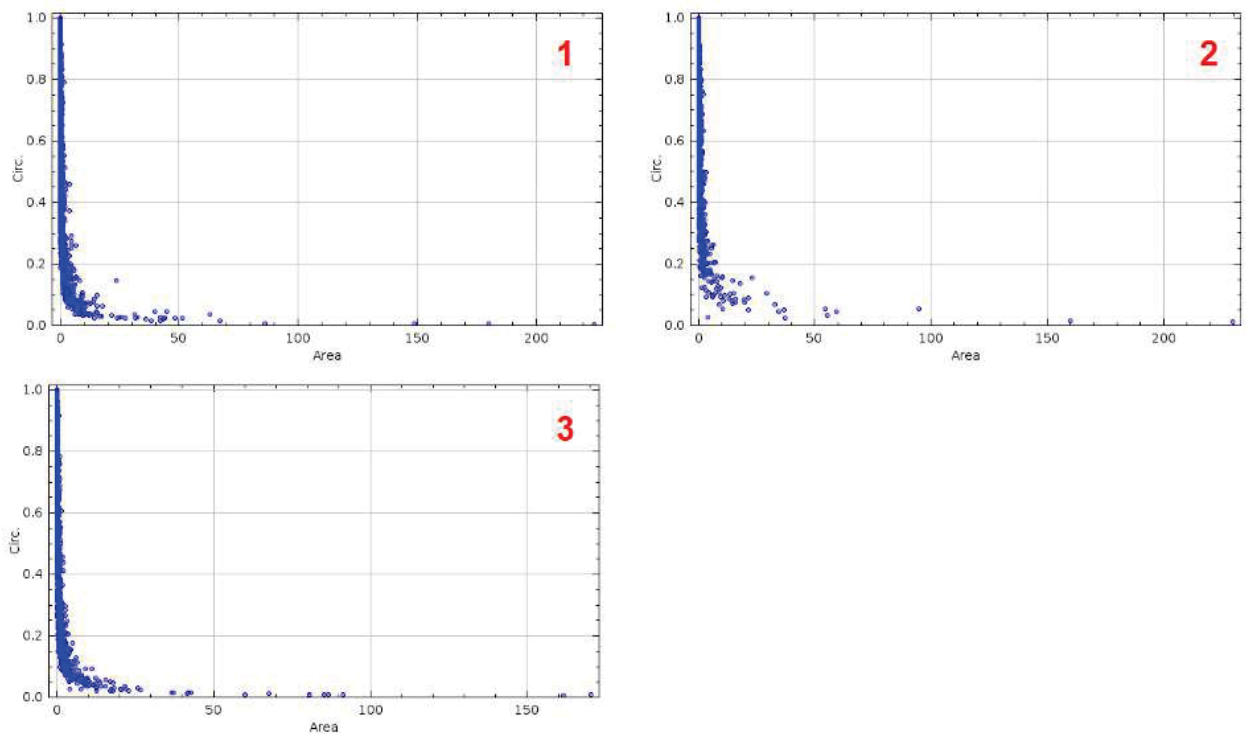
Para a geometria de drawbead planar, foram obtidas a FIGURA 49 e GRÁFICO 5.

Figura 49 - DESTAQUE DA FASE MARTENSÍTICA, PEÇA P2 E RP, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



FONTE: AUTORA (2023)

GRAFICO 5 - GRÁFICOS DE CIRCULARIDADE X ÁREA, PEÇA P2 E RP, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



FONTE: AUTORA (2023)

No caso da comparação da peça P2 com a peça N há resultados semelhantes àqueles encontrados na comparação das peças T2 e C2 feita anteriormente, exceto para a região do raio da matriz.

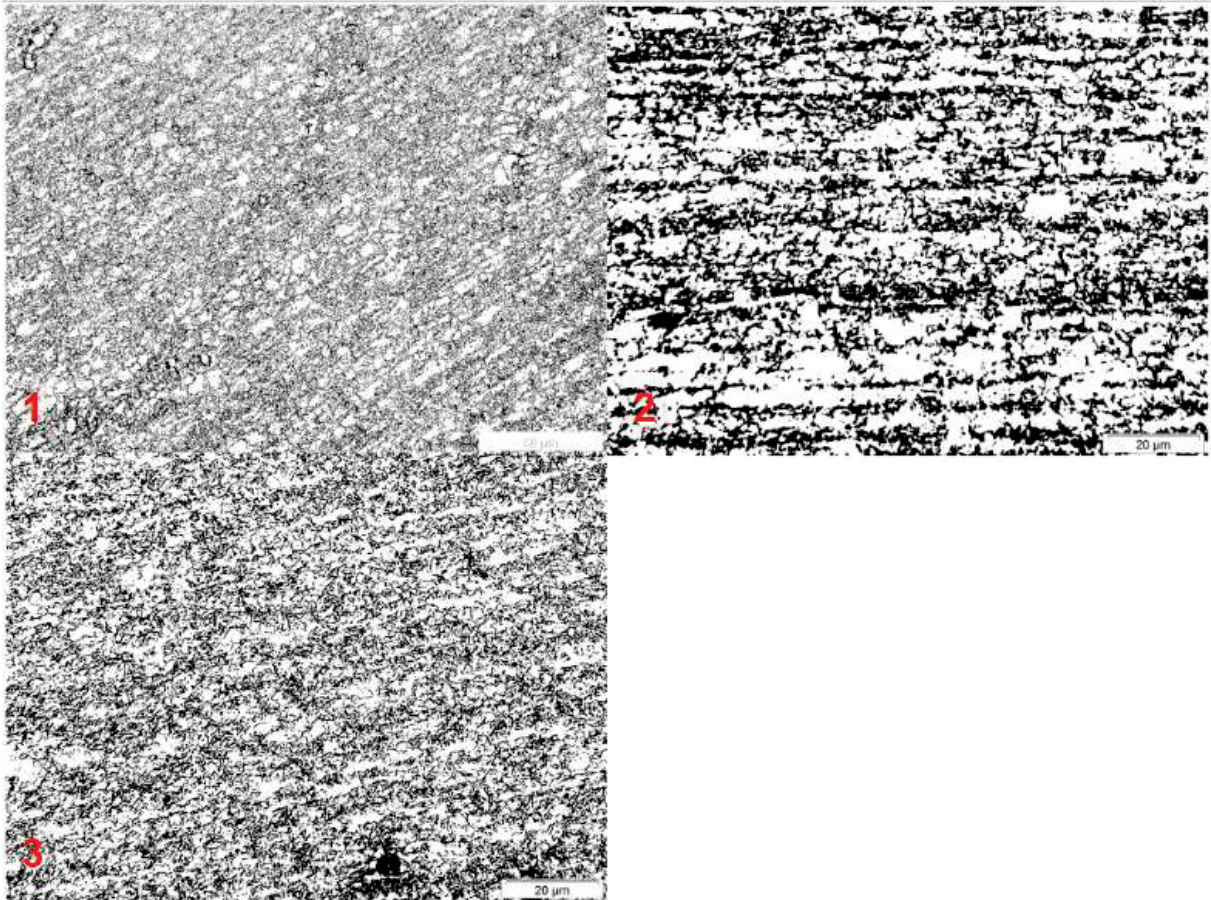
É importante destacar o fato de que, na peça P2, há a ocorrência de áreas maiores da fase martensítica na região do raio da matriz (indicados pelo GRÁFICO 5-2), região na qual, conforme observado anteriormente a análise de T2 e C2, houve a ocorrência de áreas menores.

Apesar disso, ao analisar a FIGURA 49-2 percebe-se um distanciamento maior entre as regiões destacadas do que nas FIGURAS 49-1 e 49-3, semelhante ao que foi observado na microestrutura da região 2 para as peças analisadas anteriormente.

A peça P2 corresponde à utilização de *drawbead* planar, ou seja, não há a ocorrência de uma intervenção geométrica na peça, o que afeta diretamente o escoamento do material para a matriz no momento do embutimento. Isso pode gerar um escoamento não uniforme na região do raio da matriz da peça P2, o que pode explicar o resultado diferente obtido na área do gráfico.

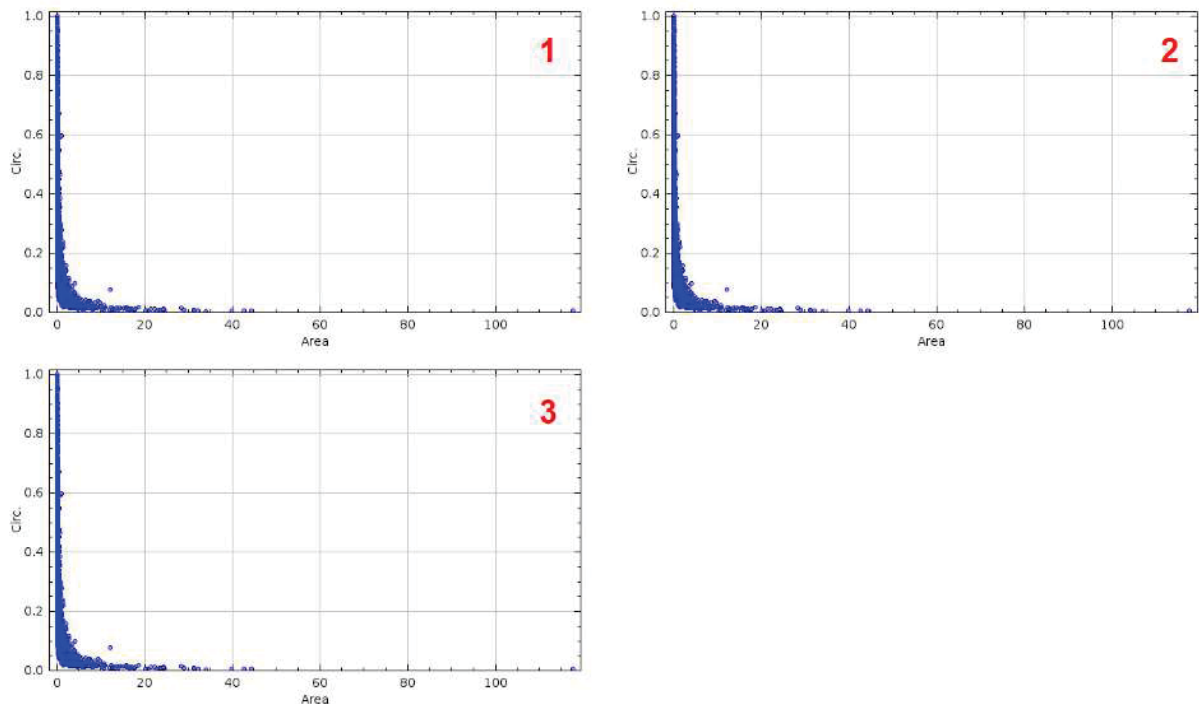
Para a geometria de *drawbead* quadrado, foram obtidas a FIGURA 50 E GRÁFICO 6.

Figura 50 - DESTAQUE DA FASE MARTENSÍTICA, PEÇA Q2 E RQ, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



FONTE: AUTORA (2023)

GRAFICO 6 - GRÁFICOS DE CIRCULARIDADE X ÁREA, PEÇA Q2 E RQ, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA



FONTE: AUTORA (2023)

A comparação direta da peça Q2 com a peça N mostra observações muito semelhantes às das peças T2, C2.

Um fato que pode ser observado também na comparação da peça Q2 com as demais peças analisadas anteriormente é que na peça Q2 pode-se notar o destacamento de uma morfologia da fase martensítica mais semelhante entre as três regiões analisadas (1-drawbead, 2-raio da matriz, 3-fratura), além da ocorrência de áreas similares nestas regiões a partir da análise do GRÁFICO 6.

No geral, ao comparar as imagens obtidas para as amostras conformadas com os diferentes perfis de *drawbead* e a amostra N, àquela que não foi submetida a nenhum processo de conformação, pode-se observar que a morfologia da fase martensítica apresenta maior alongamento após ser submetida à conformação, com base na análise das peças T2, C2, P2 e Q2.

Ao comparar os perfis morfológicos entre as partes correspondentes ao *drawbead*, ao raio da matriz e a região onde ocorre a falha, é possível observar uma diferença sutil na morfologia de cada uma delas, visto que todas as regiões sofreram deformação plástica no processo, independente da morfologia de *drawbead*

utilizada. Em geral, a ocorrência de regiões mais alongadas é um indicativo de maior deformação, e conseqüentemente, maior encruamento da peça.

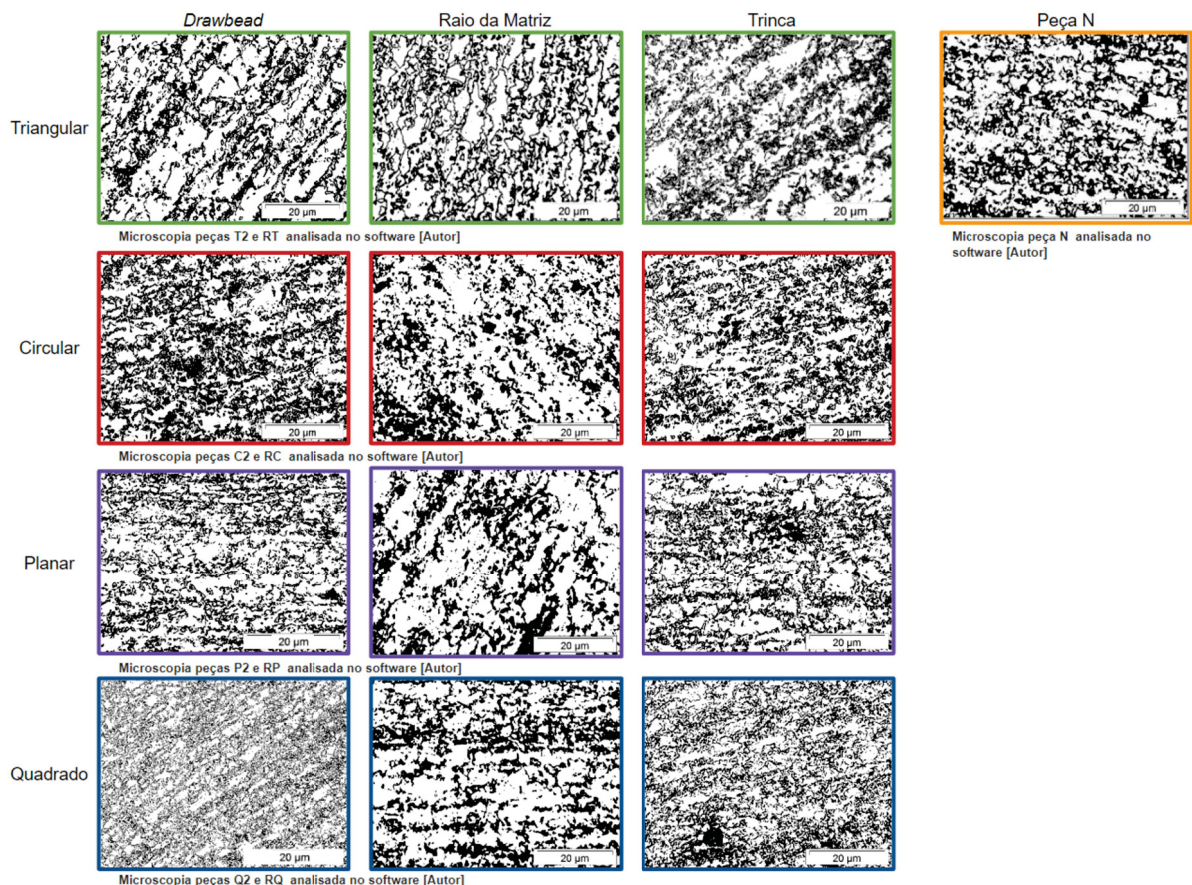
É importante notar que há seleções de fases maiores para algumas regiões analisadas. Isso é um indicativo de uma distorção maior na fase martensítica, fazendo com que um ou mais pontos acabassem se unindo na análise realizada, o que, por sua vez, também resulta da ocorrência de maior deformação plástica, visto que a deformação plástica ocasiona o encruamento.

Não é possível definir qual é o melhor perfil de *drawbead* para cada situação na conformação baseado apenas na análise dos gráficos e imagens apresentadas. É possível ver sim uma diferença na microestrutura para cada uma das peças ensaiadas, no entanto, essas diferenças são sutis, não sendo possível definir apenas com base nesse estudo qual perfil de *drawbead* é mais ou menos efetivo.

Para facilitar a observação de cada um dos pontos apresentados nas discussões, a FIGURA 51 mostra as imagens lado a lado, em menores proporções de tamanho.

Figura 51 - RESUMO DAS MICROSCOPIAS ÓTICAS NA AMPLIAÇÃO DE 100X ANALISADAS NO

SOFTWARE IMAGEJ.JS



FONTE: AUTORA (2023)

A metodologia descrita neste trabalho, com a medição de dureza e a análise das imagens com auxílio de um software para destacar as fases do aço bifásico se mostrou satisfatória. A análise de imagens através do software possibilita a extração de dados que não são observados apenas através de uma análise convencional, como a circularidade, por exemplo, enquanto o ensaio de dureza auxilia na análise geral do comportamento do material, em especial por ter sido submetido a um ensaio de conformação, no caso, o ensaio de Nakazima modificado.

4.4 IMAGENS OBTIDAS ATRAVÉS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)

Foram realizados vários testes para captura das imagens do aço bifásico através da microscopia eletrônica. Foram obtidos melhores resultados ao observar os corpos de prova quando atacados com o reagente Nital 3%. As imagens para cada uma das peças analisadas (peça N, T2, C2, P2 e Q2) serão introduzidas no APÊNDICE 1, seguindo a mesma organização utilizada para análise das peças através da microscopia ótica.

Através das imagens obtidas pelo MEV, foi possível obter informações relevantes quando aos microconstituintes do aço DP780, sendo observado apenas a presença de ferrita, martensita e alguns carbonetos na microestrutura. Com relação ao encruamento e deformação sofridos pelo material, devido ao baixo contraste das imagens, não é possível inferir mais do que aquilo que foi observado nas imagens de microscopia ótica, apresentadas no tópico anterior.

5 CONCLUSÃO

O ensaio de dureza Rockwell D se mostrou uma forma eficiente para a análise comparativa das peças que foi realizada neste trabalho. A peça N, apresentou dureza menor do que àquelas que foram submetidas ao ensaio de Nakazima modificado, conforme era esperado, devido à ocorrência de deformação plástica nas peças submetidas ao ensaio de Nakazima.

A região do raio da matriz apresentou maior dureza do que as outras regiões (*drawbead* e ombro da matriz) analisadas. Essa região sofre uma deformação plástica semelhante a uma dobra, o que gera o aumento de discordâncias em sua estrutura cristalina – porém, como nessa região não ocorre um estiramento expressivo, sua microestrutura se assemelha mais à microestrutura observada na peça N do que a microestrutura das outras regiões deformadas.

A comparação dos resultados obtidos para as peças conformadas com os resultados de uma peça como recebida auxilia a visualização da evolução microestrutural que ocorre com o processo de deformação plástica.

Foi possível observar que a peça ensaiada com o *drawbead* circular sofreu maior encruamento do que àquelas conformadas em outras configurações de *drawbead*. Isso sugere que o *drawbead* circular é aquele que ocasiona uma maior restrição ao escoamento do material para a matriz. Para confirmação deste fato é necessária a realização de mais análises semelhantes a esta, realizada neste trabalho.

Apenas a análise isolada realizada neste estudo não é capaz de comprovar qual o melhor *drawbead* para cada situação onde eles podem ser aplicados na indústria.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos baseados neste estudo, pode dar-se continuidade realizando os seguintes testes:

1. Verificação e quantificação do percentual de fases de cada uma das imagens analisadas pelo *software* ImageJ.JS.

2. Realização de um ensaio de microdureza, como a medição de dureza Vickers, possibilitando uma análise precisa dos valores de dureza de cada um dos corpos de prova.

3. Obtenção de imagens com espectroscopia por energia dispersiva de raios X e difração de elétrons retroespalhados (EDS e EBSD) para cada um dos corpos de prova, pois, segundo a literatura, são as metodologias que melhor se aplicam a análise de aços multifásicos.

4. Definir um método quantitativo para análise do encruamento de cada uma das amostras.

5. Comparar resultados quantitativos e qualitativos com as Curvas Limite de Conformação obtidas no trabalho de Oliveira et al. (2022) de maneira a complementar os trabalhos realizados.

REFERÊNCIAS

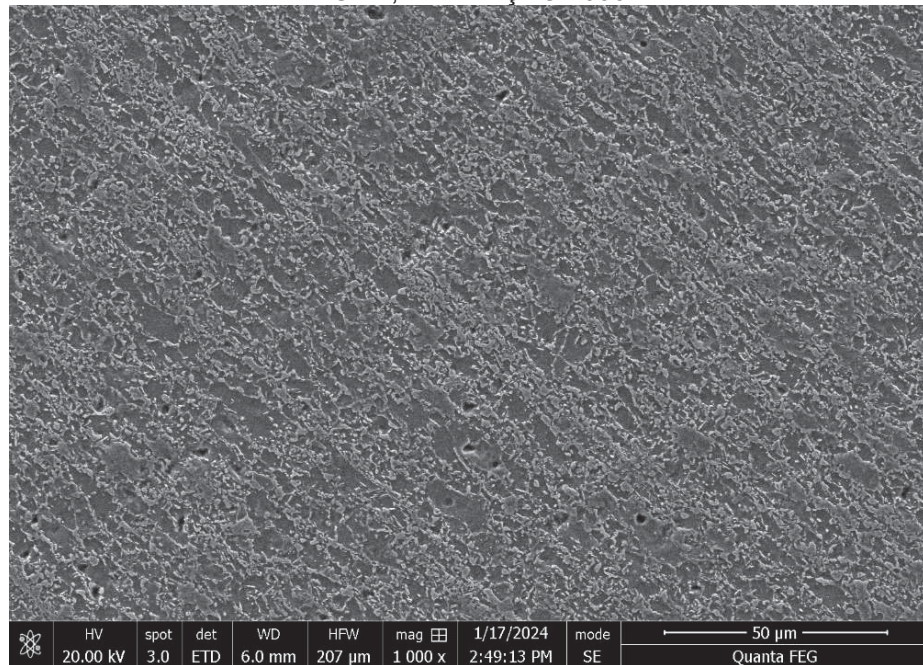
- (1) GORNI, AA. Engenharia microestrutural das chapas de aços avançados de alta resistência. In: 11ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas. Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, Porto Alegre. 2008. p. 08-10.
- (2) HULKA, K. Modern multi-phase steels for the automotive industry. In: Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2002. p. 101-110.
- (3) KUZIAK, R.; et al. Advanced high strength steels for automotive industry. Archives of civil and mechanical engineering, v. 8, n. 2, p. 103-117, 2008.
- (4) OLIVEIRA, AR, et al. Influence of drawbead geometry and blank holder force on the dual phase steel formability. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 121, n. 9-10, p. 5823-5833, 2022.
- (5) BHADESHIA, H. K. D. H. Martensitic transformation. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, p. 5203-5206, 2001.
- (6) BLECK, W., et al. Microalloying of cold-formable multi phase steel grades. In: Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2005. p. 97-114.
- (7) JEANNEAU, M. et al. The trends of steel products in the European automotive industry. Metallurgical Research & Technology, v. 97, n. 11, p. 1399-1408, 2000.
- (8) SHAW, J et al. ULSAB-advanced vehicle concepts–materials. SAE Transactions, p. 21-29, 2002.
- (9) ABEYRATHNA, B. Springback and end flare compensation in flexible roll forming. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. p. 012048.
- (10) SCHMID, H. et al. An incremental analysis of a deep drawing steel's material behaviour undergoing the predeformation using drawbeads. In: Journal of physics: conference series. IOP Publishing, 2017. p. 012010.
- (11) HORVATH, C. D. Advanced steels for lightweight automotive structures. In: Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles. Woodhead Publishing, 2021. p. 39-95.
- (12) RASHID, M. S. Dual phase steels. Annual Review of Materials Science, v. 11, n. 1, p. 245-266, 1981.
- (13) KIM, NJ. et al. Effective grain size of dual-phase steel. Materials Science and Engineering, v. 83, n. 1, p. 145-149, 1986.
- (14) OLIVER, S.; JONES, T. B.; FOURLARIS, G. Dual phase versus TRIP strip steels: comparison of dynamic properties for automotive crash performance. Materials Science and Technology, v. 23, n. 4, p. 423, 2007.
- (15) ZHANG, L. Experimental and theoretical investigation on the role of friction in Nakazima testing. International Journal of Mechanical Sciences, v. 133, p. 217-226, 2017.
- (16) FEISTLE, M; et al. Edge crack test methods for AHSS steel grades: A review and comparisons. Journal of Materials Processing Technology, v. 302, p. 117488, 2022.
- (17) MA, B. L. et al, Evaluation of limit strain and temperature history in hot stamping of advanced high strength steels (AHSS). International Journal of Mechanical Sciences, v. 128, p. 607-613, 2017.
- (18) SANTOS, RA. Avaliação da Curva Limite de Conformação Usando o Teste de Marciniak Comparando com Teste de Nakazima para Avaliação de Chapa de Aço de Alta Estampabilidade. 2007.

- (19) BORNANCIN A, et al. Numerical comparison of advanced high strength steels forming limit curve using Banabic and Nakazima tests. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, p. 1-10, 2023.
- (20) TIGRINHO, LMV., et al. Fracture analysis approach of DP600 steel when subjected to different stress/strain states during deformation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 69, p. 1017-1024, 2013.
- (21) KOVÁČ, P; et al. Blank holder force optimization of hemispherical product using numerical simulation. *Materials science and technology No. 5 (2010)*, p. 5-10, 2010.
- (22) 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, 2017.
- (23) BAE, GH., et al. Simulation-based prediction model of the draw-bead restraining force and its application to sheet metal forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 187, p. 123-127, 2007.
- (24) MAIER, C., et al. Improved part quality in complex deep drawing using variable draw bead motion control. *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in machine building*, v. 29, n. 2, p. 135-138, 2011.
- (25) HAASE, OC. et al. Enabling stamping processes through meticulous FE Modelling-segmented drawbeads and remesh criteria. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018. p. 012091.
- (26) NACEUR, H. et al. Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 43, n. 10, p. 2407-2434, 2001.
- (27) 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.
- (28) LOW, SR. et al. Rockwell hardness. In: *Proc. 1999 Workshop and Symp.(Charlotte, NC)*. 1999.
- (29) CADONI, E. et al. Strain rate effects on the mechanical behavior of two Dual Phase steels in tension. *The European Physical Journal Special Topics*, v. 225, n. 2, p. 409-421, 2016.
- (30) AVENDAÑO-RODRÍGUEZ, D. et al. Fracture Mechanisms in Dual-Phase Steel: Influence of Martensite Volume Fraction and Ferrite Grain Size. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, v. 11, n. 6, 2018.
- (31) ENNIS, B. L. et al. Work hardening behaviour in banded dual phase steel structures with improved formability. *Materials Science and Engineering: A*, v. 713, p. 278-286, 2018.
- (32) TECNOFERRAMENTAS. Durômetro de Bancada Rockwell Carregamento Manual Resolução de 0,5HR Força Inicial de Teste 3Kgf(29,42N) NOVOTEST.BR iRock-433H. Disponível em: <https://www.tecnoferramentas.com.br/durometro-de-bancada-rockwell-carregamento-manual-resolucao-de-05hr-forca-inicial-de-teste-3kgf2942n-novotestbr-irock-433h-040629_0/p> Acesso em: 2024.
- (33) AROTEC. Lixadeira/ politriz metalográfica. Disponível em: <<https://arotec.com.br/product/lixadeira-politriz-metalografica/>> Acesso em: 2024
- (34) IMAGEJ. ImageJ.JS. Disponível em: <<https://ij.imjoy.io>> Acesso em: 2023
- (35) SAMUEL, M. Influence of drawbead geometry on sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 122, n. 1, p. 94-103, 2002.

- (36) OLIVER, S. et al. Dual phase versus TRIP strip steels: comparison of dynamic properties for automotive crash performance. *Materials Science and Technology*, v. 23, n. 4, p. 423-431, 2007.
- (37) WATERSCHOOT, T., et al. Static strain aging phenomena in cold-rolled dual-phase steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 34, p. 781-791, 2003.
- (38) COLLA, V., et al. Strain hardening behavior of dual-phase steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 40, p. 2557-2567, 2009.
- (39) BAG, A; et al, Influence of martensite content and morphology on tensile and impact properties of high-martensite dual-phase steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 30, p. 1193-1202, 1999.
- (40) CONCEPCIÓN, VL. et al. Effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of dual phase steels. *Procedia Materials Science*, v. 8, p. 1047-1056, 2015.
- (41) BALUCH, N; et al. Advanced high strength steel in auto industry: an overview. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 4, n. 4, p. 686-689, 2014.
- (42) RANA, R; et al. *Automotive steels: design, metallurgy, processing and applications*. Woodhead Publishing, 2016.
- (43) ARCELLORMITAL, AÇOS PLANOS. Catálogo de Produtos Laminados. América, Brasil, Ed. de 2015. Disponível em <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/exportacao/bobinas/acos-dual-phase>>, Acesso em 2024.
- (44) RADWAŃSKI, K. Structural characterization of low-carbon multiphase steels merging advanced research methods with light optical microscopy. *Archives of civil and mechanical engineering*, v. 16, p. 282-293, 2016.
- (45) UEHATA, N., et al. Optical microscopy-based damage quantification: an example of cryogenic deformation of a dual-phase steel. *isij international*, v. 58, n. 1, p. 179-185, 2018.
- (46) ALIPOUR, M., et al. Finite element and experimental method for analyzing the effects of martensite morphologies on the formability of DP steels. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, v. 48, n. 5, p. 525-541, 2020.
- (47) NASSER, A. et al. Determination of the flow stress of five AHSS sheet materials (DP 600, DP 780, DP 780-CR, DP 780-HY and TRIP 780) using the uniaxial tensile and the biaxial Viscous Pressure Bulge (VPB) tests. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, n. 3, p. 429-436, 2010.
- (48) KANEKO, T, et al. Combined multi-scale analyses on strain/damage/microstructure in steel: example of damage evolution associated with ϵ -martensitic transformation. *isij international*, v. 56, n. 11, p. 2037-2046, 2016.
- (49) OLIVEIRA, AR. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO DRAW BEAD NA CONFORMABILIDADE DO AÇO DUAL PHASE DP 780, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2021.
- (50) TIGRINHO, LMV et al. Influência da Lubrificação na Estampagem para Obtenção da Curva CLC., Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2005.
- (51) BANABIC, Dorel et al. Advances in anisotropy and formability. *International journal of material forming*, v. 3, p. 165-189, 2010.

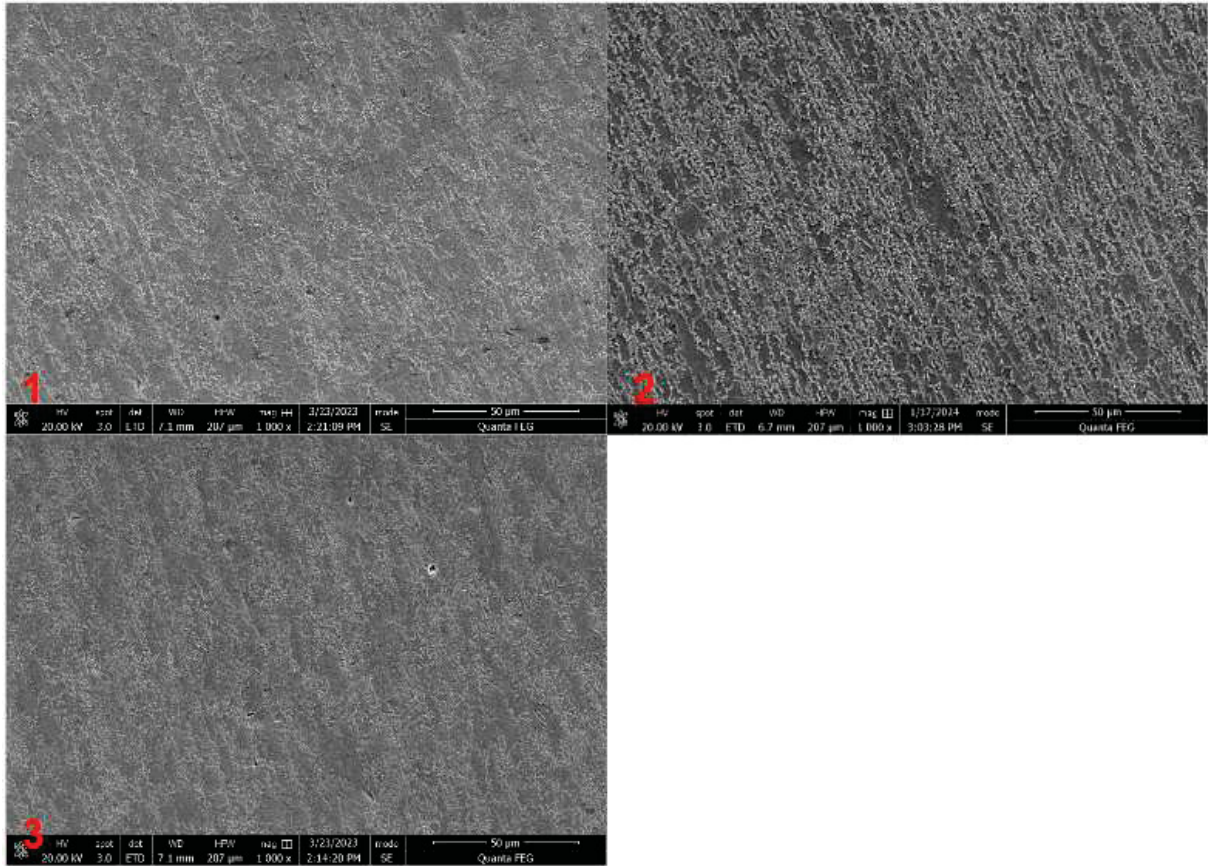
APÊNDICE 1 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA

Figura 52 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, PEÇA VIRGEM, AMPLIAÇÃO 1000X.



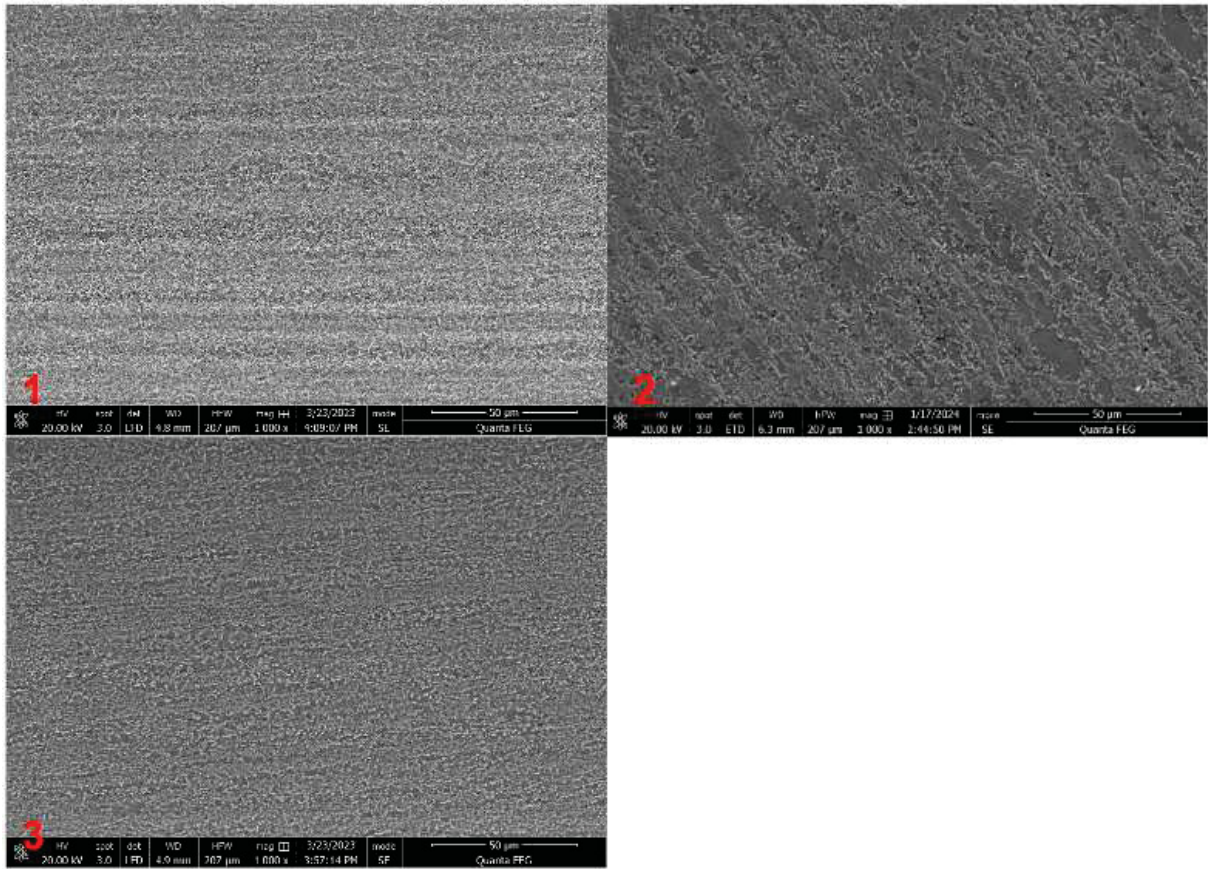
FONTE: AUTORA (2023)

Figura 53 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD TRIANGULAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA, AMPLIAÇÃO DE 1000X.



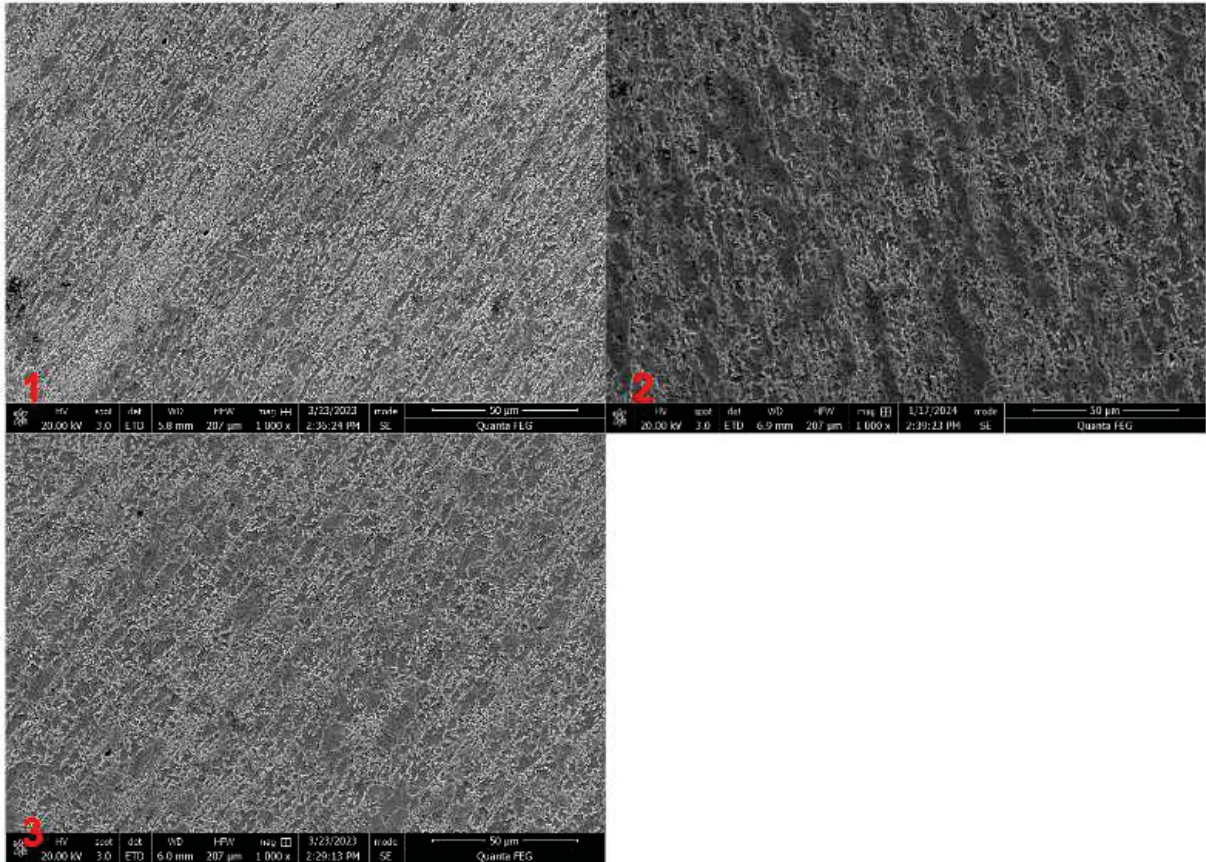
FONTE: AUTORA (2023)

Figura 54 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD CIRCULAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA, AMPLIAÇÃO DE 1000X.



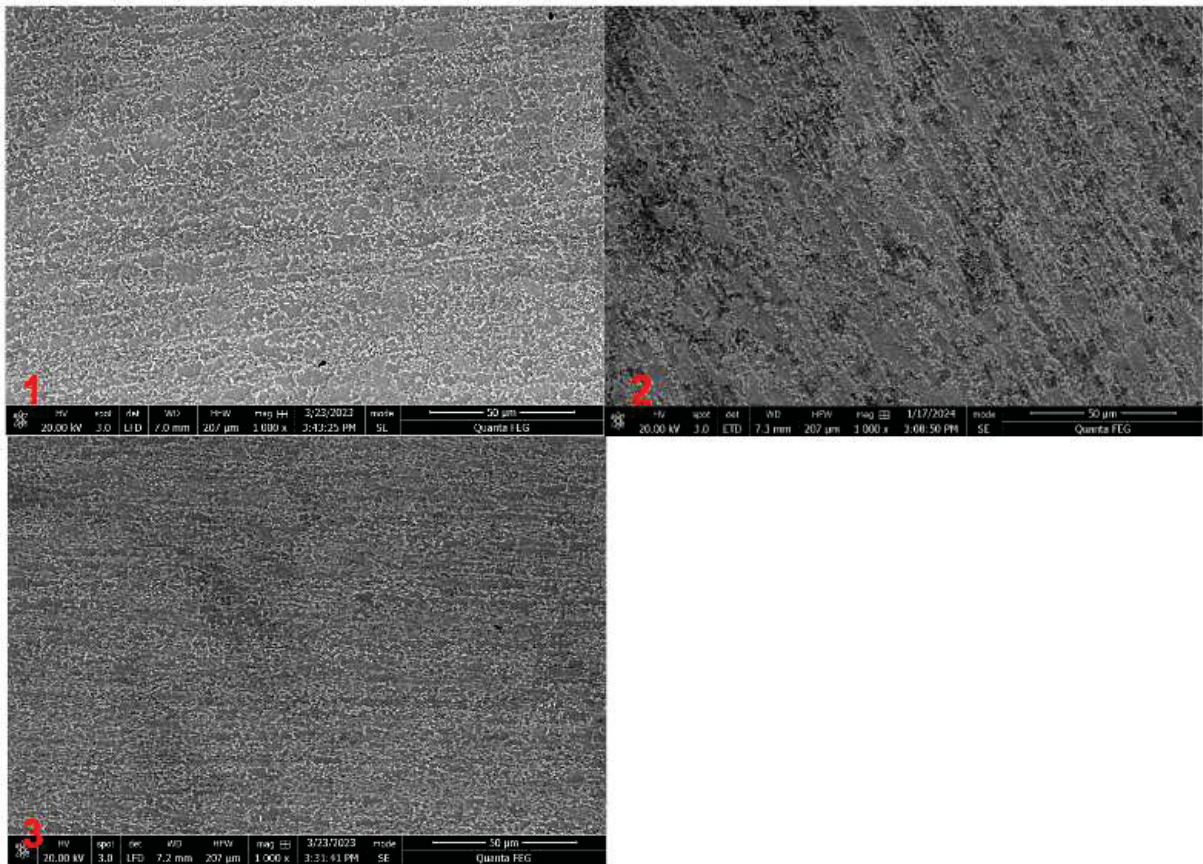
FONTE: AUTORA (2023)

Figura 55 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD PLANAR, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA, AMPLIAÇÃO DE 1000X.



FONTE: AUTORA (2023)

Figura 56 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, GEOMETRIA DE DRAWBEAD QUADRADO, SENDO AS REGIÕES 1 - DRAWBEAD, 2 - RAIOS DA MATRIZ E 3 - REGIÃO DE FRATURA, AMPLIAÇÃO DE 1000X.



FONTE: AUTORA (2023)