

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS, METALURGICA E MATERIAIS

MAURICIO BOEIRA CURNELIUS

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE
DOBRAMENTO COM CHAPAS DE HARDOX 500

Porto Alegre

2020

MAURICIO BOEIRA COURNELIUS

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE
DOBRAMENTO COM CHAPAS DE HARDOX 500

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes

Porto Alegre

2020

MAURICIO BOEIRA CURNELIUS

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE
DOBRAMENTO COM CHAPAS DE HARDOX 500**

Esta dissertação de mestrado foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes

Prof. Dr. Afonso Reguly

Aprovado em ___ / ___ / _____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha UFRGS _____

Prof. Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito – UFRGS _____

Dr. Eng. Guilherme Vieira Braga Lemos – LAMEF _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, pelo apoio incondicional sempre prestado, que foram e sempre serão fundamentais para minha formação acadêmica, e superação de todas as minhas dificuldades.

Ao Professor Dr. Rafael Nunes, pela fundamental acolhida deste trabalho, profunda dedicação, aplicação de sugestões e de seu conhecimento para a realização deste projeto, sua contribuição foi sem dúvidas fundamental para todas as etapas desse processo.

Aos demais membros do LdTM, técnicos, alunos e bolsistas, pelo relevante e indispensável auxílio no desenvolvimento deste trabalho, com sugestões e contribuição técnica para o desenvolvimento deste projeto.

A Ana Schmitt e a empresa SSAB, que prontificaram-se a contribuir espontaneamente com o fornecimento de toda a matéria prima para a realização deste estudo, fomentando assim a pesquisa e desenvolvimento acadêmico, viabilizando o desenvolvimento de inovações voltadas a indústria.

Agradecemos ao CNPq, que por meio do projeto de auxílio 431693/2018-8, possibilitou a execução desta pesquisa por meio de investimento financeiro em recursos e equipamentos que foram fundamentais para este estudo.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela bagagem de conhecimentos e experiências dispostas ao longo de toda a pós-graduação e pela disposição de seus laboratórios para a realização deste trabalho.

E a todos que de forma direta ou indireta auxiliaram ao longo do caminho da graduação e da realização deste trabalho.

RESUMO

No presente trabalho, o Hardox 500 é o material foco de estudo, com dureza estimada de 500 HB. Este elevado índice de dureza, confere ao material, um ótimo comportamento quando submetido a condições de abrasividade. Para a realização deste estudo, amostras deste material foram avaliadas quanto a anisotropia, tração, dobramento, metalografia e dureza. Através da realização do ensaio de anisotropia obteve-se uma ampla dispersão dos índices nas amostras, obtendo-se como índice médio 1,076, o que pode indicar uma boa propriedade deste material quando submetido aos processos de conformação. Já o índice de anisotropia planar foi de -0,341, o que indica uma tendência de orelhamento na conformação a 45° e 135° com o eixo de laminação. No o ensaio de tração, o material apresentou valores de limite de escoamento no sentido perpendicular de laminação de aproximadamente 1513 MPa e de 1441 MPa no sentido paralelo, valores que também indicam uma proximidade de propriedades do material em ambos os eixos de laminação. A avaliação do Hardox 500, mediante ao dobramento ocorreu sobre diversos parâmetros do processo, como dobramento paralelo e perpendicular a laminação, velocidades de deslocamento da ferramenta de 2,5, 5, e 50 mm/s, raio de ferramental de 3, 6, 9, 12 e 15 mm, assim como dobramento a diversas temperaturas, sendo elas de 20, 100, 200, 300, 400, 500 °C. O Hardox apresentou para um raio de ferramental de 3 e 6 mm um bom comportamento a partir de 400 e 500 °C, em temperaturas inferiores foram detectadas trincas com 6 mm e ruptura com 3mm. Já para o raio de 9 mm, as amostras aquecidas a temperaturas de 300 °C já apresentaram bom comportamento, enquanto que em casos te temperaturas inferiores, ocorreram nucleações superficiais. Com a aplicação de raios de 12 e 15 mm, nenhuma falha foi encontrada, até mesmo no caso de conformação a temperatura ambiente. Mediante aquecimento a 400 e 500 °C, o material apresentou considerável alteração de suas propriedades, com mudança nas fases presentes de martensita para ferrita, cementita e precipitação de carbonetos, reduzindo conseqüentemente a sua dureza a níveis de até 50% inferior a condição sem aquecimento. Logo, temperaturas mais elevadas podem ser uma opção para melhorar a conformação, porém podem reduzir significativamente a vida útil do Hardox quando submetido a um ambiente abrasivo. As variáveis velocidade e sentido de laminação, não indicaram quaisquer alterações no comportamento do Hardox no processo de dobramento.

Palavras-chaves: Dobramento, aquecimento, dureza, anisotropia, aços de alta resistência ao desgaste, Hardox 500.

ABSTRACT

In the present work, the Hardox 500 is the focus material of study, with an estimated hardness of 500 HB. This high level of hardness gives the material an excellent behavior when subjected to abrasive conditions. To carry out this study, samples of this material were evaluate for anisotropy, traction, bending, metallography and hardness. Through the anisotropy test, a wide dispersion of the indexes in the samples was obtain, resulting an average index of 1.076, which may indicate a good property of this material when submitted to the bending processes. The planar anisotropy index, on the other hand, was -0.341, which indicates a tending trend in the conformation at 45° and 135° with the lamination axis. In the tensile test, the material presents yield stress in the lamination perpendicular direction of approximately 1513 MPa and 1441 MPa in the parallel direction, values that also indicate a proximity of material properties in both lamination axes. The evaluation of the Hardox 500, by means of bending, takes place over several process parameters, such as parallel and perpendicular bending of the rolling mill, tool displacement speeds of 2.5, 5, and 50 mm / s, tool radius of 3, 6, 9, 12 and 15 mm, as well as bending at different temperatures, 20, 100, 200, 300, 400, 500 ° C. Hardox showed a good behavior for tooling radii of 3 and 6 mm from 400 and 500 ° C, at lower temperatures, 6 mm cracks and 3 mm rupture were detected. For the 9 mm radius, samples heated to temperatures of 300 ° C have already performed well, whereas in cases with lower temperatures, surface nucleations have occurred. With the application of 12 and 15 mm radii, no flaws were detect, even in the case of bending at ambient temperature. Upon heating to 400 and 500 ° C, the material showed a considerable change in its properties, with a change in the present phases from martensite to ferrite, cementite and carbide precipitation, consequently reducing its hardness to levels up to 50% below the unheated condition. . Therefore, higher temperatures may be options to improve conformation, but significantly reduce the life of the Hardox when subjected to an abrasive environment. The speed and rolling direction variables did not indicate any changes in the behavior of Hardox in the folding process.

Key words: Bending, heating, hardness, anisotropy, high wear resistance steels, Hardox 500.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conformação sem retorno elástico (a) e com retorno elástico (b)	18
Figura 2 – Região afetada pelo dobramento	19
Figura 3 – Orientação de amostras para ensaio de tração de Daxin et al, 2018.....	20
Figura 4 – Dobramento de três e quatro pontos realizados por Liu et al,2018.....	21
Figura 5 – Processo de conformação por dobramento de três pontos	23
Figura 6 – Evolução de trincas no dobramento encontradas por Tekkaya et al, 2012, com aplicação do ângulo de 80° (a), 90° (b), 100° (c) e 110° (d)	24
Figura 7 – Análises de fratura com microscopia eletrônica de varredura em distintas regiões do corpo de prova	24
Figura 8 – Comparação entre trinca observada por microscopia e obtida por através de simulação numérica.....	26
Figura 9 – Fluxo do processo de conformação de chapas a quente empregado por Nakagawa et al, 2018.	28
Figura 10 – Curva experimental da força requerida pelo deslocamento dos testes de tração usando o critério de fratura.....	29
Figura 11 – Geometria dos corpos de prova empregados para os ensaios de tração.....	32
Figura 12 – Equipamento universal de ensaios EMIC® empregado nos ensaios de tração, anisotropia e dobramento.	33
Figura 13 – Geometria dos corpos de prova aplicados nos ensaios de anisotropia.....	34
Figura 14 – Identificação dos corpos de prova para medição nos ensaios de anisotropia	35
Figura 15 – Configuração da matriz, ferramental e amostras para a realização dos ensaios de dobramento.	37
Figura 16 – Geometria dos punções utilizados para os ensaios de dobramento com raio de 3, 6, 9, 12 e 15 mm.	38
Figura 17 – Prensa Hidráulica FKL® utilizada nos ensaios de dobramento.	39
Figura 18 – Forno Sanchis® utilizado para o processo de aquecimento das amostras.....	40
Figura 19 – Processo de obtenção dos ângulos das amostras conformadas.....	41
Figura 20 – Fluxo de realização de ensaios de dobramento com aplicação das distintas velocidades, raios, sentidos de laminação e temperaturas de aquecimento	42
Figura 21 – Fluxo de preparação das amostras para análise metalográfica.	43
Figura 22 – Cortes realizados na preparação das amostras para o embutimento.....	43

Figura 23 – Processo de rotação das amostras embutidas entre cada granulometria de lixa empregada.....	44
Figura 24 – Posicionamento das medições de dureza com relação a espessura e ao sentido longitudinal das amostras [mm].	46
Figura 25 – Amostra submetida ao ensaio de tração.....	48
Figura 26 – Corpo de prova conformado a 20 °C com raio de 3 mm.	51
Figura 27 – Corpo de prova conformado a 20 °C com raio de 6 mm.	52
Figura 28 – Macrografia de corpos de prova submetidos ao dobramento a 20 °C com raio de 6 mm, 12,5x (a) e 30x (b).	52
Figura 29 – Corpo de prova conformado a 20 °C com raio de 9 mm.	53
Figura 30 – Macrografia de corpos de prova submetidos ao dobramento a 20 °C raio 9 mm 12,5x (a) e 30x (b).....	54
Figura 31 – Macrografia de 12,5 X de amostras conformadas a 20 °C com raio de 6 mm (a) e 9 mm (b).	55
Figura 32 – Corpos de prova conformados a 20 °C com raio de 12 mm (a) e 15 mm (b).	55
Figura 33 – Macrografia de corpos de prova submetidos ao dobramento a 20 °C raio de 12mm (a) e 15 mm (b).	56
Figura 34 – Amostras conformadas com os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm a 100 °C.....	57
Figura 35 – Amostras conformadas com os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm a 200 °C.....	58
Figura 36 – Amostras conformadas com os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm a 300 °C.....	59
Figura 37 – Amostras conformadas com os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm a 400 °C.....	60
Figura 38 – Amostras conformadas com os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm a 500 °C.....	61
Figura 39 – Amostras dobradas com raio de 3 mm a 20°C (a) e 400 °C (b) submetidas ao LP.	62
Figura 40 – Amostras dobradas com raio de 6 mm a 20°C (a) e 400 °C (b) submetidas ao LP.	63
Figura 41 – Amostra dobrada com raio de 9 mm a 20°C submetida ao LP.....	64
Figura 42 – Amostras dobradas com raio de 12 (a) e 15 mm (b) a 20 °C submetidas ao LP. .	64
Figura 43 – Dobramento do Hardox no momento de máximo deslocamento do punção (a) e após retirada da carga (b), com punção de 6 mm a temperatura ambiente.	65
Figura 44 – Ângulo de dobramento para os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm para as temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C.	66
Figura 45 – Metalografia de amostras conformadas a 20 (a), 100 (b), 200 (c), 300 (d), 400 (e) e 500 °C (f) com raio de 3 mm.	68

Figura 46 – Metalografia de amostras conformadas a 20 (a), 100 (b), 200 (c), 300 (d), 400 (e) e 500 °C (f) com raio de 6 mm	69
Figura 47 – Medições de dureza ao longo da espessura da amostra no dobramento com raio de 3 mm a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500°C.	70
Figura 48 – Medições de dureza ao longo da espessura da amostra no dobramento com raio de 6 mm a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C.....	71
Figura 49 – Dureza média obtida no sentido longitudinal das amostras conformadas com raio de 3 mm a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C.	73
Figura 50 – Dureza média obtida no sentido longitudinal das amostras conformadas com raio de 6 mm a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C.	73
Figura 51 – Limite de escoamento e desvio padrão obtidos no ensaio de tração em amostras paralelas a laminação.....	75
Figura 52 – Limite de escoamento e desvio padrão obtidos no ensaio de tração em amostras perpendiculares a laminação.....	75
Figura 53 – Dados de anisotropia obtidos para amostras a 0, 45 e 90° com o eixo de laminação.....	77
Figura 54 – Limite de escoamento Inox 304 a 0°, 45° e 90° com a laminação.....	78
Figura 55 – Comparação da superfície de dobramento neste projeto com punção de 12 (a), 9 (b) e 6 mm (c) com Tekkaya et al, com ângulo de 90° (d), 100° (e) e 110° (f).....	81
Figura 56 – Comparação da fratura obtida no Hardox (a), Tekkaya et al (b), e tipificação (c)	81
Figura 57 – Amostras dobradas a 20°C com aplicação dos punções com raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm	82
Figura 58 – Comparação macrográfica do dobramento com punção de raio 6 mm (a), 9 mm (b), 12 mm (c) e 15 mm (d).	83
Figura 59 – Limites médios de escoamento obtidos no ensaio de tração para amostras paralelas e perpendiculares a laminação	84
Figura 60 – Amostras de aço STRIP dobradas transversalmente (a) e longitudinalmente (b) ao eixo de laminação.	85
Figura 61 – Amostras conformadas a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C com punção de raio 3 mm.	87
Figura 62 – Comparação de amostras no ensaios de liquido penetrante, conformados com raio de 3 mm, a 20 (a) e 400 °C (b) e 6 mm a 20 °C (c) e 400°C (d).....	88

Figura 63 – Tensão de engenharia (a) e força requerida (b) para dobramento de aço AISI 301 a -20, 0 e 23 °C.....	89
Figura 64 – Comparação da força de dobramento para o Strenx 700 e 1300 para diferentes temperaturas e eixos de laminação.	89
Figura 65 – Ângulos resultantes do dobramento a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C com raio de 15 mm	90
Figura 66 – Influência da temperatura da matriz sobre o retorno elástico em alumínio no dobramento a 25, 200, 300 e 400 °C.....	91
Figura 67 – Efeito da temperatura de dobramento a 25, 200, 400 e 600 °C sobre o retorno elástico em aços TRIP	92
Figura 68 – Dureza mensurada ao longo da espessura em amostras conformadas a temperaturas de 20, 400 e 500°C, com raio 3 mm.....	94
Figura 69 – Dureza mensurada ao longo da espessura em amostras conformadas a temperaturas de 20, 400 e 500°C, raio 6 mm.....	95
Figura 70 – Metalografia realizada na região de dobramento em amostras conformadas a temperaturas de 20 (a), 400 (b) e 500 °C (c), com raio 3 mm	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química do Hardox 500 indicada pela SSAB e obtido em avaliação com Bruker Q2 Ion	31
Tabela 2 – Limite de escoamento e resistência máxima obtidos no ensaio de tração.	47
Tabela 3 – Valores de deformação total resultantes do ensaio de tração.	48
Tabela 4 – Índices de anisotropia médios e planares mensurados para amostras a 0°, 45° e 90°	49
Tabela 5 – Ângulos de dobramento mensurados em amostras conformadas a frio com raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm.....	50
Tabela 6 – Dureza média obtida para conformação com 3 e 6 mm nas temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C.	72
Tabela 7 – Comparação entre anisotropia e limite de escoamento do Hardox 500	78
Tabela 8 – Comparação entre anisotropia e o limite de escoamento do Hardox e DP980.....	79

LISTA DE SÍMBOLOS

mm/s	Milímetros por segundo
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
HV	Dureza Vickers
HB	Dureza Brinell
°C	Graus Celsius
r	Coefficiente de anisotropia
φ_b	Deformação na largura da amostra
φ_l	Deformação no sentido longitudinal da amostra
φ	Deformação a ser determinada
b	Dimensão final em milímetros
b_0	Dimensão inicial em milímetros
r_{0°	Coefficiente de anisotropia a 0°
r_{45°	Coefficiente de anisotropia a 45°
r_{90°	Coefficiente de anisotropia a 90°
r_m	Coefficiente médio de anisotropia
r_Δ	Coefficiente de anisotropia planar
C	Carbono
Si	Silício
Mn	Manganês
P	Fósforo
S	Enxofre
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Mo	Molibdênio
B	Boro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 TRAÇÃO UNIAXIAL.....	19
2.2 DUREZA	21
2.3 DOBRAMENTO.....	22
2.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA	25
2.5 ANISOTROPIA	26
2.6 TEMPERATURA	28
3 METODOLOGIA	31
3.1 MATERIAL	31
3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	32
3.3 ENSAIO DE ANISOTROPIA	33
3.4 ESTUDO DE DOBRAMENTO	37
3.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	43
3.6 MEDIÇÃO DE DUREZA	45
3.7 LÍQUIDO PENETRANTE	46
4. RESULTADOS	47
4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	47
4.2 ANISOTROPIA	49
4.3 DOBRAMENTO.....	50
4.3.1 Dobramento a frio	50
4.3.2 Dobramento a quente.....	56
4.4 LÍQUIDO PENETRANTE	62
4.5 RETORNO ELÁSTICO	65
4.6 ANÁLISE METALOGRÁFICA	67
4.7 AVALIAÇÃO DE DUREZA.....	70
5. DISCUSSÃO	74
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	74
5.2 COMPORTAMENTO DA FRATURA.....	80
5.3 VARIAÇÃO DOS RAIOS	82

	13
5.4 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA.....	86
5.5 VARIAÇÃO DE PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA	93
6. CONCLUSÕES	98
7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	100
BIBLIOGRAFIA	101
APÊNDICE A – DADOS COMPLETOS MENSURADOS NA ANISOTROPIA	103
APÊNDICE B – DADOS MENSURADOS NO ENSAIO DE DUREZA	104

1 INTRODUÇÃO

Aços de alta performance podem ser encontrados em equipamentos sofisticados, da indústria automotiva, aérea e espacial, no qual se busca uma solução com aplicação de materiais que possuam uma elevada performance, sem que ocorra incremento de massa, buscando otimização, por exemplo, no consumo de combustível de seus produtos. Todavia, equipamentos com focos distintos também empregam aços de alto desempenho, por sua vez, com intuito um pouco distinto, podendo citar, a indústria de mineração, implementos rodoviários, agrícola e florestal.

Nestas indústrias, a aplicação deste tipo de material é tão comum como nas demais, mas além de resistência mecânica, deseja-se também, uma alta resistência ao desgaste. Como é possível se observar, em ambas as aplicações destes mercados, os componentes são submetidos a ambientes adversos, no qual acarretam em consideráveis níveis de desgaste. Neste trabalho, a aplicabilidade de um destes materiais é abordada, o Hardox 500, material de alta resistência ao desgaste, disposto ao mercado pela SSAB (*Svenskt Stål AB*).

A aplicação do Hardox sob o efeito de desgaste não é avaliado nesta dissertação, mas sim no princípio da cadeia produtiva, no processo de conformação por dobramento, uma vez que este processo é amplamente empregado na conformação de componentes. O dobramento pode ser empregado de distintas formas e configurações, como por exemplo, o dobramento de três pontos. Os autores Mai, Wen e Lu, 2018 e Soyarslan, Gharbi e Tekkaya, 2012, utilizaram desta abordagem em suas pesquisas, onde ambos os trabalhos realizaram avaliações sobre o comportamento de chapas de aço, quando conformadas por esta metodologia, sendo esta a mesma aplicada nesta dissertação.

Aços especiais, necessitam ser profundamente estudados, assim como seus subsequentes processos de conformação, não podendo ser manufaturados apenas de forma empírica e baseada em experiências anteriores, o que pode ocasionar em desperdício de uma considerável parte do seu potencial de aplicação. As pesquisas de Vorkov et al, 2020 e Kaijalainen et al, 2018, são referências que apresentam a importância da investigação científica sobre os diversos parâmetros do processo de conformação, onde os autores ponderaram a influência de variáveis como o sentido de laminação, raio de ferramental e temperatura de aquecimento, parâmetros estes que são também abordados e estudados neste trabalho.

Assim como as variáveis inerentes ao processo de dobramento, avaliações sobre o material também são fundamentais, para obter as melhores condições de conformação. Park et al, 2020, e Daxin et al, 2018, avaliaram o impacto do limite de escoamento em distintas

orientações com relação ao eixo de laminação e da anisotropia, sobre a conformabilidade de chapas, enquanto que Kori et al, 2020 e Nakagawa et al, 2018, avaliaram o impacto da variação de temperatura sobre a conformação por dobramento.

O Hardox 500, possui como característica a sua elevada dureza, o que atribui a este material, uma alta resistência e vida útil quando submetido a condições de alto desgaste abrasivo. Logo, a avaliação da dureza deste material, durante o seu processamento se torna fundamental. Haiko et al, 2018, assim como Kijalinen, et al, 2018, estudaram esta propriedade em suas pesquisas, onde ambos os autores, realizaram ensaios com dobramento em distintas temperaturas, avaliando a alteração da dureza no dobramento, além do impacto da variação térmica sobre as microestruturas do material em estudo.

1.1 OBJETIVO GERAL

Esta dissertação visa avaliar a conformação por meio de dobramento de três pontos do Hardox 500. Busca-se por meio deste estudo, trazer soluções para emprego de melhores parâmetros de conformação do material, sem que ocorram fraturas ou quaisquer imperfeições na conformação, possibilitando a aplicação do Hardox 500 em escala industrial.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos dessa dissertação tem-se que:

1. Caracterizar o Hardox, quanto ao seu limite de escoamento e anisotropia, e seus possíveis impactos sobre a conformação;
2. Descrever a influência do sentido do eixo de laminação, sobre o dobramento;
3. Avaliar os melhores raios de ferramental, entre a aplicação de punções com raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm;
4. Investigar o comportamento do Hardox no dobramento a temperatura ambiente de 20 °C e com aquecimento a 100, 200, 300, 400 e 500 °C.
5. Determinar o impacto da velocidade de deslocamento do ferramental sobre o processamento, comparando a aplicação de velocidades de 2,5, 5 e 50 mm/s.
6. Descrever a correlação entre possíveis alterações da microestrutura e das propriedades do Hardox, mediante ao seu processamento com variação térmica;

Todas estas avaliações trazem maior conhecimento para a aplicação industrial do Hardox 500, com as melhores práticas tanto para variáveis de processo como do material.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A indústria está constantemente buscando se desenvolver, seja em seus processos, materiais ou produtos, sempre em busca de se tornar mais competitiva, eficiente, reduzindo custos e desperdícios. Um dos focos desta constante busca por diferenciais, está na classe de materiais empregados em seus produtos, como por exemplo na indústria automobilística, que busca materiais com alto nível de performance, como a alta resistência mecânica. Todavia, outros veios industriais também anseiam por estas aplicações, tais como siderurgia, mineração, aeronáutica.

Na indústria automobilística, a aplicação de aços com elevada resistência mecânica, possibilita com que os veículos sejam mais leves, resultando em menor consumo de combustível, tornando-se assim mais competitivos no mercado. É necessário se atentar também para outros quesitos, como por exemplo, a segurança e atendimento as demais necessidades inerentes aos produtos. Já na indústria de mineração, a resistência a abrasão é mais uma importante premissa a ser atingida.

A indústria automobilística e mineração são correntes distintas quanto a seus produtos e clientes, mas com interesses em comum quanto as exigências de mercado. Usualmente, os equipamentos utilizados na indústria de mineração, são submetidos a elevadas condições de severidade, onde se destaca a necessidade de considerável resistência a abrasão. Os aços que apresentam esta resistência, geralmente são acompanhados de outras importantes propriedades, como elevada resistência mecânica e dureza.

Os estudos atualmente desenvolvidos neste campo de conformação de materiais, apresentam determinada limitação, pois aços de elevada resistência abrasiva, apresentam condições particulares quando sujeitos a deformações plásticas. Questões fundamentais no emprego de processos de conformação de chapas metálicas, como por exemplo, estampagem e dobramento, ainda permanecem sem grande aprofundamento.

Neste mesmo sentido, Suppan et al, 2018, cita que o número de artigos discutindo propriedades de dobra de aços multifásicos é muito menor do que aqueles que lidam com ligas de alumínio. Além disso, os processos que levam a falha são bem descritos para o alumínio, entretanto, não para aços de alta resistência. Por esta razão, várias descobertas relativas à capacidade de dobrar e conformar das ligas de alumínio, são empregadas quando no estudo de processos com utilização de ligas de aços. A conformabilidade de chapas metálicas depende de aspectos como temperaturas ideais de conformação, níveis de tensões residuais geradas, encruamento resultante do nível de deformação aplicado, transformações metalúrgicas

inerentes a estes processos, anisotropia do material laminado, entre outras características, que necessitam de melhor compreensão e aprofundamento técnico-científico.

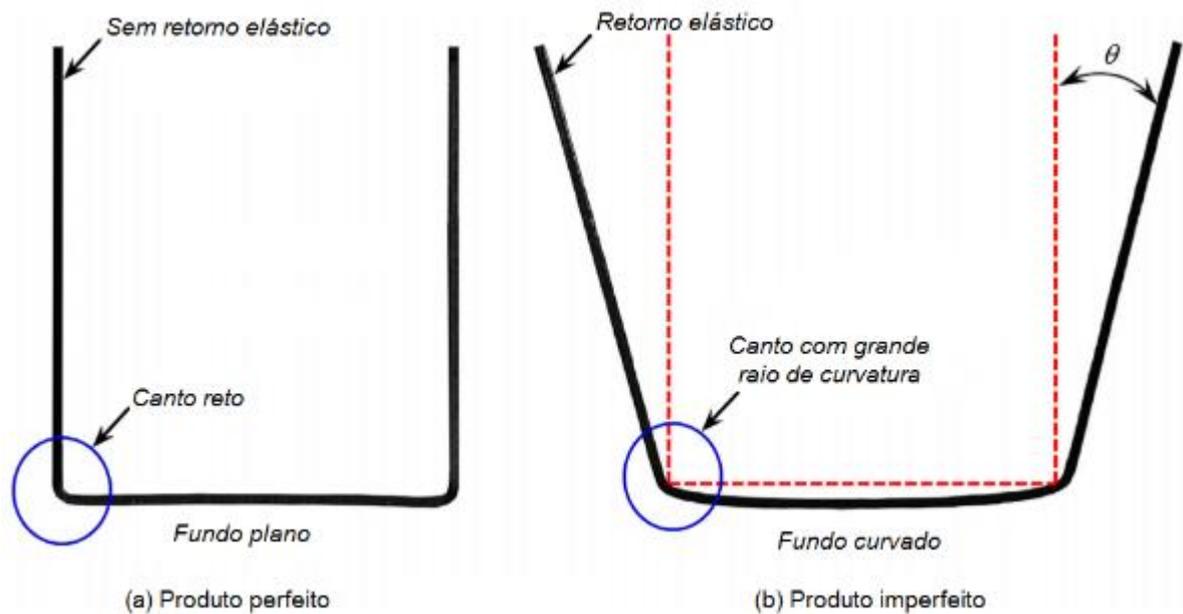
Kaupper e Merklein, 2013, citam em seus estudos que os limites de dobramento para aços de alta resistência até então não haviam sido totalmente abordados. Trabalhos recentes lidam com a determinação experimental de falhas e a aplicação de modelos numéricos aperfeiçoados para prevê-las, mas a influência da microestrutura ainda não é totalmente compreendida. Apesar de vários procedimentos experimentais na literatura e na indústria, a avaliação dos resultados de dobramento em termos de danos e falhas ainda é um grande problema nos laboratórios e na produção em série. Falhas em dobramento são, em alguns casos, analisados em relação à aplicação, com base na experiência e em muitos casos, subjetivamente e intuitivamente.

No trabalho de Uthaisangskuk et al, 2018, observa-se que um dos principais problemas da conformação de aços de alta resistência, é a ocorrência mais precoce de fraturas e, portanto, a conformabilidade restrita, o que se deve às características particulares da microestrutura e interações entre diversas fases. Portanto, a previsão de deformação e comportamento de fratura destes aços ainda necessita ser melhorada, por outro lado, procedimentos de conformação complexos, com várias ou sucessivas etapas de conformação, são frequentemente empregados para atingir com sucesso a forma final de uma peça

Outra opção para conformação de chapas de alta resistência, pode ser analisada em Ma et al, 2017, onde o foco dos autores foi combinar as abordagens experimental, numérica e teórica para estudar a curva limite de conformação, sob condições de estampagem a quente de aços avançados de alta resistência. A melhoria no limite de conformação causada pela temperatura, foi mostrada teoricamente e interpretada através da comparação do limite máximo de tensões principais, em diferentes temperaturas.

O retorno elástico, é um fator inerente no processo de conformação de chapas metálicas, tanto quando na aplicação de materiais de alta resistência, como em aços comuns. Na Figura 1 é possível observar a comparação entre uma conformação com e outra sem o retorno elástico, o qual pode variar de acordo com temperatura de conformação, ângulos de matriz e punção, bem como a geometria do componente. Komgrit et al, 2016, desenvolveu em seu trabalho, uma técnica visando a redução do retorno elástico em uma conformação em formato “U”, onde obteve boa redução neste efeito, porém com o aparecimento de outras imperfeições, o método mais eficaz para suprimir este efeito é reduzir o momento de flexão que é sua força motriz. Várias técnicas já foram propostas para esse fim, no entanto, tais técnicas têm limitações na subtração deste retorno, especialmente em chapas de aço de alta resistência.

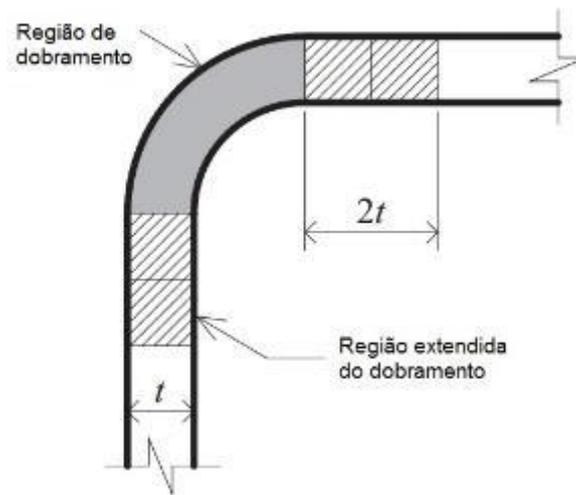
Figura 1 – Conformação sem retorno elástico (a) e com retorno elástico (b)



Fonte: Adaptado de Komgrit et al, 2016.

A conformação por dobramento de aços de alta resistência causa uma elevada deformação plástica localizada, o que acarreta em transformações mecânicas e metalúrgicas, como a orientação de grãos, encruamento, tensões residuais, entre outros. Todavia, a região afetada por este processo, de acordo com Ma, Chan e Young, 2017, vai além, segundo os autores, estudos anteriores indicam, que os efeitos de conformação a frio, geralmente não são restritos apenas às porções da região dobrada, para aços de elevada resistência conformados a frio. As propriedades afetadas do material, vão da região de dobramento, até o dobro da espessura da chapa da seção transversal, como pode ser analisado na Figura 2.

Figura 2 – Região afetada pelo dobramento



Fonte: Adaptado de Ma, Chan e Young, 2017.

2.1 TRAÇÃO UNIAXIAL

O ensaio de tração uniaxial é um dos ensaios mecânicos mais aplicados no âmbito acadêmico e industrial, consistindo em um ensaio destrutivo, no qual um corpo de prova é submetido a um esforço de tração, sendo encerrado no momento em que ocorre o rompimento da amostra em análise. Alguns dados obtidos por este ensaio são mais comumente difundidos, tais como os limites de resistência a tração e de escoamento, entretanto, muitas são as informações que podem ser obtidas por meio deste ensaio.

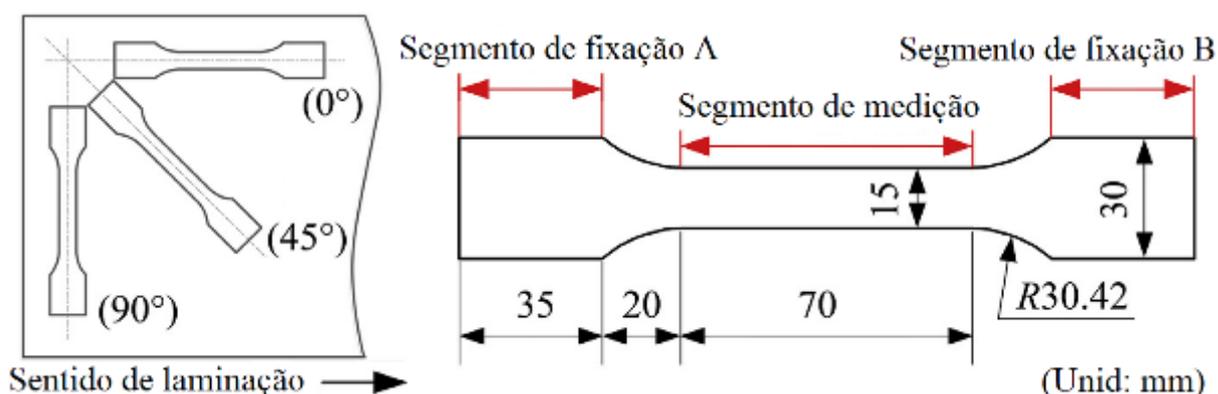
Garcia et al, 2012, destacada informações tais como módulo de elasticidade, módulo de tenacidade, resiliência, comportamento de fratura (frágil ou dúctil), limite de escoamento, coeficiente de Poisson, entre outros. Com a realização deste experimento, usualmente é construído o gráfico de tensão-deformação, habitualmente utilizado no estudo da resistência dos materiais, ou ainda o gráfico tensão-deformação real, que por sua vez, é mais amplamente empregado na abordagem dos processos de conformação.

O ensaio de tração uniaxial tem a sua ampla difusão não apenas pelas informações obtidas, mas também pela sua múltipla aplicação. Os corpos de prova podem ser das mais diversas formas, tanto para estudo de barras e vergalhões, como para chapas laminadas. Quando na pesquisa do comportamento de chapas, uma nova variável é importante de ser levada em consideração, o eixo de laminação.

Daxin et al, 2018, apresenta em seu estudo a importância de no caso de análise de chapas laminadas, a consideração da possível variação do comportamento dos corpos de prova de acordo com a orientação dos mesmos, relativo ao eixo de conformação. Esse fato torna-se importante devido a questões inerentes ao processo de laminação, que tende a modificar a estrutura do material, direcionando-a conforme decorre o processo. Na Figura 3 é possível observar como Daxin et al, 2018, obteve suas amostras para seu estudo, onde o autor as retirou de três distintas posições.

Ainda de acordo com Daxin et al, 2018, com base em trabalhos anteriores realizados por pesquisadores, a deformação das chapas metálicas no ensaio de tração contém geralmente as seguintes etapas: deformação elástica, escoamento, deformação plástica uniforme, deformação plástica não uniforme (isto é, deformação instável) e então a fratura. Em sua investigação, os autores apresentam como a variação do sentido de laminação, em alguns casos, pode influir consideravelmente o comportamento do material, enquanto em outros, o desempenho pode ser considerado igual e constante.

Figura 3 – Orientação de amostras para ensaio de tração de Daxin et al, 2018.

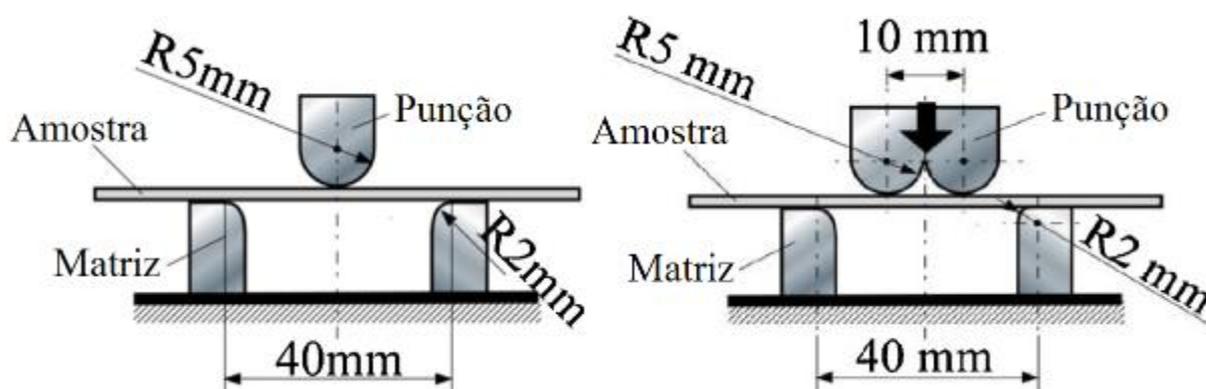


Fonte: Adaptado de Daxin et al, 2018.

Já Liu et al, 2018, mostram em suas investigações a importância e contribuição da análise de resistência a tração, na conformação de chapas metálicas. Em seu estudo, os autores realizam uma análise comparativa entre a resistência a tração apresentada no ensaio, com aços duplex e seu posterior comportamento quando submetidos a processos de dobramento de três e quatro pontos, como pode ser observado na Figura 4. Liu et al, 2018, ainda foram além, não apenas avaliando a resistência do material por ensaio de tração, mas também como o mesmo, após ser submetido a processos de conformação, teve seu comportamento modificado quando

submetido novamente ao ensaio. De acordo com os autores quando a chapa foi conformada o módulo de Young foi reduzido e a rigidez a tração elevou-se de acordo com o aumento da deformação plástica.

Figura 4 – Dobramento de três e quatro pontos realizados por Liu et al,2018.



Fonte: Adaptado de Liu et al, 2018.

2.2 DUREZA

Aços que apresentam boa resistência a abrasão regularmente são aços especiais, com adição de elementos de liga, que além desta característica, apresentam alta resistência mecânica e elevada dureza. No entanto, segundo Xie et al, 2018, uma elevada adição de elementos de liga pode se tornar oneroso e não ser financeiramente viável, restringindo a sua ampla aplicação industrial. A baixa liga fornece uma rota alternativa para desenvolver aços de alta resistência e alta dureza, controlando a microestrutura, o refinamento de grãos e o endurecimento por precipitação. O boro é um elemento muito econômico que contribui para a temperabilidade do material.

Haiko et al, 2018, complementa que aços resistentes ao desgaste têm evoluído para valores de dureza cada vez mais altos, sendo que um aumento na dureza superficial, em geral, melhora a resistência ao desgaste dos aços. Nesse sentido, os aços martensíticos são candidatos potenciais, pois apresentam alta dureza superficial e boas propriedades de resistência, sendo estes, em alguns casos, soluções mais econômicas em aplicações que exigem alta performance ao desgaste.

Atualmente, as modernas rotas de processamento, permitem os procedimentos de laminação termomecânicos, projetados de modo a conformarem e tratarem termicamente o

material. Apesar do aumento desejado na dureza superficial e também na resistência mecânica, as altas taxas de resfriamento frequentemente encontradas nessas técnicas de processamento, podem resultar em baixa ductilidade, tenacidade inadequada e baixa capacidade de conformação.

A medição de dureza pode ser realizada por diversas formas e métodos, podendo ser citadas, por exemplo, a medição de dureza Brinell, Vickers e Rockwel. A maioria dos métodos de medição desta grandeza, ocorrem por meio de um penetrador, que realiza uma endentação no componente em análise, de acordo com o comportamento e da marcação resultante do ensaio, obtém-se o valor de dureza, de acordo com a escala utilizada. Estes ensaios seguem normatizações, tanto nacionais como internacionais, que possibilitam uma linguagem internacional da leitura e compreensão dos dados obtidos.

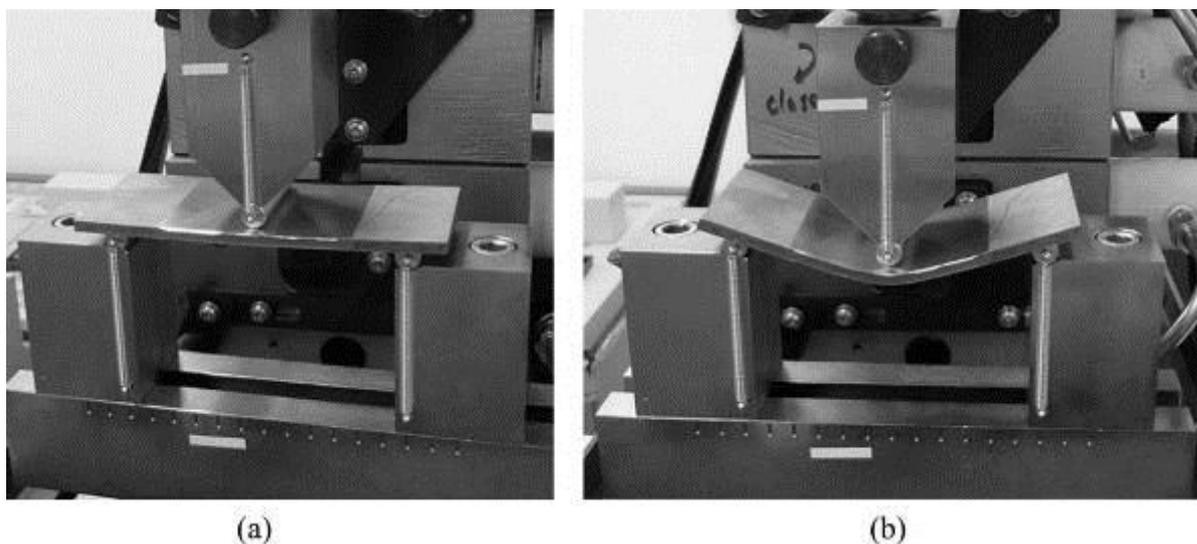
2.3 DOBRAMENTO

De acordo com Mai, Wen e Lu, 2018, a maioria das tecnologias de conformação de chapas envolve a deformação fora do plano do material. Assim, chapas metálicas de boa ductilidade são necessárias, e a investigação sobre a resistência à flexão e rigidez é importante para uso em tais processos de fabricação. Embora estudos intensivos tenham sido realizados sobre as propriedades mecânicas, tais como resistência à tração, dureza e fadiga, pouco se sabe sobre o desempenho de materiais na flexão.

Esse tipo de matéria prima pode ser conformada de diversas formas, constantemente se desenvolvem novos e mais modernos processos de conformação, uma das formas mais usuais na conformação de chapas de aço é o processo de dobramento. Neste seguimento, Sofuoğlu et al, 2017, coloca que o dobramento é amplamente realizado como uma operação de fabricação na indústria, onde existem diferentes tipos de operações de dobramento, como dobra em “V”, dobra em “U”, dobra em flexão e dobra rotativa, sendo aplicado até mesmo a perfis, como tubos e vigas, por exemplo.

O dobramento por três pontos, é um destes métodos, onde uma chapa pode ser disposta sobre uma matriz, sendo apoiada em suas duas extremidades. A carga de conformação é aplicada por um punção, sendo empregado no centro do material em análise. Na Figura 5, é possível observar a realização de um ensaio de dobramento de três pontos em uma amostra de chapa.

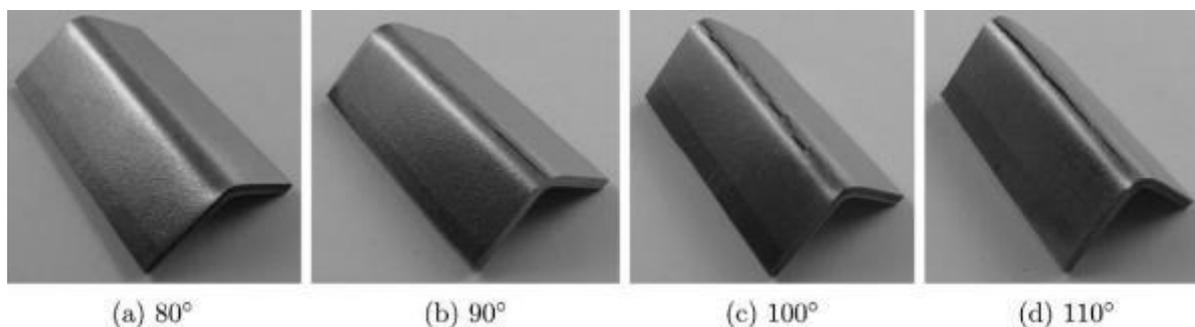
Figura 5 – Processo de conformação por dobramento de três pontos



Fonte: Adaptado de Mai, Wen e Lu, 2018.

As falhas decorrentes do processo de dobramento podem ser em micro ou macroescala, sendo ambos abordados por Tekkaya et al, 2012. A Figura 6, mostra os estágios de trincas no ápice da curva. Com uma extensão crescente da deformação, observam-se “casca de laranja” que acompanham pequenas ondulações superficiais na face externa da zona de flexão, sob a forma de abaulamentos. Esses sulcos aumentam a falta de homogeneidade da deformação, do fluxo plástico na escala do micrômetro e a deformação é confinada a bandas de deslizamento localizadas e estreitas. Os fenômenos observados de defeitos de flexão são listados como: (1) localização de tensão em várias escalas de comprimento, (2) ondulações na superfície, (3) aceleração de danos em bandas de localização em microestruturas, que estão ligadas a sulcos da superfície e a fratura ocorre inclinada para a superfície

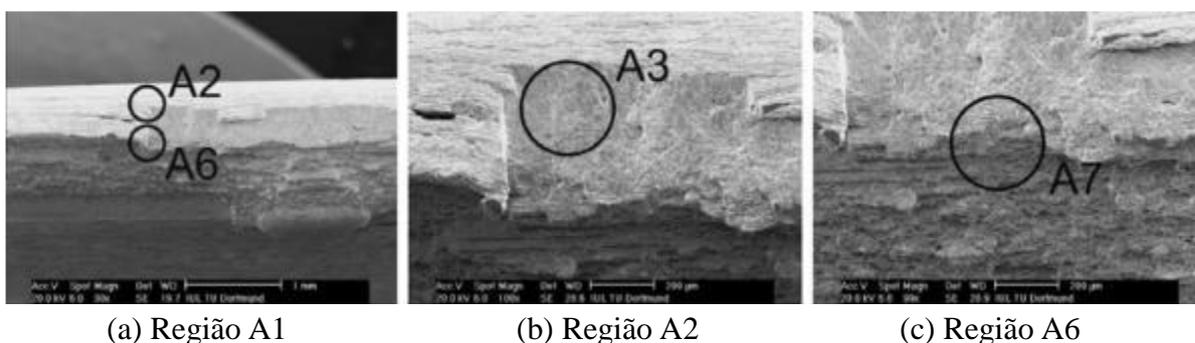
Figura 6 – Evolução de trincas no dobramento encontradas por Tekkaya et al, 2012, com aplicação do ângulo de 80° (a), 90° (b), 100° (c) e 110° (d)



Fonte: Adaptado Tekkaya et al, 2012.

Para o estudo das microfalhas, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) pode ser aplicada. Ainda no trabalho dos autores Tekkaya et al, 2012, uma análise neste sentido foi apresentada, onde o número de análises locais se torna em maior número, devido a necessidade de melhor compreender os mecanismos de falha e ruptura em diversos pontos característicos do material. Como pode ser avaliado na Figura 7, diversos pontos foram tomados como referência, pois os aspectos da fratura em processos de dobramento podem ser diversos e localizados, onde cada região tem um comportamento, sendo de nucleação de ruptura, propagação ou falha catastrófica, sendo importante a compreensão do comportamento destas.

Figura 7 – Análises de fratura com microscopia eletrônica de varredura em distintas regiões do corpo de prova



Fonte: Adaptado Tekkaya et al, 2012.

2.4 ANÁLISE METALOGRAFICA

A análise metalográfica, é uma importante ferramenta utilizada para melhor compreensão do comportamento de um dado material, quando submetido a esforços externos, ou seja, o estudo metalográfico de um determinado material, se faz fundamental, não apenas para o caso de estampagem ou dobramento de chapas metálicas, mas sim no emprego de qualquer processo de conformação. Isto se deve ao fato de que este tipo de avaliação, pode apresentar a formação, orientação e composição de fases e grãos do material. Antes e após o processo de conformação, a análise metalográfica elucida como os grãos da estrutura interna se deformaram quando submetidos aos esforços aplicados, denotam possíveis causas de eventuais falhas ocorridas durante a conformação, entre outros.

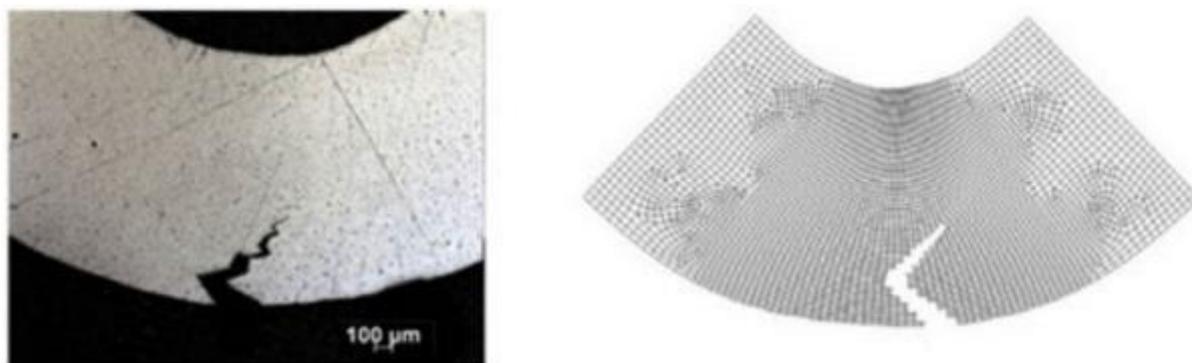
Referente esta análise, Zhao et al, 2017, afirma que as propriedades dos materiais são determinadas por microestruturas. A evolução da microestrutura e a superfície da fratura dos aços de alta resistência, têm sido estudadas por fotomicrografias de microscopia ótica e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) por muitos pesquisadores. No início da década de 1980, estudos sobre os efeitos da morfologia no comportamento mecânico, com fases duplas grosseiras e fases duplas globulares finas foram realizados, os mecanismos de fratura entre estas microestruturas foram diferentes, o que significa que a morfologia e distribuição das fases foram muito importantes. A microestrutura e o acúmulo de dano foram conduzidos em função da macro deformação, e a nucleação dos vazios foi observada por fratura e separação das regiões adjacentes da martensita, e por decoesão na interface ferrita/martensita. Também descobriu-se que a morfologia e a distribuição da martensita tiveram uma influência significativa no acúmulo de danos.

Desta forma, observa-se o quanto a compreensão da estrutura granular é importante para melhor entendimento no estudo de conformação. Zhao et al, 2017, apresenta ainda em seus estudos, que por meio da análise metalográfica de DP 780, em processos de conformação, pode descrever amplamente o processo de formação de trincas e falhas no material.

No estudo desenvolvido por Bruschi et al, 2014, a metalografia foi utilizada para a investigação da origem e formação de trincas no dobramento de DP 1000, além de ser utilizado para comparação de estudos desenvolvidos em modelos numéricos de simulação computacional. De acordo com os autores, a evolução de trincas é monitorada através dos estágios característicos do mecanismo de vazios, ou seja, nucleação, crescimento e coalescência de vazios onde o aumento da porosidade resulta na retração do local. Como exemplo, a Figura 8 mostra a concordância satisfatória entre o padrão de trinca observado experimentalmente no

dobramento de chapas DP1000, por meio de análise microscópica e o obtido a partir de uma simulação

Figura 8 – Comparação entre trinca observada por microscopia e obtida por através de simulação numérica



Fonte: Adaptado de Bruschi et al, 2014.

2.5 ANISOTROPIA

O principal processo utilizado para a fabricação de chapas metálicas convencionais é a laminação, que pode ocorrer tanto a frio como a quente. Este processo é característico por realizar uma elevada redução da área da secção transversal do material, causando conseqüentemente um alongamento do mesmo. Todavia, aços de alta resistência, por vezes são submetidos a processos termomecânicos (TMP)

Sobre processos termomecânicos, Zhao e Jiang, 2018, apontam que tratam-se de uma combinação de deformação e tratamento térmico, sendo estes métodos estratégicos para melhorar as propriedades mecânicas dos aços de alta resistência através do controle de sua microestrutura. A conformação termomecânica está entre as tecnologias industriais mais importantes para a produção de aços de alta qualidade com as propriedades mecânicas necessárias. O TMP melhora os recursos microestruturais, para desenvolver os produtos adequados aos requisitos impostos pela moderna tecnologia nas quais são empregados, sendo um processo metalúrgico que integra o endurecimento por trabalho e o tratamento térmico em um único processo. É principalmente aplicado ao processamento de ligas metálicas, mas também tem encontrado aplicações na fabricação de cerâmicas, polímeros e muitas de suas combinações. O método TMP foi introduzido pela primeira vez na produção comercial de chapas de aço C-Mn na década de 1950, por meio de laminação controlada, e cada vez mais se

tornou uma técnica importante no projeto de processos de laminação, resfriamento e têmpera direta de muitos produtos de aço, tais como chapas, folhas, tiras, vigas, barras, fios, canos e trilhos.

Ainda de acordo com Zhao e Jiang, 2018, o pré-tensionamento por laminação pode causar severamente, uma redução no coeficiente de endurecimento instantâneo e introduzir uma anisotropia significativa nas propriedades mecânicas, que reduzem fortemente a conformabilidade dos aços.

Quanto a anisotropia, Venkatsurya et al, 2012, ressalta que o processamento termomecânico de aços pode resultar em anisotropia nas propriedades mecânicas, tais como, resistência e tenacidade, dependendo da composição química e microestrutura. Os aços tendem a desenvolver texturas de fibra fortes durante a laminação controlada, o que envolve processos como deformação, recristalização e transformação.

Chapas metálicas geralmente exibem uma anisotropia significativa das propriedades mecânicas, manifestando-se tanto em deformações plásticas quanto nas forças de fratura sob diferentes condições de carga. Na maioria das deformações em chapas metálicas, como estampagem, a espessura é geralmente muito menor do que outras dimensões geométricas. Aços avançados de alta resistência, frequentemente exibem vários graus de anisotropia, devido à existência de orientação preferencial de suas estruturas de grãos a partir do processo de laminação. Diversas pesquisas têm sido dedicadas a caracterizar e modelar o comportamento da plasticidade anisotrópica nas últimas décadas, porém apenas recentemente começou-se a lidar com seu comportamento de fratura anisotrópica, complementa Shuhui et al, 2018.

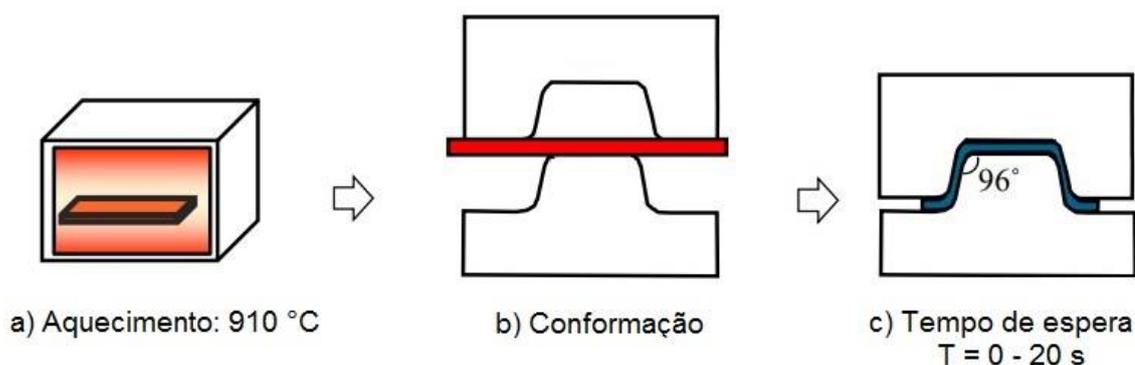
A importância do aspecto da anisotropia de propriedades é de tão elevada relevância na aplicação de componentes, que em seus estudos Leuning et al, 2019, avaliou a influência da anisotropia e da orientação cristalina de chapas sobre o efeito de polarização magnética de componentes elétricos e eletrônicos. Logo, observa-se que a importância do conhecimento do comportamento das propriedades dos materiais, conforme o sentido de processamento e/ou conformação mecânica, vai além da aplicação metalúrgica.

2.6 TEMPERATURA

O emprego de processos de conformação de chapas metálicas aquecidas tem crescido nos últimos anos, alguns processos são amplamente conhecidos por serem realizados com materiais quentes, como por exemplo, forjamento e laminação. O emprego em chapas metálicas tem sido limitado devido ao fato de surgimento de oxidação, o que degrada principalmente a qualidade superficial do componente final.

Todavia, com o crescente emprego de chapas metálicas com componentes ligados, tornam menor a formação de óxidos, o que viabiliza a aplicação de processos de conformação de chapas metálicas de outras formas que não a frio. O estudo de Nakagawa et al, 2018, é um exemplo de aplicação da análise da temperatura sobre a conformabilidade de chapas espessas, segundo os autores, nas operações de conformação a frio das chapas de aço de alta resistência, ocorrem severos danos da ferramenta e um grande retorno elástico. Em suas análises, os autores avaliaram a influência da temperatura no retorno elástico, dureza e metalurgia do material empregado. Na Figura 9, é possível observar o fluxo de conformação de chapas a quente.

Figura 9 – Fluxo do processo de conformação de chapas a quente empregado por Nakagawa et al, 2018.

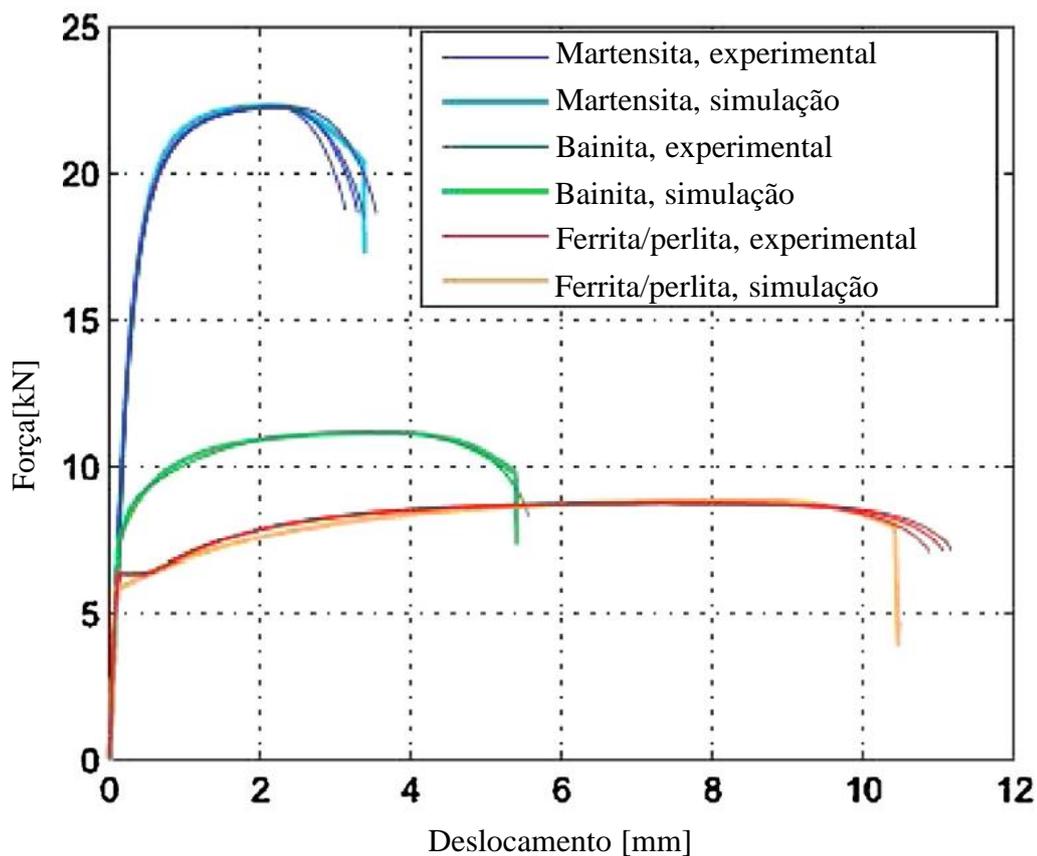


Fonte: Adaptado de Nakagawa et al, 2018.

Merklein et al, 2016, também contribuiu com estudos de estampabilidade a quente de chapas metálicas, neste caso, com elementos de liga tais como Boro. Segundo os autores foram introduzidas recentemente variantes da estampabilidade a quente convencional, com o objetivo de adequar a microestrutura dos componentes estampados a quente e, portanto, suas características mecânicas. Uma parte significativa das atividades de investigação, realizadas no

âmbito da estampagem a quente de chapas de aço ligados com boro, visa provar a viabilidade da obtenção de diferentes microestruturas no componente estampado, através da aplicação de caminhos de aquecimento ou de arrefecimento distintos, nas diferentes regiões da chapa. O processo de conformação a quente engloba um grande fluxo de aquecimento e resfriamento do componente, logo diversas microestruturas e fases podem ser encontradas no material, desta forma, é importante conhecer a relação entre temperaturas e suas variações na metalurgia do material em estudo. No gráfico da Figura 10, é possível observar a diferença entre a relação carregamento e deslocamento de distintas microestruturas, com valores experimentais e determinados por simulações numéricas.

Figura 10 – Curva experimental da força requerida pelo deslocamento dos testes de tração usando o critério de fratura.



Fonte: Adaptado de Merklein et al, 2016.

Nos desenvolvimentos de Li et al, 2017, ainda uma outra possibilidade é levantada, além da conformação de chapas a quente e a frio, a estampagem a morno é analisada. Durante um procedimento de estampagem a quente, o aço é estampado após a temperatura de austenitização completa, acima de 700 °C e depois resfriado rapidamente até a temperatura ambiente, para obter a microestrutura martensítica.

Comparado com o processo de estampagem a quente, o processo de estampagem a morno é realizado com uma temperatura de estampagem abaixo de 500 °C, tem as vantagens de economia de energia, alta eficiência de produção, longa vida de trabalho e baixo custo. Atualmente, os estudos de estampagem de aços a quente/morno estão principalmente focados no popular aço ao boro na indústria automotiva. Muitos pesquisadores estudaram o processo de estampagem a quente de aços com boro, por meio de experimentos e simulações numéricas, onde propuseram que o tempo de espera austenizante, temperatura de estampagem e força aplicada influenciaram consideravelmente a temperatura de partida martensítica do aço, descrevendo que a temperatura martensítica diminuiu de aproximadamente 410 para 360 °C, em diferentes forças aplicadas e concluiu que o aço ao boro era sensível ao processo de estampagem.

Ainda segundo Li et al, 2017, a microestrutura e as propriedades mecânicas foram distribuídas de forma desigual após o aço ter sido estampado a quente em uma peça estrutural automotiva. Enquanto isso, existem várias desvantagens no aço ao boro estampado a quente, como a ocorrência de oxidação e descarbonização (para aços sem revestimento) e baixa ductilidade (isto é, alongamento total inferior a 7%), o que limita ainda mais a segurança automotiva.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo a metodologia de cada ensaio realizado para este projeto será apresentada. As metodologias empregadas para os estudos práticos, foram desenvolvidas com base na pesquisa bibliográfica anteriormente apresentada, adaptando para as particularidades inerentes ao presente desenvolvimento.

3.1 MATERIAL

O presente estudo foi desenvolvido em chapas de aço laminadas de Hardox 500, obtidas pelo processo de termolaminação, com espessura de 3 milímetros. O Hardox é um material de alta resistência a abrasão, submetido ao processamento térmico de tempera ao longo de toda a sua espessura. Conforme indica a SSAB (*Svenskt Stål AB*), própria fabricante deste material, ele possui dureza de aproximadamente 500 HB, além de um elevado limite de escoamento de 1400 MPa. Na Tabela 1, é apresentada a composição química percentual máxima indicada pela fabricante, como também os valores obtidos por meio de um ensaio de composição química realizado em um equipamento Bruker Q2 Ion, os elementos de liga destacados por (*) são os desejados pela SSAB, o equipamento adotado para a avaliação não apresenta recurso para a leitura de boro, logo este valor não pode ser determinado.

Tabela 1 - Composição Química do Hardox 500 indicada pela SSAB e obtido em avaliação com Bruker Q2 Ion

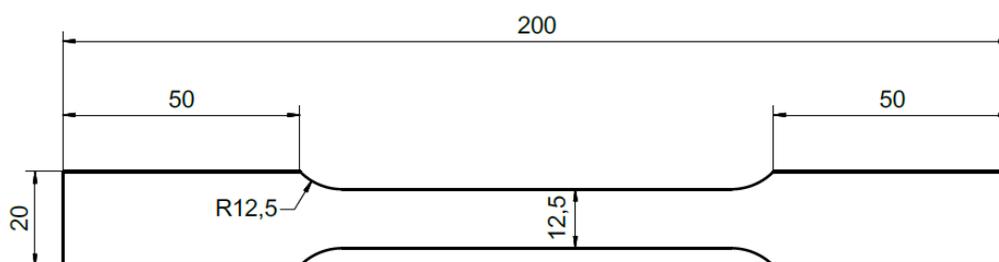
	C*	Si*	Mn*	P	S	Cr*	NI*	Mo*	B*
SSAB	0,3	0,7	1,6	0,02	0,01	1,5	1,5	0,6	0,005
Bruker	0,2	0,17	0,99	0,01	0,01	0,3	0,1	0,057	-

Fonte: O autor.

3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para esta dissertação, no ensaio de tração considerou-se o sentido de laminação, sendo que este é também ponderado em outros ensaios posteriormente abordados. Na Figura 11, é possível observar a geometria dos corpos de prova utilizados para os ensaios, sendo estes obtidos a partir de duas orientações diferentes com relação ao eixo de laminação, estas foram retiradas paralelamente e perpendicularmente a este sentido de processamento. Os corpos de prova foram preparados através de um processo de corte a laser, processo este escolhido por seu baixo risco à integridade das peças, evitando assim alterações com relação ao material original.

Figura 11 – Geometria dos corpos de prova empregados para os ensaios de tração



Fonte: O Autor.

O procedimento do ensaio de tração, é regido por normas nacionais e internacionais, no qual para este estudo a ASTM E8/E8M foi a utilizada como base de referência. Os ensaios de tração em sua totalidade ocorreram em um equipamento de ensaios EMIC®, modelo DL60000, dotado de célula de carga, com erro relativo de exatidão de 0,03%, capacidade de 600 kN, conforme apresentado na Figura 12. No ensaio, os corpos de prova foram fixados entre as pinças do equipamento, sendo então submetidos a um esforço de tração, até o seu rompimento, com adoção de uma velocidade de deslocamento da parte móvel do equipamento constante, na ordem de 5 mm/min. Para cada sentido de laminação dez corpos de prova foram ensaiados, ou seja, foram analisados um total de 20 corpos de prova, sendo 10 deles obtidos paralelamente ao sentido de laminação e outros 10 perpendiculares.

Figura 12 – Equipamento universal de ensaios EMIC® empregado nos ensaios de tração, anisotropia e dobramento.



Fonte: EMIC®, 2019.

É válido destacar que na extremidade de cada corpo de prova, uma marcação no formato de uma seta foi realizada, possibilitando assim uma identificação fácil e visual do sentido de laminação de cada amostra. Essa marcação se fez importante para que durante o manuseio dos corpos de prova, os mesmos não fossem misturados, o que tornou assim o procedimento de manuseio das amostras mais seguro e isento de erros.

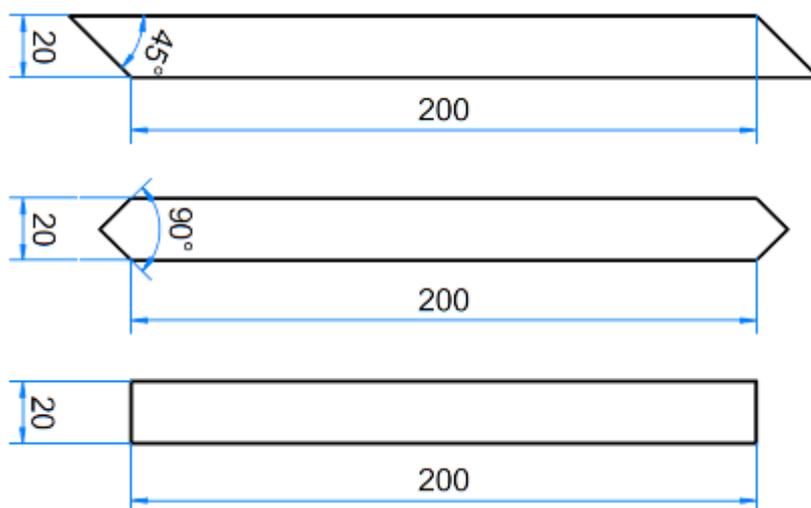
3.3 ENSAIO DE ANISOTROPIA

Os ensaios de anisotropia foram realizados com a finalidade de caracterizar o comportamento da chapa, conforme o sentido de laminação, pois como citado anteriormente, materiais submetidos a este tipo de processo de conformação tendem a apresentar orientação de grãos característica, com maior alongamento de grãos no sentido do qual o processo decorre. Logo, conforme o sentido de avaliação, o material pode apresentar propriedades diferentes de escoamento e deformação.

A realização deste tipo de análise foi baseada de acordo com a norma ASTM E-517. Desta forma, com base nos resultados obtidos nos ensaios, foi possível descrever se o Hardox apresenta algum comportamento distinto, quando submetido a processos de conformação, ou se é equivalente em ambas as direções. Para o ensaio, corpos de prova com 20 mm de largura, por 200 mm de comprimento, foram obtidos a partir de três direções distintas com relação ao eixo de laminação, sendo eles a 0° , 45° e 90° .

Os corpos de prova foram cortados através de um processo a laser, assim como no caso das amostras para os ensaios de tração. Na Figura 13, é possível observar a geometria dos corpos de prova preparados, pode-se identificar que cada um destes, conforme o sentido de laminação, possuem um conceito levemente distinto, assim idealizados para evitar que de qualquer forma sejam misturados, acarretando em resultados equivocados. Porém, é importante destacar que apesar das diferenças geométricas, todas as análises foram realizadas sobre o mesmo comprimento útil, largura e espessura, ou seja, a região de análise é exatamente igual e de acordo com a norma, onde a diferença é apenas na região de agarre das pinças do equipamento de ensaios.

Figura 13 – Geometria dos corpos de prova aplicados nos ensaios de anisotropia



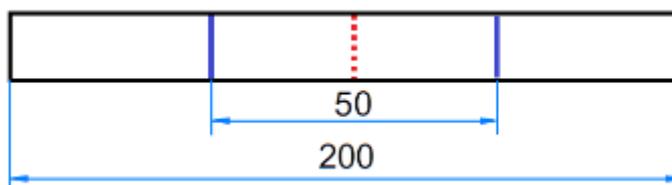
Fonte: O Autor.

Para cada sentido de laminação, foram estudados oito amostras, possibilitando assim um maior range de dados. Os ensaios de anisotropia em sua totalidade ocorreram no equipamento EMIC®, mesmo utilizado nos ensaios de tração, onde estes foram fixados entre as pinças do equipamento em suas extremidades e então submetidos ao esforço de tração. A velocidade de deslocamento do cabeçote móvel foi constante de 5 mm/min, aplicando-se um

deslocamento máximo de 9 mm. Apesar de possuir um procedimento de ensaio similar ao de tração, na anisotropia não deve ocorrer a ruptura das amostras, mas sim apenas um alongamento e deformação das mesmas.

Os dados da anisotropia do material foi obtido por meio da análise comparativa das dimensões do corpo de prova anterior e posterior a realização do ensaio, desta forma, marcações foram realizadas nas amostras, com 25 mm acima e abaixo da linha de centro, totalizando uma região delimitada pelo comprimento de aproximadamente 50 mm, como pode ser observada na Figura 14. O valor da distância entre estas marcas foi mensurada com um paquímetro antes e após a aplicação da carga e deslocamento, assim como para a largura. Já no caso da espessura, a medição foi realizada com um micrometro, devido a pequena magnitude da variação dos valores obtidos para essa dimensão.

Figura 14 – Identificação dos corpos de prova para medição nos ensaios de anisotropia



Fonte: O Autor.

O coeficiente de anisotropia (r), pode ser determinado por duas equações, em uma primeira é considerada a variação de largura e espessura, porém na segunda equação possível, apenas a largura e comprimento são levados em consideração. Essa modificação matemática se torna importante devido as pequenas deformações que podem decorrer sobre a espessura, o que gera uma possibilidade de erro na obtenção dos resultados, logo para este estudo aplicou-se a Equação 1, que representa a segunda possibilidade citada.

$$r = \frac{\varphi_b}{-(\varphi_b + \varphi_l)} \quad (1)$$

Onde:

r – Coeficiente de anisotropia;

φ_b – Deformação na largura da amostra;

φ_l – Deformação no sentido longitudinal da amostra;

As deformações de largura e de comprimento, em ambos os casos pode ser determinada pela equação 2. Já o coeficiente médio de anisotropia, pode ser determinado, por sua vez, por meio da Equação 3.

$$\varphi = \ln \frac{b}{b_0} \quad (2)$$

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (3)$$

Sendo:

φ – Deformação a ser determinada;

b – Dimensão final [mm];

b_0 – Dimensão inicial [mm];

r_{0° – Coeficiente de anisotropia a 0° ;

r_{45° – Coeficiente de anisotropia a 45° ;

r_{90° – Coeficiente de anisotropia a 90° ;

r_m – Coeficiente médio de anisotropia.

Além do coeficiente de anisotropia médio, com base nos valores obtidos para cada um dos sentidos de laminação, é possível determinar o coeficiente de anisotropia planar. Este coeficiente pode ser determinado com a aplicação da Equação 4.

$$r_\Delta = \frac{r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (4)$$

No qual:

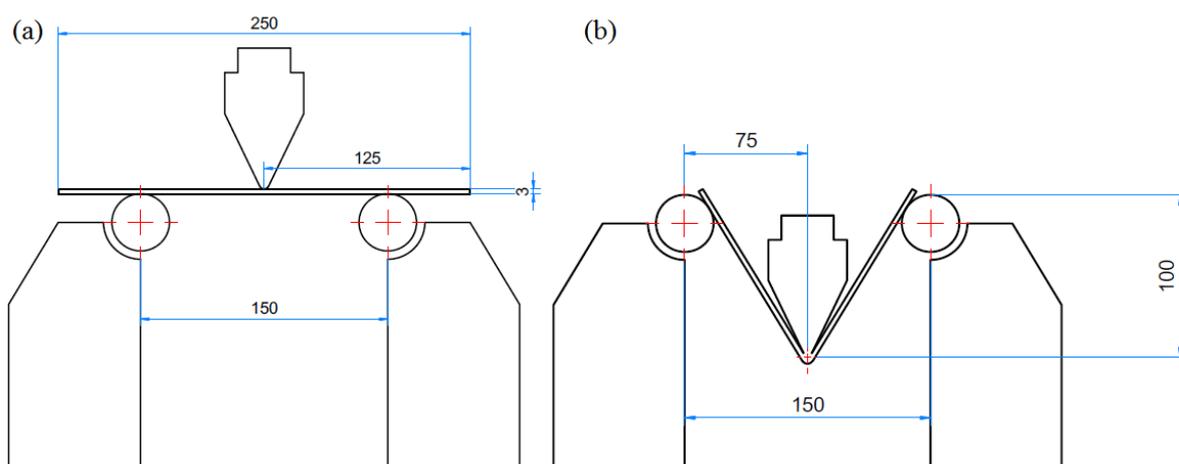
r_Δ – Coeficiente de anisotropia planar;

3.4 ESTUDO DE DOBRAMENTO

O grande foco deste trabalho está na avaliação e caracterização do Hardox, um aço de elevada resistência mecânica e dureza, quando submetido ao processo de conformação mecânica de dobramento, um dos processos de manufatura mais empregados na indústria. Este tipo de material possui um comportamento particular quando submetido a conformação, esta particularidade reside no fato de possuir alto índice de dureza, o que eleva o desgaste de matrizes e ferramentas, além de reduzir a sua capacidade de deformação, por ser um material que apresenta comportamento de baixa ductilidade.

O processo de conformação por dobramento de três pontos foi o adotado neste estudo, assim como na pesquisa apresentada de Mai, Wen e Lu, 2018. Neste procedimento as amostras foram posicionadas sobre uma matriz, de forma a ficarem apoiadas em suas extremidades sobre os roletes, sendo assim livres para se deslocarem de acordo com a força aplicada pelo punção, onde objetiva-se a obtenção de peças em formato “V”. É possível analisar na Figura 15, o posicionamento das amostras para a realização dos estudos (a), e o deslocamento total do punção aplicado (b), sendo este sempre de 100 mm.

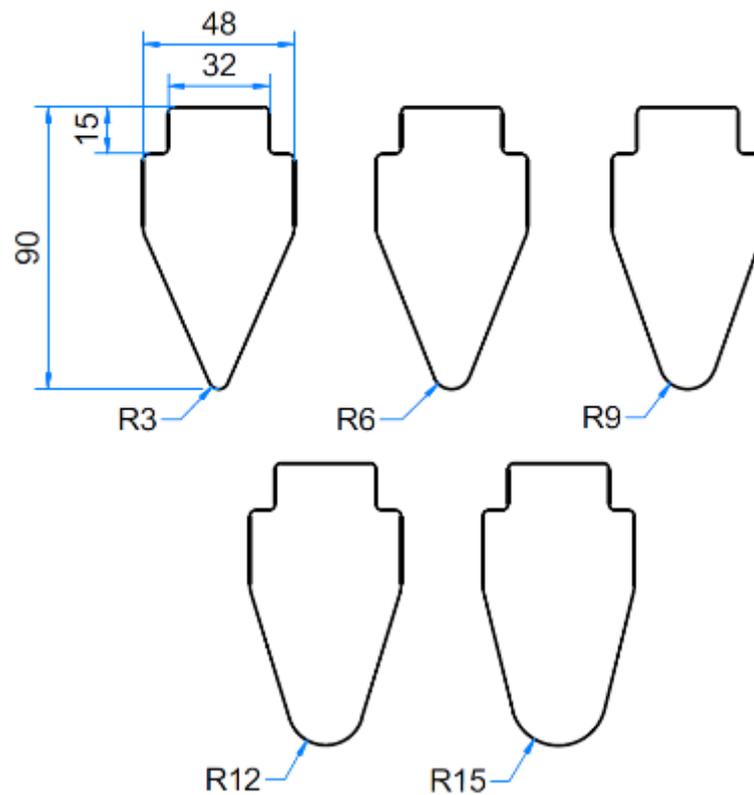
Figura 15 – Configuração da matriz, ferramental e amostras para a realização dos ensaios de dobramento.



Fonte: O Autor.

Os ensaios ocorreram de forma a contemplar algumas das principais variáveis do processo de conformação por dobramento, sendo eles o raio da ferramenta, a velocidade de deslocamento da mesma, o sentido de laminação do material e a temperatura dos corpos de prova. A primeira variável foi o raio dos punções, na Figura 16, é possível observar a geometria deste ferramental, no qual são todos eles fabricados em aço SAE 4340, tratados termicamente por têmpera e revenimento. Logo, aplicou-se um total de cinco punções, os quais possuem basicamente a mesma geometria, alterando-se apenas o raio de sua extremidade inferior, que é utilizada para aplicação da carga de deformação, sendo estes de respectivamente de 3, 6, 9, 12 e 15 mm.

Figura 16 – Geometria dos punções utilizados para os ensaios de dobramento com raio de 3, 6, 9, 12 e 15 mm.



Fonte: O Autor.

O sentido de laminação também foi alternado neste estudo, onde amostras com 40 mm de largura e 250 mm de comprimento, foram obtidas por meio do processo de corte a laser, com orientação de 0° e 90° com relação ao eixo de laminação, assim como nos ensaios de tração anteriormente citados. Para que não ocorresse um equívoco quanto a orientação das amostras obtidas, todas foram gravadas com uma seta em sua extremidade, marcando assim a relação entre a respectiva amostra e o sentido de laminação da mesma, como também foi realizado no ensaio de tração. Como este símbolo foi realizado na extremidade das amostras, o mesmo não acarretou em alterações na região conformada.

A terceira variável analisada nos ensaios de dobramento foi a velocidade de deslocamento do punção. Os ensaios foram realizados em três distintas velocidades, sendo estas de 2,5, 5 e máxima de 50 mm/s, sendo que os ensaios a 2,5 e 5 mm/s foram realizados no equipamento de ensaios EMIC®, mesmo já utilizado anteriormente nos ensaios de tração e anisotropia, simulando uma condição de baixa velocidade. Já o dobramento a 50 mm/s foi realizado em uma prensa hidráulica FKL®, apresentada na Figura 17, que por sua vez, assemelha-se a uma condição industrial e de alta produtividade, é importante destacar que em ambos os casos, apenas a velocidade do processo foi alterada.

Figura 17 – Prensa Hidráulica FKL® utilizada nos ensaios de dobramento.



Fonte: O Autor.

O último parâmetro analisado durante a realização dos ensaios foi a temperatura de conformação. Os corpos de prova foram inicialmente ensaiados a temperatura ambiente, que foi acrescida a aproximadamente 100 °C até a temperatura máxima de 500 °C, ou seja, os ensaios foram realizados a 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C. Para o aquecimento utilizou-se um forno Sanchis®, como pode ser observado na Figura 18, no qual todos os dobramentos ocorreram no equipamento FKL®, com velocidade de deslocamento da ferramenta de 50 mm/s. As amostras foram aquecidas por um período de 10 minutos, o forno por sua vez foi posicionado exatamente ao lado da matriz, minimizando assim as perdas térmicas das amostras para o ambiente. O resfriamento de todos os corpos de prova foi realizado ao ar, não ocorrendo qualquer controle da taxa de resfriamento.

Figura 18 – Forno Sanchis® utilizado para o processo de aquecimento das amostras.



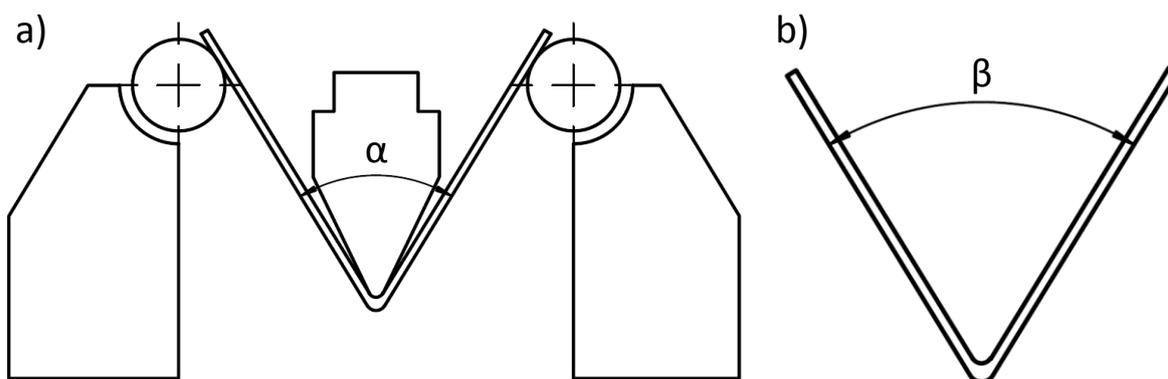
Fonte: O Autor.

No dobramento, foi avaliado também os ângulos das amostras, sendo estes mensurados em dois momentos. A primeira avaliação ocorreu com o ângulo de conformação, realizado no momento de maior deslocamento da ferramenta sobre as amostras, sendo mensurado o ângulo entre as faces externas das abas dos corpos de prova. É válido destacar que esta avaliação foi realizada apenas para as amostras conformadas a frio, uma vez que este valor não deve ser influenciado pela temperatura, além de se tornar mais complexo uma avaliação com as amostras aquecidas.

A segunda medição realizada ocorreu com base nas mesmas faces da primeira, porém foi aplicada após a conformação, ou seja, posteriormente a aplicação de quaisquer cargas empregadas, indicando assim o ângulo final das peças. Como este processo pode ser realizado já com as peças resfriadas, neste caso, todas as amostras foram avaliadas. Com posse destes valores, foi possível avaliar posteriormente, alterações entre os ângulos na conformação e após, com a peça já dobrada.

Na figura 19, é ilustrada a metodologia aplicada para mensurar o ângulo de conformação (a) e o ângulo final das amostras (b). Nas duas configurações apresentadas, os valores dos ângulos foram obtidos com a aplicação de um goniômetro.

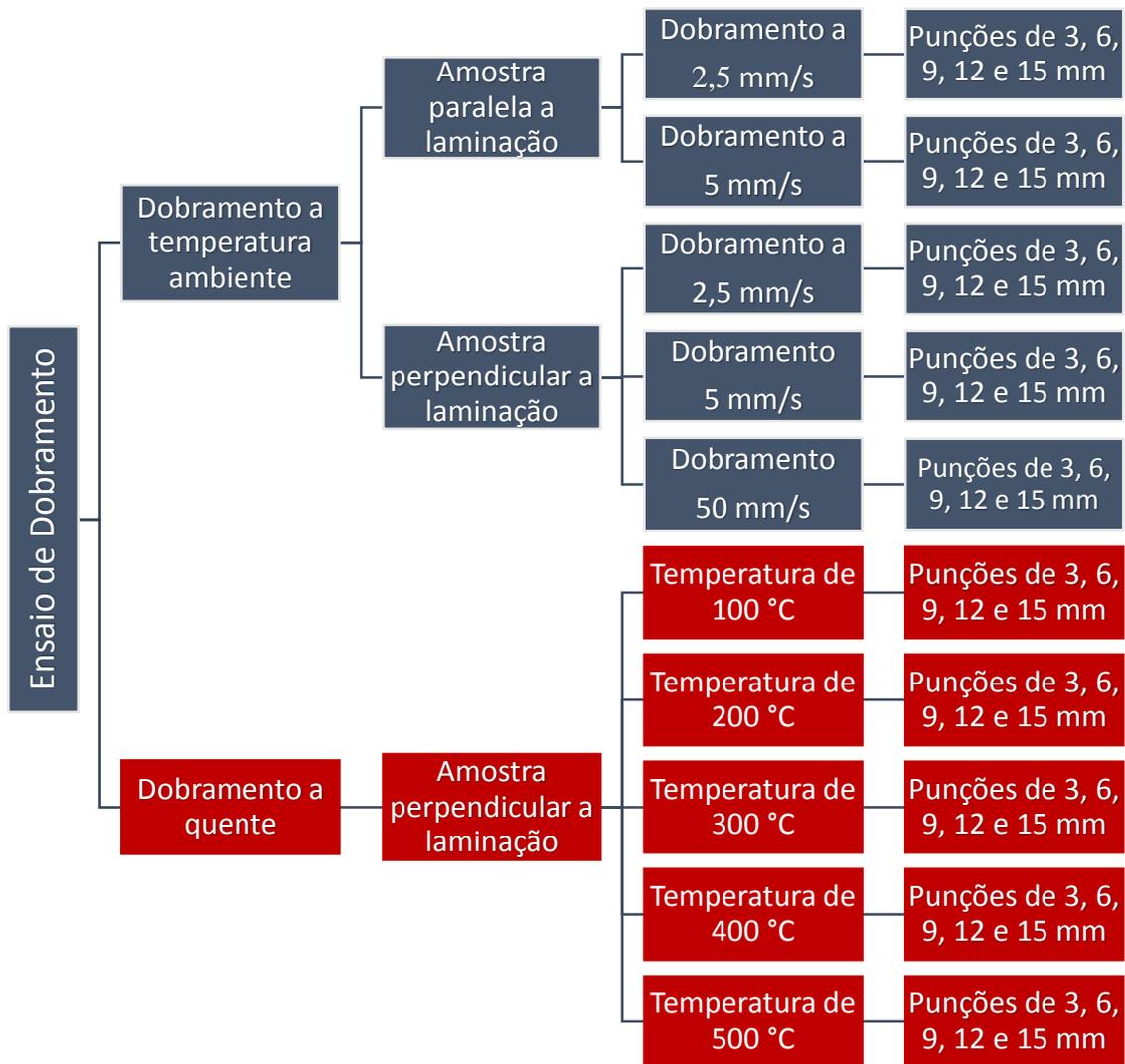
Figura 19 – Processo de obtenção dos ângulos das amostras conformadas



Fonte: O Autor.

Assim, é possível resumir os ensaios de dobramento de acordo com a Figura 20, onde se observa a metodologia empregada para este estudo. Com o objetivo de obter uma repetitividade dos ensaios realizados, para cada uma das possibilidades apresentadas, três amostras foram ensaiadas.

Figura 20 – Fluxo de realização de ensaios de dobramento com aplicação das distintas velocidades, raios, sentidos de laminação e temperaturas de aquecimento

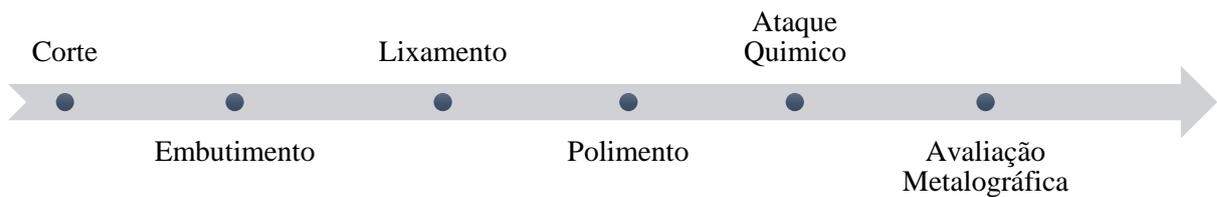


Fonte: O Autor.

3.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A avaliação metalográfica foi realizada neste presente estudo após a realização da conformação das amostras, possibilitando assim a análise sobre a região conformada, bem como o impacto da variação térmica na microestrutura do material. A avaliação metalográfica foi realizada de acordo com o fluxo de processo apresentado na Figura 21.

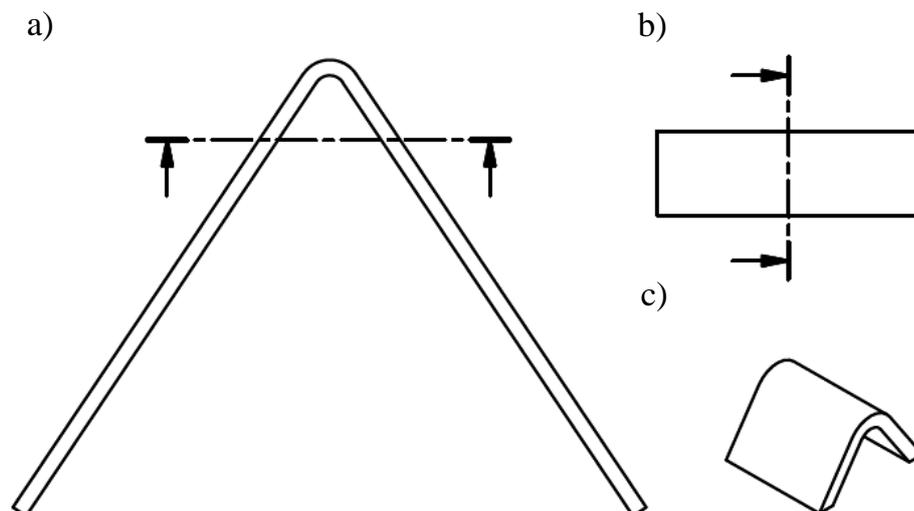
Figura 21 – Fluxo de preparação das amostras para análise metalográfica.



Fonte: O Autor.

Após a realização do processo de dobramento, as amostras foram seccionadas, para redução de suas dimensões e assim possibilitar o embutimento, como pode ser observado na Figura 22. Primeiramente foram retiradas as abas do corpo de prova (a), posteriormente, um corte perpendicular à linha de centro do dobramento foi realizado (b), logo a amostra apresentou-se com um perfil “V”, porem com dimensional reduzido com relação ao original. Desta forma realizou-se a avaliação focada na região central, submetida a conformação (c).

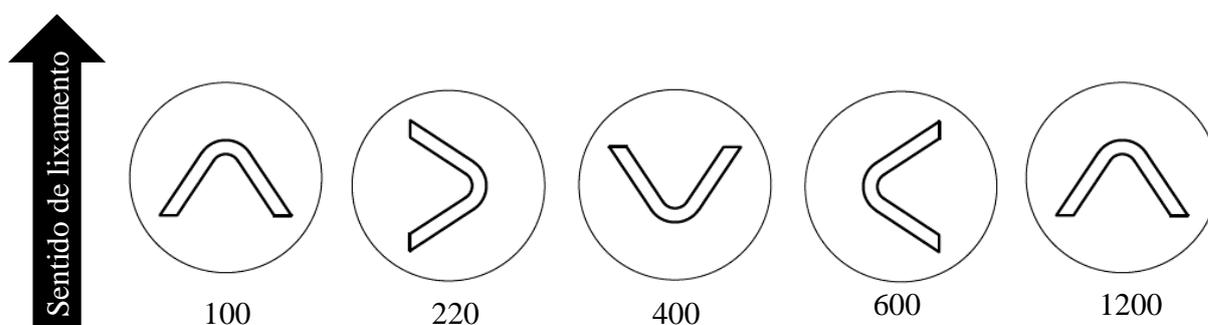
Figura 22 – Cortes realizados na preparação das amostras para o embutimento.



Fonte: O Autor.

Seguinte ao processo de corte, as amostras foram embutidas, neste caso sendo realizado com uma resina sintética de baquelite, viabilizando assim a realização das etapas seguintes de lixamento e polimento. As lixas aplicadas para a preparação foram respectivamente com as granulometrias de 100, 220, 400, 600 e 1200, aplicadas sempre em ordem crescente. Entre cada uma das granulometrias de lixa empregadas, as amostras foram rotacionadas em 90° com relação ao sentido de preparação anterior, sendo como parâmetro para a troca de lixas, o fato destas não apresentarem riscos ou marcas oriundos do processo anterior, como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 – Processo de rotação das amostras embutidas entre cada granulometria de lixa empregada.



Fonte: O Autor.

Concluindo-se a preparação, após o lixamento, foi realizada a etapa de polimento, para isto utilizou-se pasta de diamante, com granulometria de 3 μm , conferindo-se assim, uma superfície lisa e isenta de imperfeições, adequada para um estudo metalográfico. Como última etapa de preparação foi realizado o ataque químico, neste caso, com Nital a 4%, porém antes do ataque, limpou-se a amostra com álcool isopropílico e algodão. Utilizou-se o microscópio Olympus® GX51 para as avaliações.

3.6 MEDIÇÃO DE DUREZA

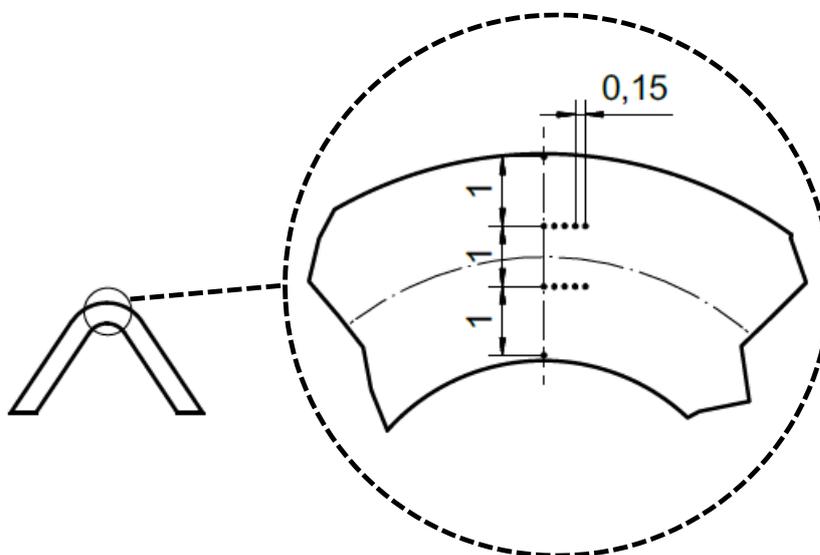
Uma característica inerente aos aços de elevada resistência ao desgaste é a sua elevada dureza, oriunda geralmente de tratamentos térmicos, sendo o material em estudo um caso característico. O Hardox é submetido a um processo de fabricação de termolaminação, garantindo uma temperabilidade ao longo de toda a sua espessura. Estima-se de acordo com o fabricante, que a dureza nominal seja de 500 HB.

Realizou-se a medição da dureza das amostras logo após a avaliação metalográfica, pois assim realizou-se a investigação sobre uma superfície com alto nível de acabamento e isenta de possíveis imperfeições. Empregou-se um durômetro Meptcon® com carga de 0,5 kg.

Escolheu-se a posição para a realização das medições conforme representado pelo esquema da Figura 24, onde ilustram-se os pontos com relação a espessura da chapa (a) e ao longo do comprimento da mesma (b). Como referência para esta avaliação, utilizou-se o artigo dos autores Kaijalainen, et al, 2018. Os autores investigaram o comportamento da dureza no dobramento sobre uma chapa de 6 mm de espessura, entretanto, no presente trabalho, o material submetido ao dobramento possui uma espessura de 3 mm, logo, realizou-se algumas pequenas adaptações.

Adotou-se uma medição em relação a espessura, partindo da superfície externa do dobramento em direção a superfície interna, com variação entre cada ponto de 1,5 mm, para este estudo, uma variação de 1 mm foi abordada, resultando-se em quatro pontos. Realizou-se por parte dos autores, medições a cada 50 μm , em um total de seis medições. Para este trabalho, aplicou-se 8 medições com distanciamento de 150 μm entre cada uma. Realizou-se medições paralelas a superfície em duas camadas, no qual cada uma estava 1 mm das superfícies da chapa, sendo assim, quatro medições para cada uma destas camadas.

Figura 24 – Posicionamento das medições de dureza com relação a espessura e ao sentido longitudinal das amostras [mm].



Fonte: O Autor.

3.7 LÍQUIDO PENETRANTE

O ensaio de líquido penetrante (LP), é um ensaio não destrutivo, empregado com o objetivo de detectar falhas e descontinuidades em um componente. A seguir, descreve-se as etapas adotadas para este estudo:

- 1) Limpou-se as superfícies externas dos corpos de prova, com algodão e álcool isopropílico, garantindo uma perfeita limpeza destas superfícies;
- 2) Aplicou-se penetrante, através de pulverização, sendo para este estudo aplicado um penetrante Metal-Check VP30;
- 3) Utilizou-se um período para impregnação do produto sobre as peças de 30 minutos;
- 4) Limpou-se as superfícies com algodão;
- 5) Aplicou-se por pulverização o revelador sobre as mesmas superfícies, posteriormente a vigorosa agitação do produto, garantindo-se melhor homogeneidade, aplicou-se o produto Metal-Check D70;
- 6) Secou-se o revelador por um período de 30 minutos ao ar;
- 7) Analisou-se possíveis revelações de trincas e fissuras abertas nas peças.

Para o ensaio com líquido penetrante, selecionou-se uma amostra dobrada a cada uma das temperaturas (20, 100, 200, 300, 400 e 500°C) e a cada um dos raios de punção (3, 6, 9, 12 e 15mm), contemplando-se desta forma um total de 30 amostras.

4. RESULTADOS

Todos os resultados obtidos, são expostos neste capítulo, trazendo-se as informações qualitativas e quantitativas encontradas, através de registros em fotos, gráficos e tabelas.

4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Com a realização do ensaio de tração sobre 20 amostras, nos quais 10 no sentido paralelo e 10 perpendicular à laminação é possível compor a Tabela 2, onde observa-se de forma resumida a apresentação dos dados de resistência máxima à tração e limite de escoamento.

O limite de escoamento obtido perpendicularmente a laminação ficou em uma média de 1513 MPa, no qual o maior valor mensurado foi na primeira amostra, apresentando um valor de 1561 MPa, já o menor valor encontrado foi para a amostra 9, sendo o limite de escoamento para este caso de 1409 MPa. Já para os ensaios realizados paralelos a laminação a média do limite de escoamento foi de 1441 MPa, sendo o valor máximo detectado o da sétima amostra, com 1520 MPa, enquanto que o menor de 1393 MPa, na nona amostra. Observa-se que em ambos os casos os valores ficaram muito próximos ou maiores que o nominal do material, que de acordo com o fabricante é de 1400 MPa.

Tabela 2 – Limite de escoamento e resistência máxima obtidos no ensaio de tração.

Tensões - Perpendicular [MPa]			Tensões - Paralelo [MPa]		
Amostra	Resistência máxima à tração	Limite de Escoamento	Amostra	Resistência máxima à tração	Limite de Escoamento
1	1636	1561	1	1465	1395
2	1575	1492	2	1530	1468
3	1629	1548	3	1500	1431
4	1585	1503	4	1517	1447
5	1609	1545	5	1525	1446
6	1623	1546	6	1490	1437
7	1595	1512	7	1569	1520
8	1580	1494	8	1506	1439
9	1473	1409	9	1451	1393
10	1577	1515	10	1494	1431
Média	1588	1513	Média	1505	1441
Desvio Padrão	44	42	Desvio Padrão	32	34

Fonte: O Autor.

Na Tabela 3, são apresentados os dados de deformação percentual das amostras ensaiadas. Observa-se, que o valor médio de deformação para as amostras obtidas paralelamente ao eixo de laminação foi de 5,8%, enquanto que nas amostras perpendiculares, este valor foi de 5,2%. Logo, identifica-se que a deformação percentual total, foi muito próxima para ambos os sentidos.

Tabela 3 – Valores de deformação total resultantes do ensaio de tração.

Deformação		
Amostra	Paralela	Perpendicular
1	6,9%	4,9%
2	4,9%	4,9%
3	5,7%	5,1%
4	6,6%	5,2%
5	6,6%	5,3%
6	4,8%	5,1%
7	4,6%	5,5%
8	5,9%	6,0%
9	5,7%	4,9%
10	5,9%	5,4%
Média	5,8%	5,2%

Fonte: O Autor.

Na Figura 25, é apresentado um dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração. É possível detectar na amostra uma pequena formação de estrição na região da fratura, porém com plano de rompimento a 45°, mostra-se que a ductilidade do Hardox é relativamente baixa.

Figura 25 – Amostra submetida ao ensaio de tração



Fonte: O Autor.

4.2 ANISOTROPIA

No ensaio de anisotropia, um total de 24 amostras foram ensaiadas, sendo oito para cada orientação com relação ao sentido de laminação. Na Tabela 4, observa-se resumidamente os dados calculados com base nos ensaios, que são os índices de anisotropia para cada uma das direções analisadas (r_{0° , r_{45° e r_{90°) por amostra. A tabela apresenta também uma média aritmética de todas as amostras para um determinado sentido de estudo, com seu respectivo desvio padrão, assim como o valor médio de anisotropia do material (r_m) e o índice de anisotropia planar (r_Δ). Todos os valores calculados foram determinados por meio das fórmulas 1, 2, 3 e 4, apresentadas no subcapítulo 3.3, deste mesmo trabalho, sendo que cada valor mensurado nos ensaios são apresentados em maior detalhe no Apêndice A.

Tabela 4 – Índices de anisotropia médios e planares mensurados para amostras a 0° , 45° e 90°

Amostra	Sentido de orientação				
	0°	45°	90°		
1	1,237	0,950	0,847	r_{0°	1,00
2	1,028	0,679	0,726	r_{45°	1,25
3	0,706	2,158	0,536	r_{90°	0,81
4	1,389	0,902	0,509	r_m	1,08
5	0,861	1,772	0,607	r_Δ	-0,34
6	0,990	0,747	1,044		
7	0,677	2,047	0,877		
8	1,099	0,718	1,357		
Desvio Padrão	0,231	0,592	0,268		

Fonte: O Autor.

Com base nos valores obtidos, e pelos desvios padrões calculados, observa-se uma dispersão elevada nos dados da anisotropia, no qual encontra-se valores de 0,998 para as amostras paralelas a laminação, 1,247 para avaliações a 45° e de 0,813 perpendicularmente. O coeficiente médio de anisotropia calculado apresentou índice de 1,07, já o índice planar foi de -0,341.

4.3 DOBRAMENTO

Como foi apresentado, o ensaio de dobramento foi realizado sobre maior variação de parâmetros, sendo aplicado sobre cinco raios de conformação distintos (3, 6, 9, 12 e 15mm), mediante distintas condições, tais como temperatura (20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C), velocidade (2,5, 5 e 50 mm/s) e sentido de laminação do material (perpendicular e paralelo). Por este motivo, os resultados obtidos com o ensaio de dobramento são apresentados de forma segmentada, primeiramente os ensaios realizados a frio e posteriormente a quente.

4.3.1 Dobramento a frio

No estudo do dobramento a frio, quatro variáveis foram sincronizadas, sendo que o processo foi realizado a uma temperatura ambiente de 20 °C, o que caracteriza de fato a conformação a temperatura ambiente ou a frio. Alterou-se os raios de conformação, sendo aplicados os cinco deste estudo (3, 6, 9, 12 e 15 mm), velocidade de deslocamento da ferramenta (2,5, 5 e 50 mm/s) e o sentido de obtenção das amostras com relação ao sentido de laminação (paralelo ou perpendicular).

Na Tabela 5, são apresentados os ângulos de dobramento mensurados nos ensaios. Observa-se por meio da Tabela, que para cada um dos raios de punção aplicados, um ângulo de dobramento foi obtido, sendo que quanto maior o raio do ferramental, menor o valor do ângulo entre as faces das amostras, no instante de maior deslocamento da ferramenta.

Tabela 5 – Ângulos de dobramento mensurados em amostras conformadas a frio com raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm

Raio	3 mm	6 mm	9 mm	12 mm	15 mm
Ângulo de Dobramento	47 °	43°	40°	38°	37°

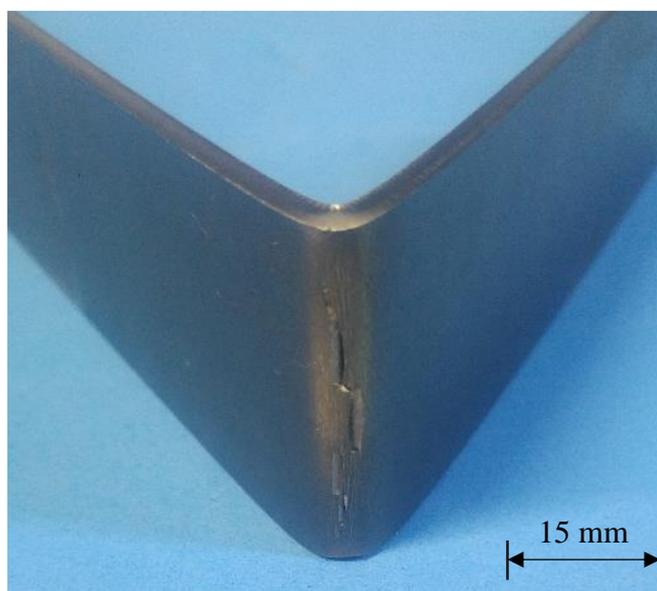
Fonte: O Autor.

No processo de conformação com variação do raio de ferramental obteve-se diferentes resultados para cada um destes. No primeiro caso ensaiado com o uso de raio de 3 mm, houve rompimento de todas as amostras estudadas, sendo que em alguns casos houve até mesmo o completo seccionamento das chapas na linha de dobramento. Para este raio a frio, todas as

amostras apresentaram a mesma condição, ou seja, com falha e inviabilidade de dobramento, assim como pode ser observado na Figura 26.

Ainda na conformação com o raio de 3 mm, considerou-se as variações de velocidade e de sentido de laminação das amostras, porém nenhuma destas variáveis apresentou quaisquer alterações no comportamento do Hardox. Mediante a variação destas demais características do processo, as amostras mantiveram-se apresentando fratura na região externa, mostrando-se assim não possuírem impacto direto no processo, sob esta condição de dobramento

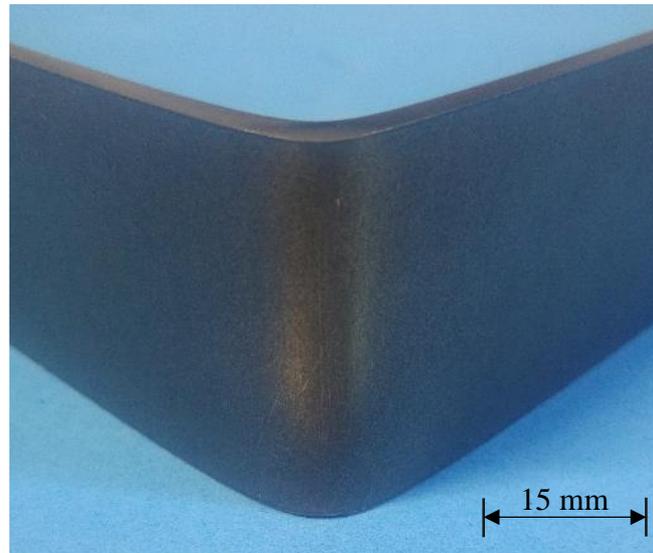
Figura 26 – Corpo de prova conformado a 20 °C com raio de 3 mm.



Fonte: O Autor.

Quando na aplicação da ferramenta com raio de 6 mm, não se observou fraturas como na conformação com punção de raio de 3 mm, porém as amostras apresentaram diversas trincas, que se estendem acompanhando toda a linha de dobramento da peça, como é apresentado na Figura 27. As trincas detectadas representam uma provável condição limite do material, próximo a fratura, que podem acarretar na falha catastrófica do corpo de prova, mediante a aplicação de carga em serviço, por exemplo. Destaca-se que assim como no raio anterior, as demais variáveis não surtiram impacto no comportamento da amostra, ocorrendo a presença das mesmas imperfeições, tanto com a alteração da velocidade como no sentido de laminação.

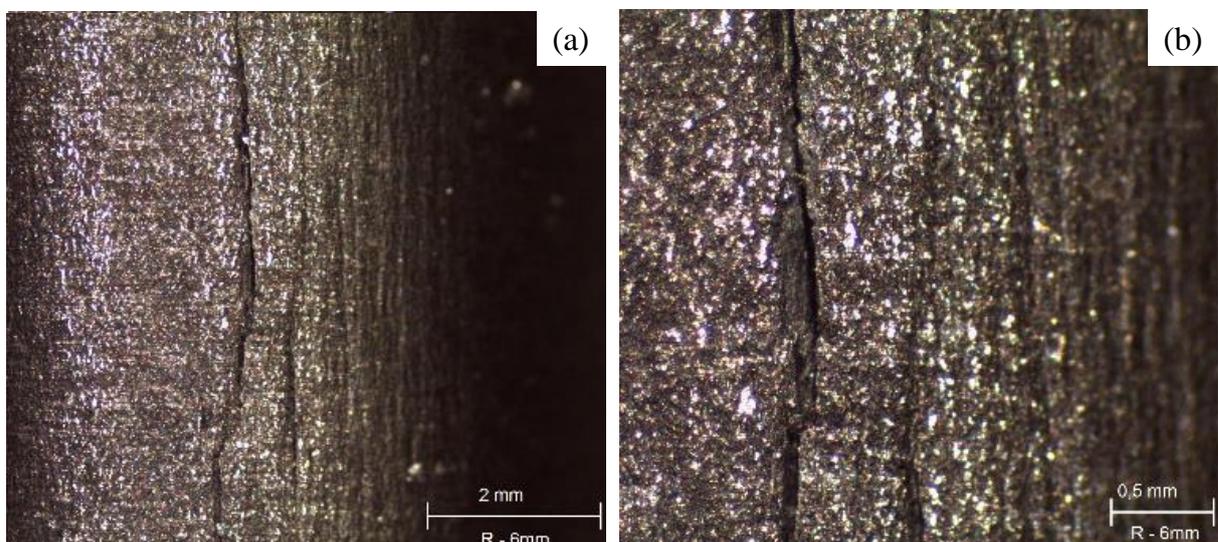
Figura 27 – Corpo de prova conformado a 20 °C com raio de 6 mm.



Fonte: O Autor.

O estudo macrográfico apresentado na Figura 28, mostra as fissuras no material submetido ao dobramento com raio de 6 mm, com ampliações de 12,5X (a) e de 30X (b). Observa-se que realmente ocorre a fissuração da superfície do Hardox, acompanhada de algumas nucleações menos profundas, o que apesar de não ter causado a ruptura completa do material, causam a inviabilidade de aplicação deste raio, sobre estas condições de temperatura e de processo.

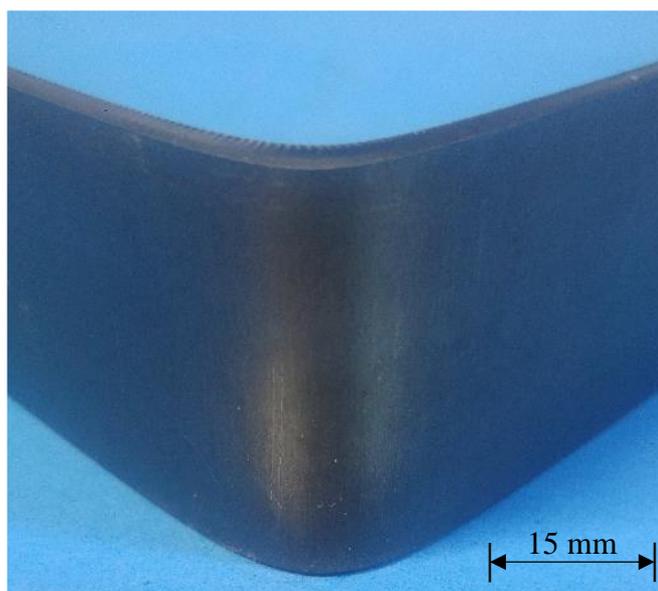
Figura 28 – Macrografia de corpos de prova submetidos ao dobramento a 20 °C com raio de 6 mm, 12,5x (a) e 30x (b).



Fonte: O Autor.

No raio de 9 mm detectou-se uma melhora na condição de conformação do Hardox. Nesta configuração, como é representado na Figura 29, o corpo de prova não apresentou trincas, mas sim apenas algumas nucleações superficiais, já mostrando uma menor condição limite de conformação. É possível observar que neste caso estas imperfeições não se estendem por toda a região do dobramento da amostra, sendo encontradas de forma isolada ao longo da superfície de conformação.

Figura 29 – Corpo de prova conformado a 20 °C com raio de 9 mm.

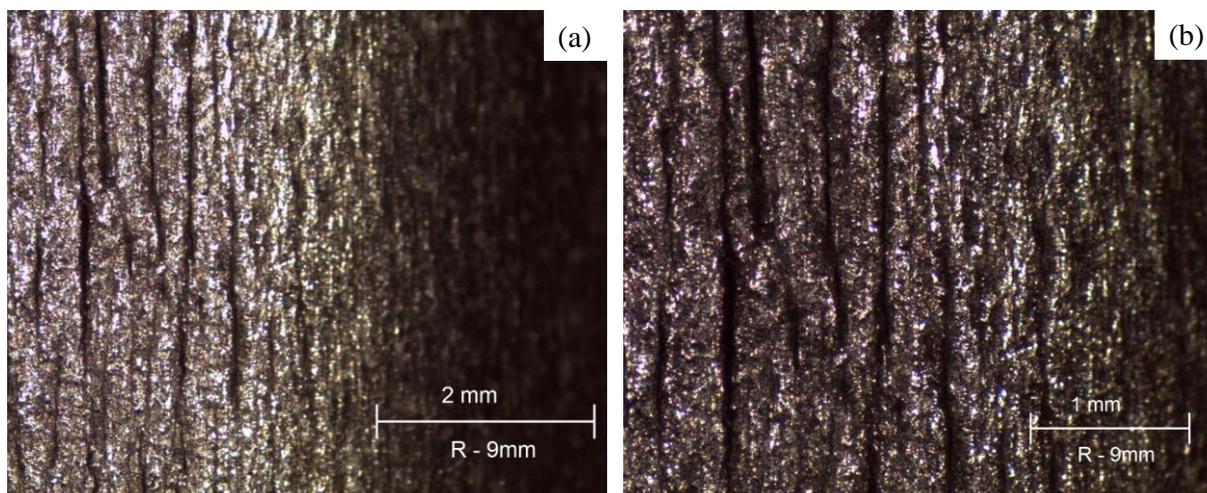


Fonte: O Autor.

Quanto ao parâmetro da velocidade de ferramental, não se detectou mudanças significativas no Hardox. Com relação ao sentido de laminação, as amostras obtidas perpendiculares a este eixo, apresentaram-se com um comportamento levemente superior as amostras paralelas. Em uma inspeção visual, é perceptível que estas amostras apresentaram-se com imperfeições menores e em menor quantidade, todavia, o comportamento para ambas as orientações é similar.

Na Figura 30, ilustra-se uma amostra conformada com raio de 9 mm, em ampliação de 12,5X (a) e 20X (b). Diferentemente do raio de 6 mm, não observa-se a presença de trincas no Hardox, para a aplicação de 9 mm, entretanto, destacam-se algumas fissurações na superfície do material, que denotam que o comportamento está em uma condição próxima ao limite, indicando a possibilidade de uma eminente trinca e posterior fratura. Logo, também para o raio de 9 mm, foi possível identificar falhas nesta condição.

Figura 30 – Macrografia de corpos de prova submetidos ao dobramento a 20 °C raio 9 mm 12,5x (a) e 30x (b).

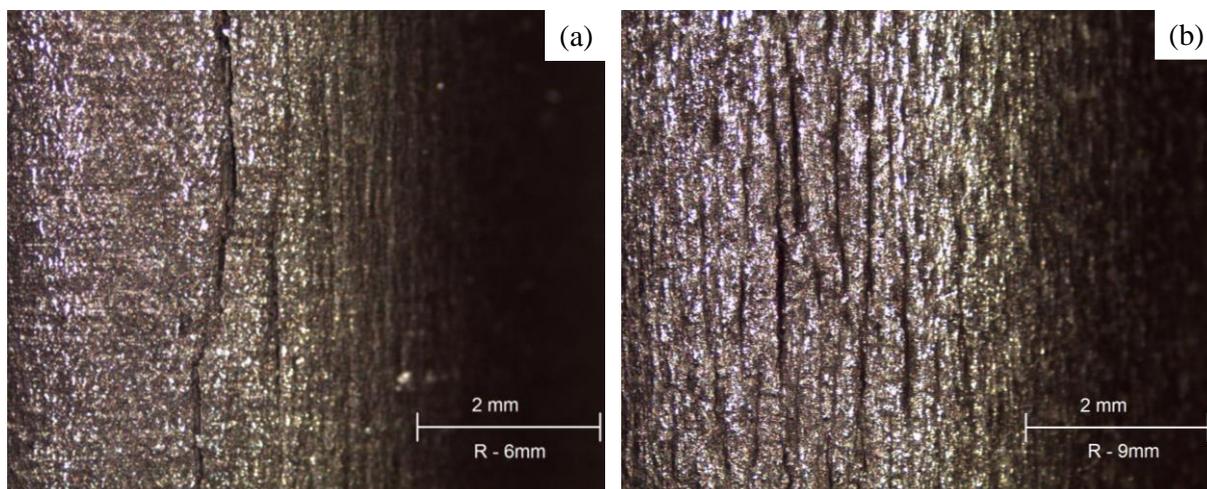


Fonte: O Autor.

Na Figura 31, compara-se as macrografias realizadas com 12,5X, sobre amostras dobradas com raio de 6 mm (a) e 9 mm (b), onde pode-se observar a mudança no comportamento do Hardox, devido a alteração deste parâmetro do processo. Observa-se para o caso do dobramento com raio de 6 mm, que o material apresentou uma trinca profunda, que se estende por toda a região em avaliação. No caso da aplicação do raio de 9 mm, ocorreram apenas algumas nucleações, com menor profundidade com relação a superfície, além de não se estenderem por toda a região analisada. Logo, com base na avaliação destas macrografias, fica mais evidente a diferença no comportamento do Hardox conformado com punção de 6 mm e de 9 mm.

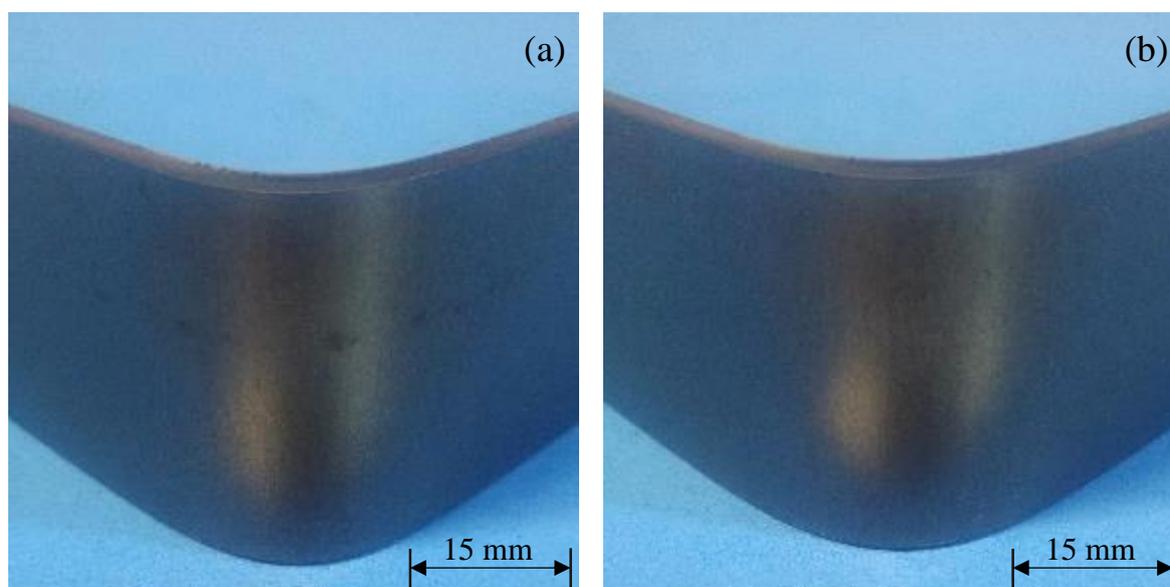
Já no dobramento com aplicação dos raios de 12 e 15 mm, encontrou-se um comportamento muito similar entre as amostras. Na Figura 32, é apresentado um corpo de prova conformado com punção de 12 mm (a) e 15 mm (b), onde denotasse que as amostras não possuem marcas, trincas ou quaisquer imperfeições, mostrando uma total integridade das peças, e uma adequada aplicação do processo de dobramento. Já quanto as variáveis de sentido de laminação e velocidade de deslocamento do punção, assim como em praticamente todas as demais circunstâncias até aqui apresentadas, não apresentaram influência no comportamento do material, ou seja, em ambos os casos aqui apresentados, estas variáveis não influenciaram consideravelmente no processo de dobramento.

Figura 31 – Macrografia de 12,5 X de amostras conformadas a 20 °C com raio de 6 mm (a) e 9 mm (b).



Fonte: O Autor.

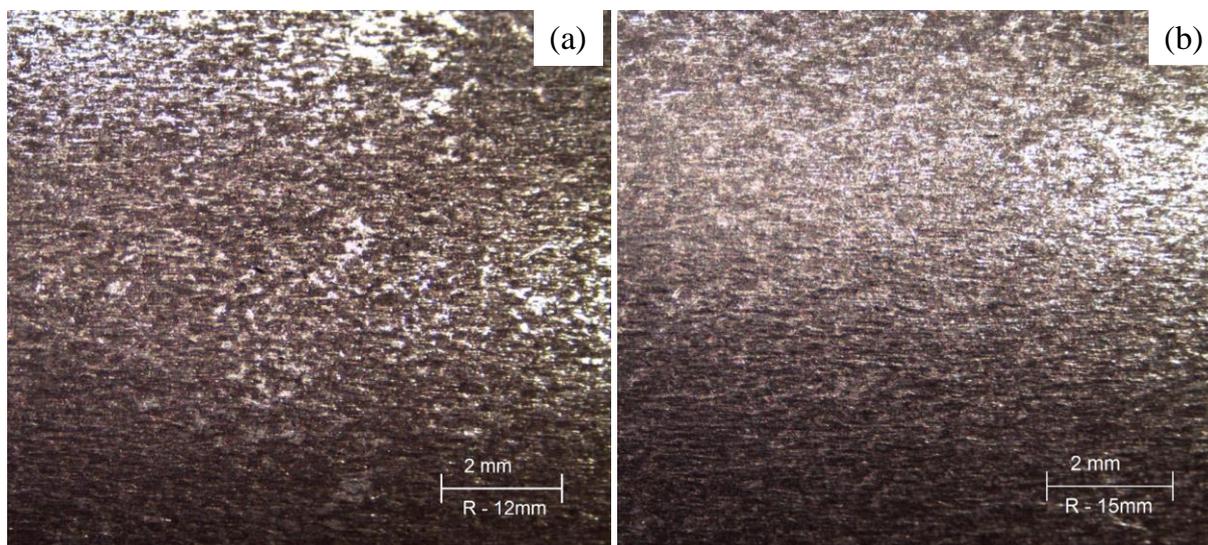
Figura 32 – Corpos de prova conformados a 20 °C com raio de 12 mm (a) e 15 mm (b).



Fonte: O Autor.

As macrografias para os raios de 12 e 15 mm são apresentadas através da Figura 33, onde tanto para o dobramento com punção de 12 mm (a) como o de 15 mm (b), utilizou-se uma ampliação de 8X. Assim como na inspeção visual, para ambos os casos de dobramento, não se identificou quaisquer imperfeições no Hardox, observa-se que em ambas as amostras, as mesmas apresentam a sua superfície lisa, e isenta de marcações, trincas ou quaisquer outras imperfeições, como observou-se em amostras com outros raios.

Figura 33 – Macrografia de corpos de prova submetidos ao dobramento a 20 °C raio de 12mm (a) e 15 mm (b).



Fonte: O Autor.

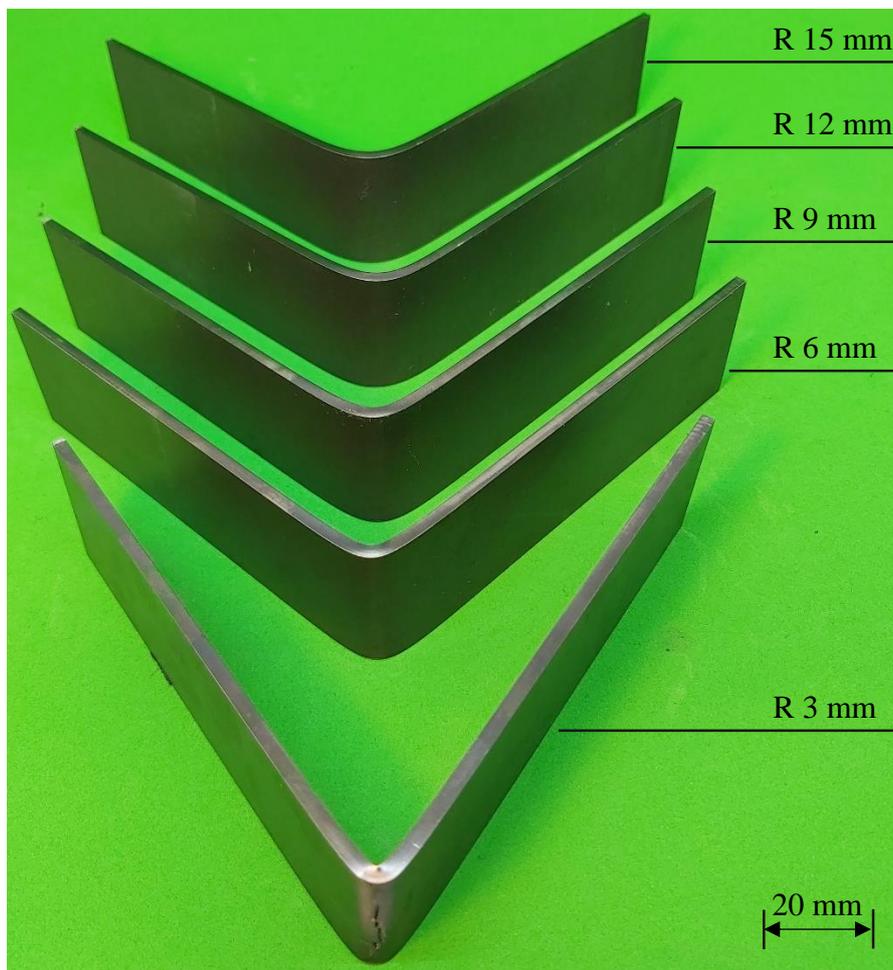
4.3.2 Dobramento a quente

No estudo do dobramento a quente, analisou-se dois principais fatores, sendo eles: o raio dos punções de conformação, aplicando-se todos os raios considerados para este projeto (3, 6, 9, 12 e 15 mm) e a temperatura de aquecimento do corpo de prova (100, 200, 300, 400 e 500 °C). Para esta fase de ensaios do estudo, não se considerou as variáveis de sentido de laminação e velocidade de conformação. Sendo válido ressaltar que sempre realizou-se o dobramento a uma velocidade de 50 mm/s, sendo assim, na avaliação do processo a quente, todas as amostras foram ensaiadas no mesmo equipamento (prensa hidráulica FKL®), diferentemente do dobramento a frio que foram aplicados dois distintos equipamentos (prensa hidráulica FKL® e máquina universal de ensaios EMIC®).

A primeira temperatura ensaiada foi de 100°C e como observa-se na Figura 34, os cinco raios de conformação foram empregados. Com a adoção desta temperatura, é possível detectar que no raio de 3 mm, ocorreram fraturas em todos os corpos de prova, enquanto que com a aplicação do raio do punção de 6 mm, não houve fratura, todavia, observou-se a presença de trincas na face externa ao dobramento, mostrando que o Hardox estaria em uma condição extrema e próxima de uma ruptura. Quando na aplicação do raio de conformação de 9 mm, essas nucleações foram menos presentes e intensas do que no raio anterior, apresentando que houve uma melhora no comportamento do material, porém ainda com a presença de

imperfeições. Por fim, no emprego dos raios de 12 e 15 mm, nenhuma imperfeição foi detectada, sendo assim, na temperatura de aquecimento de 100 °C, estes dois raios apresentam-se como adequados, sem a identificação de quaisquer imperfeições nas peças.

Figura 34 – Amostras conformadas com os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm a 100 °C.

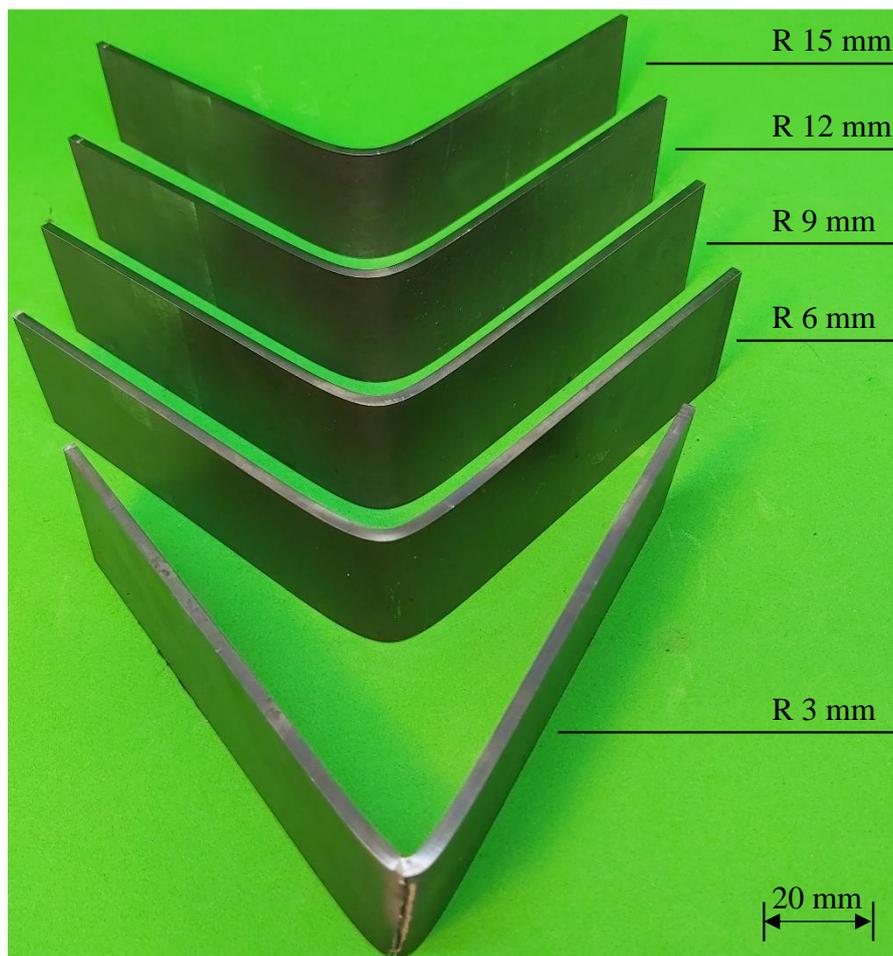


Fonte: O Autor.

O dobramento do Hardox a 200 °C é representado através da Figura 35, onde é apresentado um corpo de prova de cada um dos raios conformados a esta temperatura. Denota-se que o comportamento a 200 °C foi muito similar a condição de 100 °C, onde com a aplicação do raio de 3 mm, as amostras continuaram apresentando sua ruptura, enquanto que com o raio de 6 mm, trincas foram detectadas ao longo de toda a região de dobramento, sempre no sentido paralelo ao de deformação por meio do punção. Com o raio de 9 mm, uma melhora ainda foi perceptível, com relação ao de 3 e 6 mm, porém as amostras ainda não apresentaram-se isentas de pequenas nucleações e marcas de imperfeições do material, enquanto que nos raios de 12 e

15 mm, todos os corpos de prova destacam-se com total integridade, sem a presença de qualquer defeito.

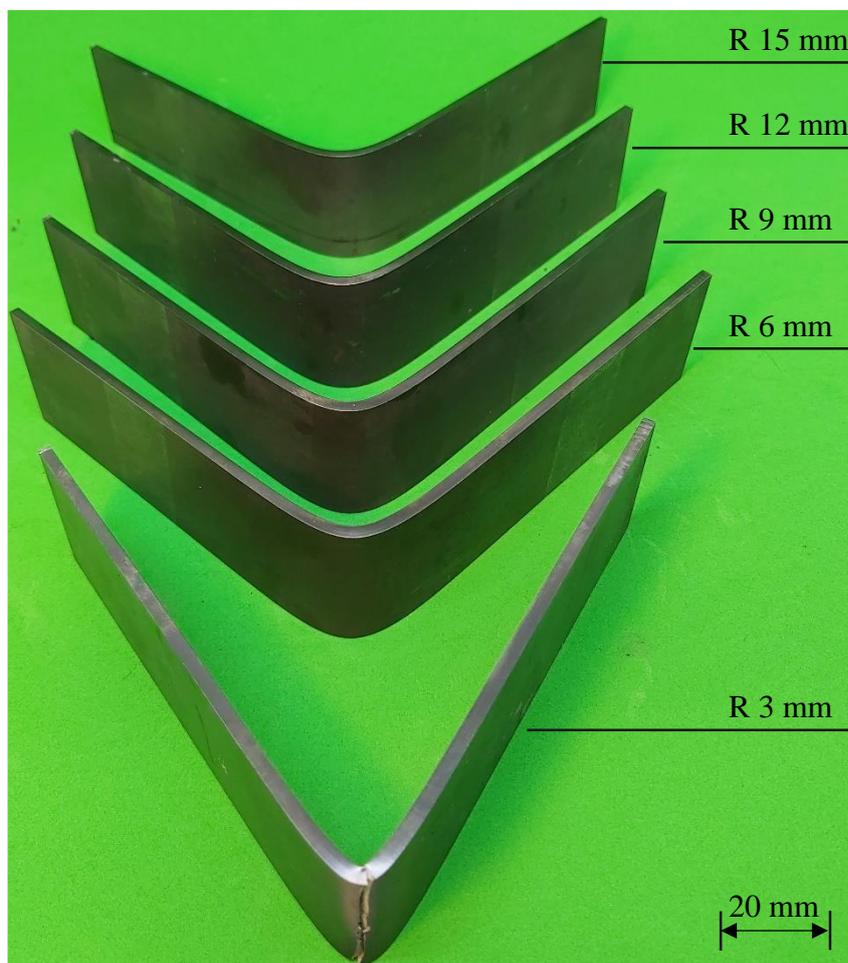
Figura 35 – Amostras conformadas com os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm a 200 °C.



Fonte: O Autor.

Na sequência, os ensaios a temperatura de 300 °C foram então empregados, como pode ser observado na Figura 36. Nesta composição de ensaio, alguns resultados foram distintos dos obtidos a temperaturas inferiores. As amostras se mantiveram apresentando ruptura com a aplicação do raio de 3 mm, entretanto, com o raio de 6 mm, as nucleações e imperfeições reduziram-se consideravelmente, mostrando uma melhora na conformabilidade do Hardox para este raio, porém ainda sim, as amostras não apresentaram-se isentas de imperfeições. No raio de 9 mm, já não se identificou imperfeições, as amostras foram todas caracterizadas em perfeitas condições, já sugerindo ser uma configuração adequada para a conformação. Logo os raios de 12 e de 15 mm, mantiveram o comportamento detectado nos demais casos, sempre sem identificação de quaisquer imperfeições que possam caracterizar falhas durante a conformação.

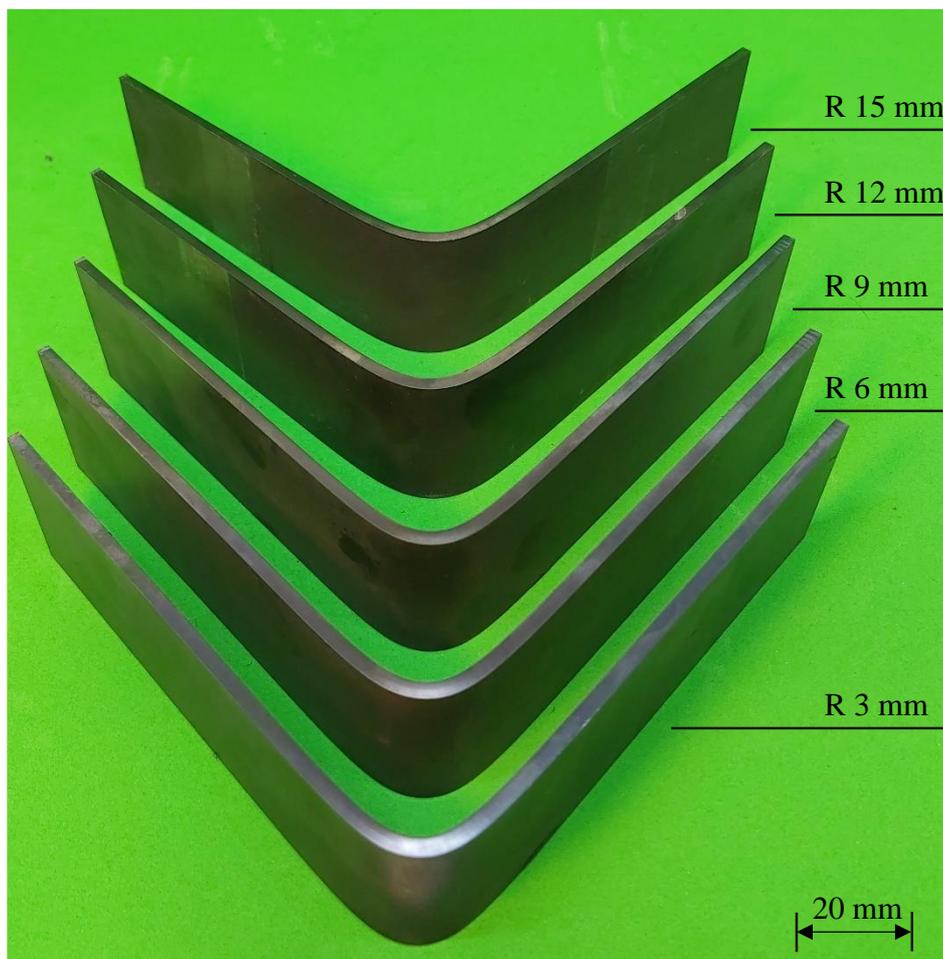
Figura 36 – Amostras conformadas com os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm a 300 °C.



Fonte: O Autor.

Na Figura 37, são ilustradas as amostras conformadas a temperatura de 400 °C, e a que apresentou uma maior mudança no comportamento do material. Com o emprego do punção com raio de 3 mm, já não houveram mais fraturas nas amostras, além de que não se detectou quaisquer imperfeições, todos os corpos de prova conformados nesta condição apresentaram uma ampla integridade de sua superfície. O mesmo ocorre para os demais raios, diferentemente de temperaturas anteriores, nos quais foram detectadas falhas na superfície externa de conformação. Os raios de 6 e 9 mm, para a temperatura de 400 °C, puderam ser empregados sem adversidades. Para os raios de 12 e de 15 mm, novamente os corpos de prova em sua totalidade apresentaram um bom comportamento.

Figura 37 – Amostras conformadas com os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm a 400 °C.



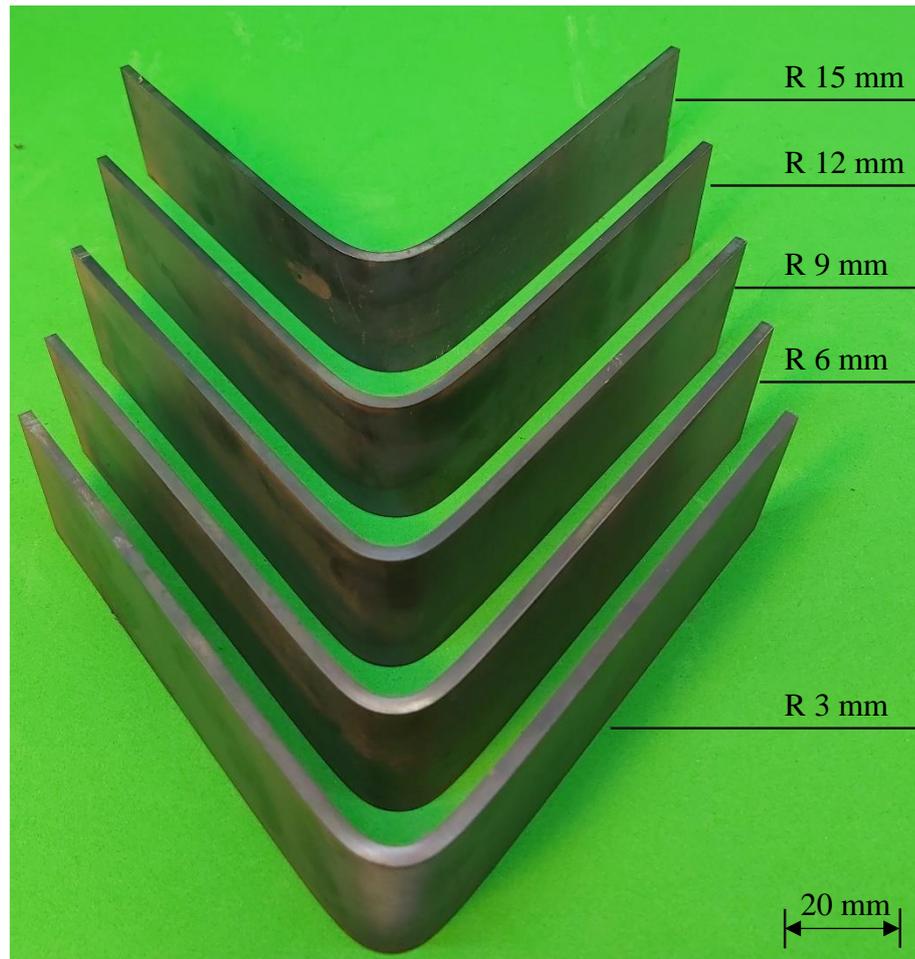
Fonte: O Autor.

A última temperatura considerada no estudo de dobramento do Hardox foi a de 500 °C, como é apresentado na Figura 38. Observa-se que com a conformação através do punção com raio de 3 mm, novamente não detectou-se ruptura dos corpos de prova, assim como no caso da aplicação da temperatura de 400 °C, todos as amostras se mantiveram íntegras, sem a presença de imperfeições, menos ainda de ruptura do corpo de prova. Nos raios de 6 e de 9 mm, também não identificou-se quaisquer imperfeições, com todas as amostras apresentando superfícies íntegras, o mesmo pode ser afirmado para os raios de 12 e de 15 mm, nas quais as amostras apresentaram-se isentas de imperfeições.

Uma das preocupações na aplicação de aquecimento a temperaturas mais elevadas na conformação de aços, é a formação de carepas e oxidações. É oportuno destacar que até a aplicação de aquecimento a 400 °C, nenhuma de ambas foram detectadas, tanto durante o aquecimento, como na conformação e mesmo após transcorrido um longo período dos ensaios. Enquanto que na aplicação da temperatura de 500 °C, as amostras mostraram uma maior

propensão a formação de corrosão superficial decorrente da exposição ao ar, indicando que no caso do emprego de temperaturas de 500 °C, um cuidado deve ser adotado quanto a exposição da superfície do Hardox, sendo que também não foram detectadas carepas.

Figura 38 – Amostras conformadas com os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm a 500 °C.



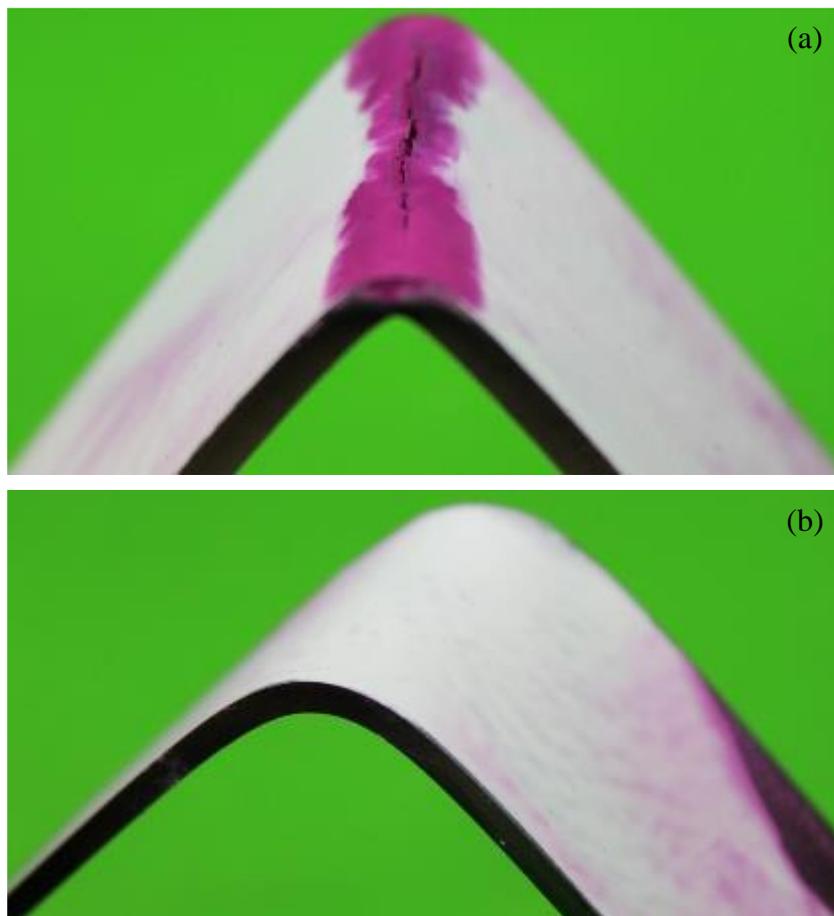
Fonte: O Autor.

4.4 LÍQUIDO PENETRANTE

Realizou-se a avaliação por líquido penetrante, de forma a contemplar pelo menos uma amostra conformada a cada um dos raios em cada uma das temperaturas, resultando-se assim em 30 peças analisadas.

Para as chapas conformadas com raio de 3 mm, pode destacar-se as amostras conformadas a temperatura de 20°C, 100 °C, 200 °C e 300 °C, onde todas apresentaram fratura no ensaio de dobramento, logo na análise por líquido penetrante, a região apresentou por consequência uma profunda demarcação na região da falha. Já as amostras conformadas a 400 e 500 °C, não apresentaram nenhuma identificação por meio do LP, mostrando a ausência de trincas e ou falhas na superfície. Na Figura 39, é possível observar amostras conformadas com raio de 3 mm a temperatura ambiente (a) e a 400 °C (b).

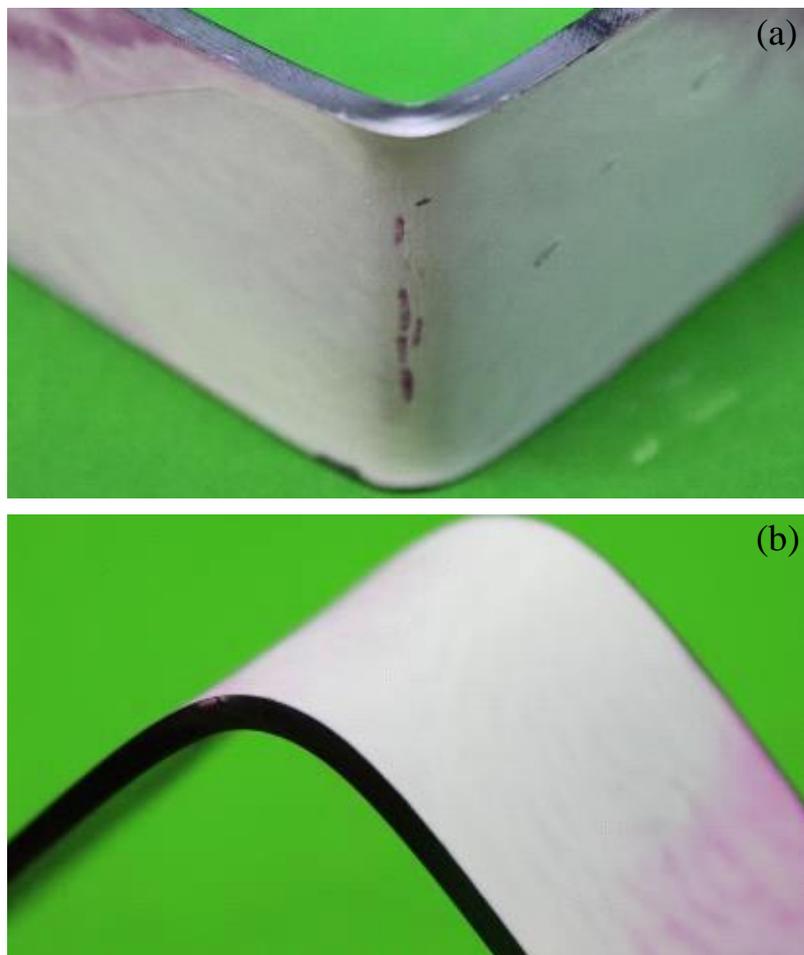
Figura 39 – Amostras dobradas com raio de 3 mm a 20°C (a) e 400 °C (b) submetidas ao LP.



Fonte: O Autor.

Já para os dobramentos realizados com punção de 6 mm, foram detectadas nos corpos de prova trincas e imperfeições superficiais, para a aplicação da temperatura de 20 °C a 300 °C, o que foi encontrado também no ensaio de LP, ocorrendo o realce destas imperfeições. Já na conformação a temperaturas mais elevadas como no caso de 400 °C e 500 °C, confirmou-se que não houve quaisquer trincas nas superfícies. Através da Figura 40, observa-se uma amostra conformada com raio de 6 mm a temperatura ambiente (a), no qual destacam-se algumas imperfeições por meio do líquido penetrante, e uma amostra com mesmo raio a 400 °C (b), completamente isenta de qualquer imperfeição.

Figura 40 – Amostras dobradas com raio de 6 mm a 20°C (a) e 400 °C (b) submetidas ao LP.



Fonte: O Autor.

No dobramento com ferramental de raio de 9 mm, observa-se o início da formação de algumas nucleações na superfície externa de conformação, todavia, no ensaio por líquido penetrante não foram detectadas revelações, o que denota que as mesmas, foram apenas formações superficiais e que não acarretaram na fissuração do material, ou seja, não houve a ruptura da superfície. Na Figura 41, é apresentada uma amostra conformada a temperatura ambiente, com raio de 9 mm.

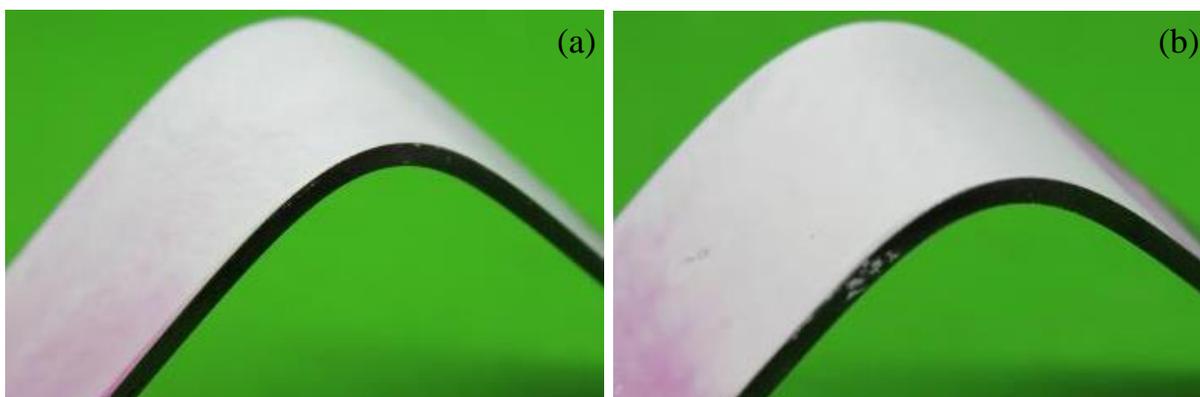
Figura 41 – Amostra dobrada com raio de 9 mm a 20°C submetida ao LP.



Fonte: O Autor.

Nos casos da aplicação de punções com raio de 12 e 15 mm, não houve imperfeições superficiais detectados no dobramento e nem mesmo no LP, como é apresentado pela Figura 42. Pode-se verificar que tanto no raio de 12 mm a temperatura ambiente (a), como com raio de 15 mm (b), ambas as amostras se apresentam integras e isentas de quaisquer imperfeições.

Figura 42 – Amostras dobradas com raio de 12 (a) e 15 mm (b) a 20 °C submetidas ao LP.



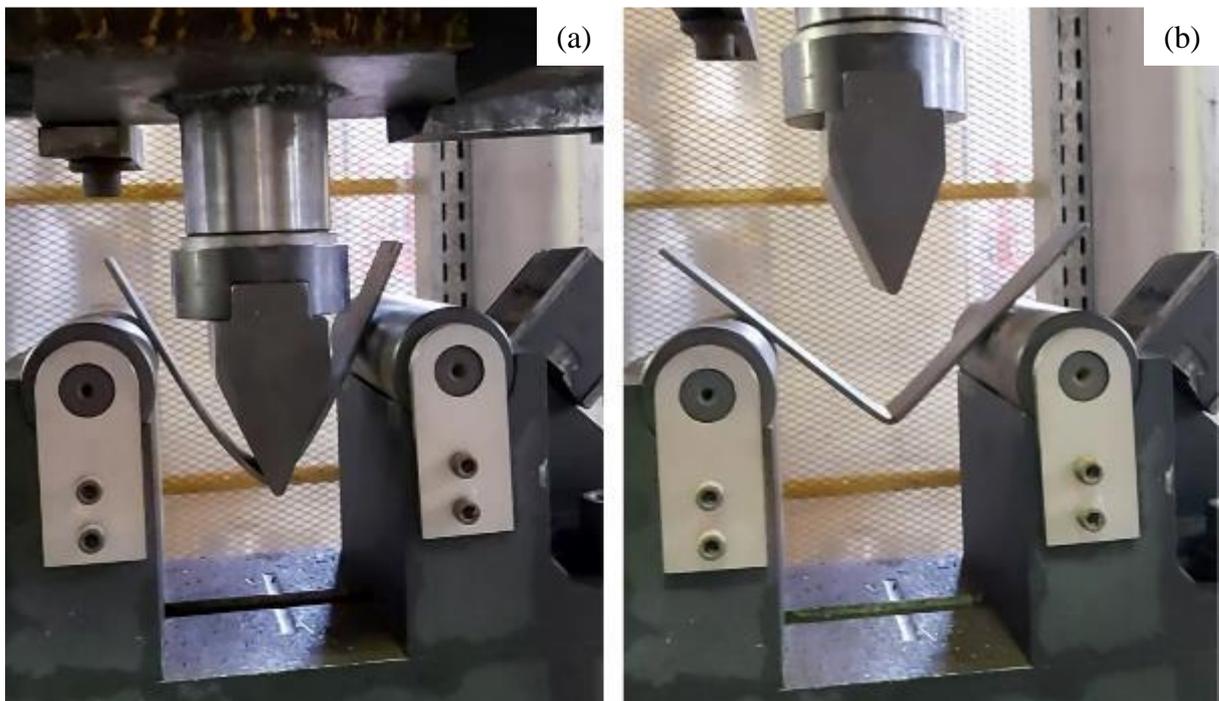
Fonte: O Autor.

4.5 RETORNO ELÁSTICO

O retorno elástico é um processo inerente a conformação dos metais. Com a realização dos ensaios, observou-se que houve um notável retorno elástico do Hardox quando submetido ao processo de dobramento livre de três pontos. Através da Figura 43, nota-se uma representação do ângulo do material no momento máximo de conformação (a) e após a retirada da carga aplicada (b). Ambas ilustrando o processo no equipamento FKL®, realizada a uma temperatura ambiente e com a ferramenta de dobramento com raio de 6 mm.

O ângulo no momento de deformação máxima, pode ser considerado constante para cada raio de punção, perante todos os casos estudados, devido ao fato de ter sido aplicada sempre a mesma configuração de ensaio, como posição dos apoios, deslocamento de conformação, comprimento das amostras, entre outros. É importante salientar que os ângulos se mantem constantes, perante a aplicação de um mesmo raio de ferramenta de dobramento, logo, para cada raio de punção, obtém-se um ângulo de dobramento distinto.

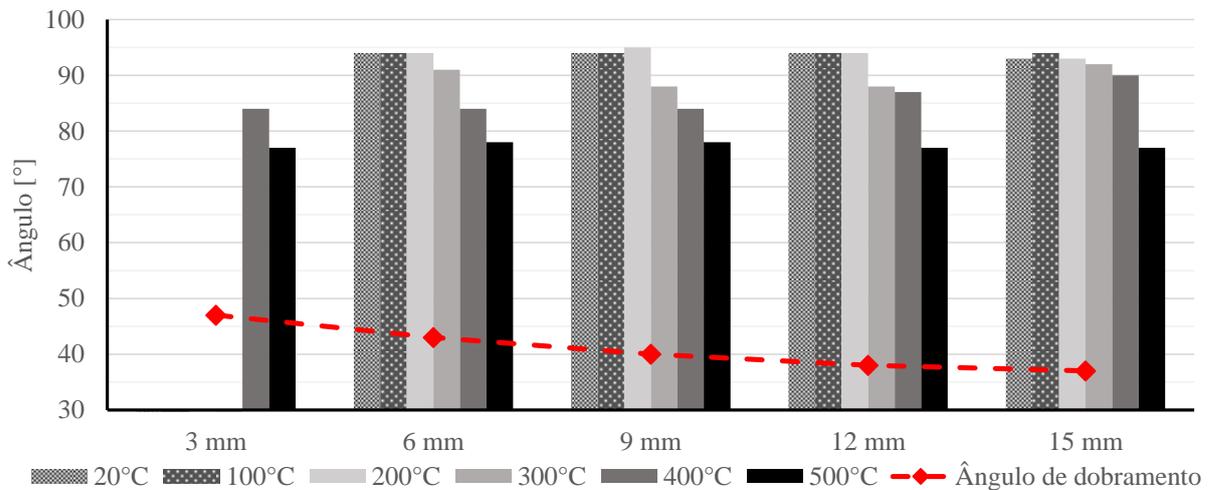
Figura 43 – Dobramento do Hardox no momento de máximo deslocamento do punção (a) e após retirada da carga (b), com punção de 6 mm a temperatura ambiente.



Fonte: O Autor.

No gráfico da Figura 44, observa-se a comparação do ângulo obtido em cada uma das temperaturas, de acordo com o raio. Constata-se que para um mesmo ferramental, em todos os casos, o ângulo final foi sempre menor quanto maior a temperatura. A linha projetada, representa o ângulo obtido no dobramento máximo, quando a ferramenta de conformação atinge seu limite de deslocamento, mostrando a variação entre ângulo no momento da conformação e posterior ao processo. É válido salientar que algumas amostras, com raio de 3 mm, acarretaram em fratura, por este motivo, não possuem valores de ângulo. Com base nos dados mensurados, pode-se afirmar que há uma relação entre a temperatura de conformação e o ângulo final das amostras, onde observa-se que ambos possuem comportamento inversamente proporcional, ainda destaca-se que até a temperatura de 200 °C, os ângulos praticamente mantiveram-se constantes, apresentando-se variações apenas acima de 300°C.

Figura 44 – Ângulo de dobramento para os raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm para as temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C.



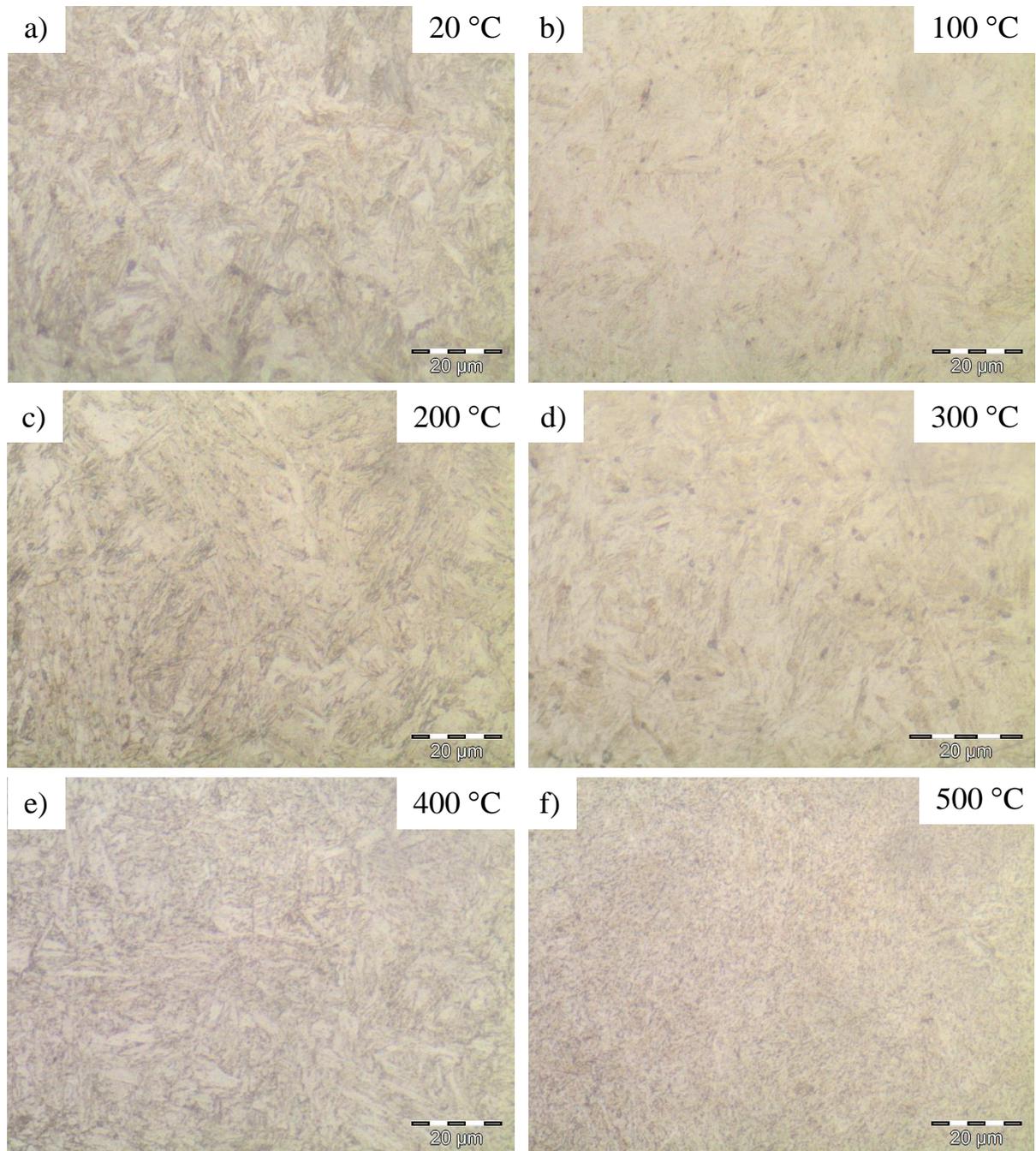
Fonte: O Autor.

4.6 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Conforme foi apresentado neste trabalho, diversas condições foram avaliadas mediante ao dobramento, para a realização do estudo da microestrutura, selecionou-se as amostras conformadas no equipamento FKL® com raio de conformação de 3 mm e 6 mm, sendo uma amostra por cada uma das temperaturas de estudo (20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C), gerando-se assim um total de 12 amostras preparadas e analisadas.

As amostras conformadas com raios de 3 e 6 mm, foram escolhidas para uma avaliação de sua microestrutura devido ao fato de terem apresentado a maior variação no comportamento, passando de uma fratura do corpo de prova, para uma superfície isenta de imperfeições. Na Figura 45, é possível observar a microestrutura das amostras conformadas com raio de 3 mm, com ampliação de 500 vezes, no qual apresentam-se as amostras dobradas com temperatura de 20 (a), 100 (b), 200 (c), 300 (d), 400 (e) e 500°C (f). Nestas metalografias é possível observar que a baixas temperaturas a microestrutura era predominantemente martensítica, característica de aços termicamente tratados, como é o caso do Hardox 500. Enquanto que a amostra conformada com temperatura de 500 °C, já observa-se uma microestrutura distinta, no qual a martensita não foi encontrada na mesma proporção, sendo que também ocorre a presença de uma estrutura composta por ferrita e cementita, com precipitação de carbonetos. Observa-se, que esta variação de microestrutura não foi abrupta, mas sim gradual, de acordo com o acréscimo das temperaturas de conformação, principalmente a 400 e 500 °C.

Figura 45 – Metalografia de amostras conformadas a 20 (a), 100 (b), 200 (c), 300 (d), 400 (e) e 500 °C (f) com raio de 3 mm.

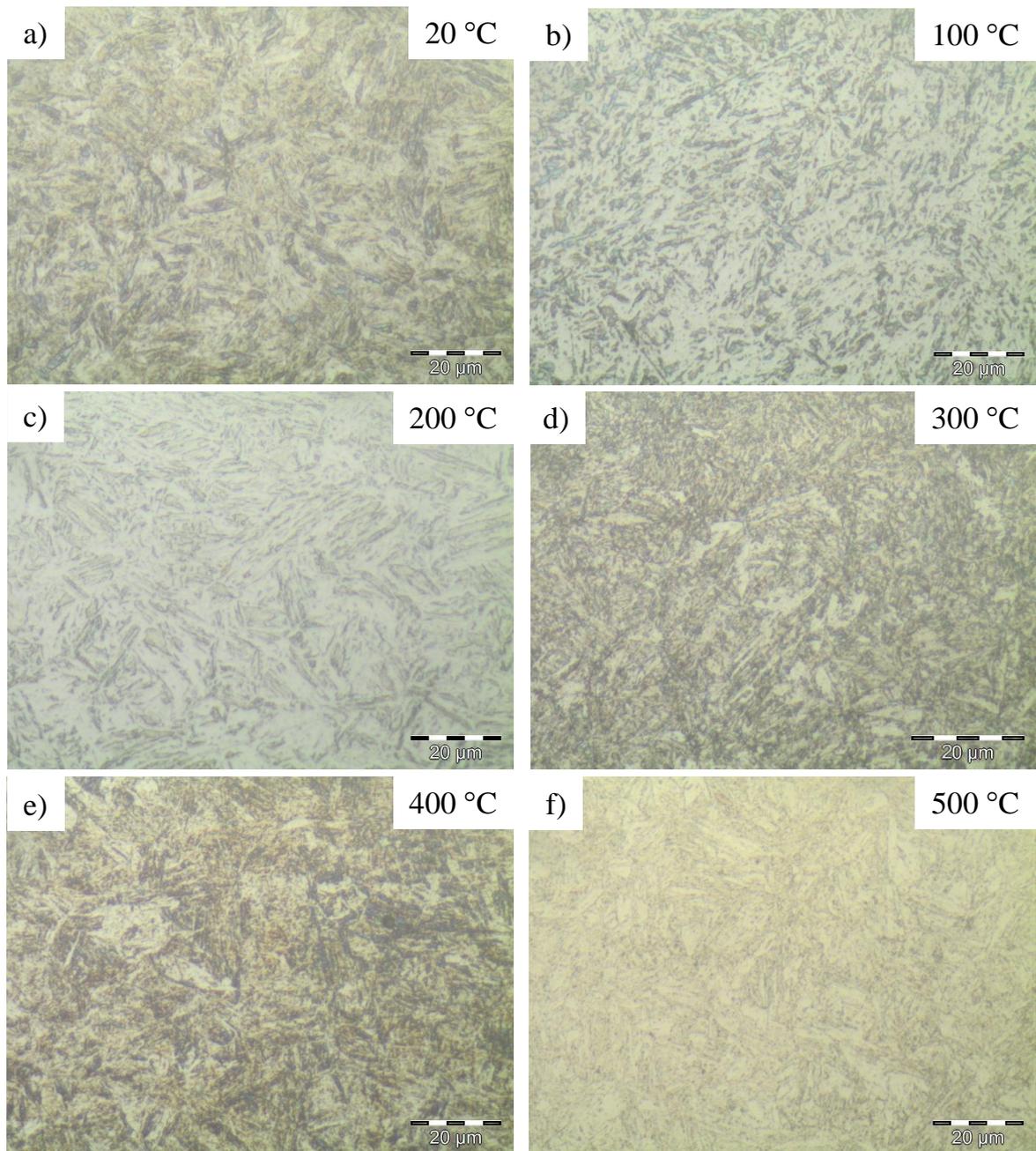


Fonte: O Autor.

Na Figura 46, são observadas as metalografias de amostras conformadas com o raio de 6 mm, na qual vislumbra-se a microestrutura do material conformado a temperaturas de 20 (a), 100 (b), 200 (c), 300 (d), 400 (e) e 500°C (f). Nestas amostras, observa-se uma predominância de martensita, quanto menor a temperatura de conformação, enquanto que na maior temperatura

de dobramento, 500 °C, já ocorre a presença de outras fases, como ferrita, cementita e precipitação de carbonetos, mesmo comportamento encontrado no caso da conformação com raio de 3 mm.

Figura 46 – Metalografia de amostras conformadas a 20 (a), 100 (b), 200 (c), 300 (d), 400 (e) e 500 °C (f) com raio de 6 mm



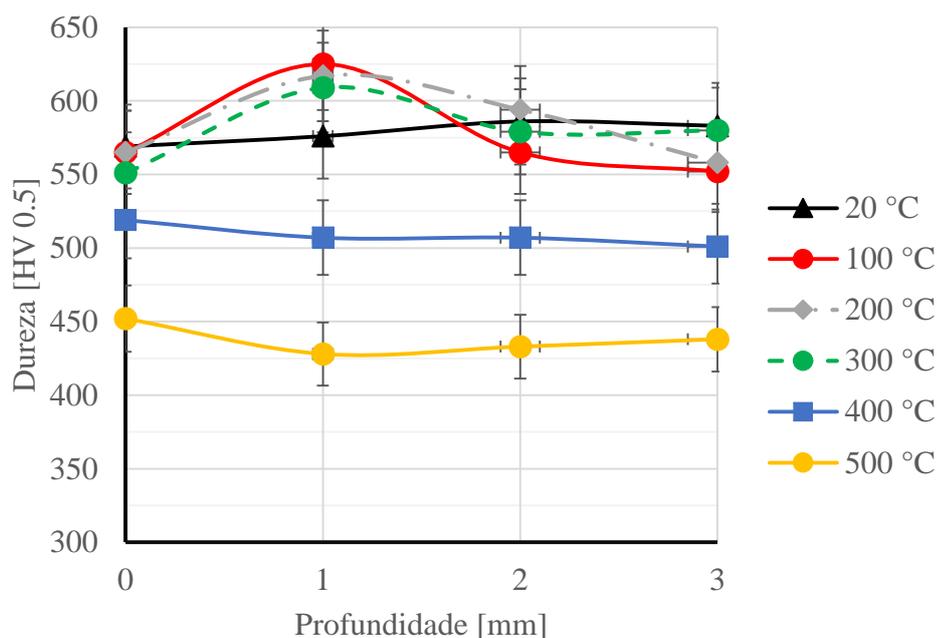
Fonte: O Autor.

4.7 AVALIAÇÃO DE DUREZA

A metodologia de medição de dureza adota foi de acordo com a apresentada no item 3.6 deste trabalho. As amostras conformadas entre 20 e 300 °C, com raio de 3 mm, apresentaram a fratura do corpo de prova, o que impossibilita a realização da medição de dureza exatamente na linha central do dobramento. Logo, as amostras nos quais ocorreram a fratura, a medição foi realizada no ponto mais próximo a linha de ruptura do material.

Através do gráfico da Figura 47, é possível observar os valores obtidos para a dureza em Vickers, para as amostras conformadas com raio de punção de 3 mm. Detectou-se que o comportamento da dureza mensurada, foi inversamente proporcional a temperatura, ou seja, a amostra conformada em temperatura de 500 °C foi a que apresentou a menor dureza entre todas as amostras, sendo seguida pela conformação a 400 °C, enquanto que para a conformação entre 20 e 300°C, a temperatura apresenta uma influência consideravelmente inferior sobre esta grandeza. Já com relação a espessura da amostra, onde o valor zero no gráfico representa a superfície externa do raio de dobramento, verifica-se que houve uma flutuação dos valores obtidos, com tendência de valores inferiores próximos a face interna do dobramento.

Figura 47 – Medições de dureza ao longo da espessura da amostra no dobramento com raio de 3 mm a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500°C.

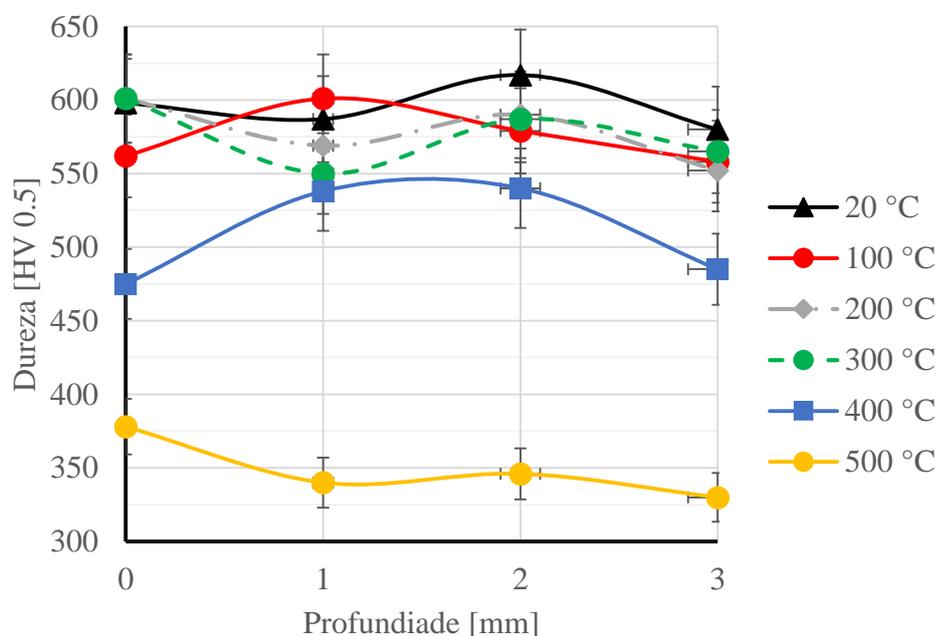


Fonte: O Autor.

Avaliando-se sobre o raio de conformação de 6 mm, obtém-se o gráfico da Figura 48. Neste caso também é possível observar que ocorre uma variação dos valores de dureza obtidos, de acordo com a temperatura de conformação, sendo que de forma geral, quanto maior a temperatura, menores foram os valores de dureza obtidos. Já com relação a distribuição do comportamento da dureza ao longo da espessura, na conformação com raio de 6 mm, ocorreu uma flutuação dos valores mensurados levemente superior ao encontrado na conformação com raio de 3 mm, onde destaca-se que para a conformação com temperatura de 400 °C, as medições com 1 e 2 mm da superfície apresentam valores mais elevados, sofrendo assim uma menor influência da temperatura.

Na Tabela 6, é apresentado um resumo dos valores médios obtidos para a dureza na conformação com punção de 3 e 6 mm, onde observa-se uma real aproximação entre os valores mensurados com conformação entre 20 e 300 °C, enquanto que as amostras conformadas com temperaturas de 400 e 500 °C descolam-se, com abrupta queda nestes valores.

Figura 48 – Medições de dureza ao longo da espessura da amostra no dobramento com raio de 6 mm a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C.



Fonte: O Autor.

Tabela 6 – Dureza média obtida para conformação com 3 e 6 mm nas temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C.

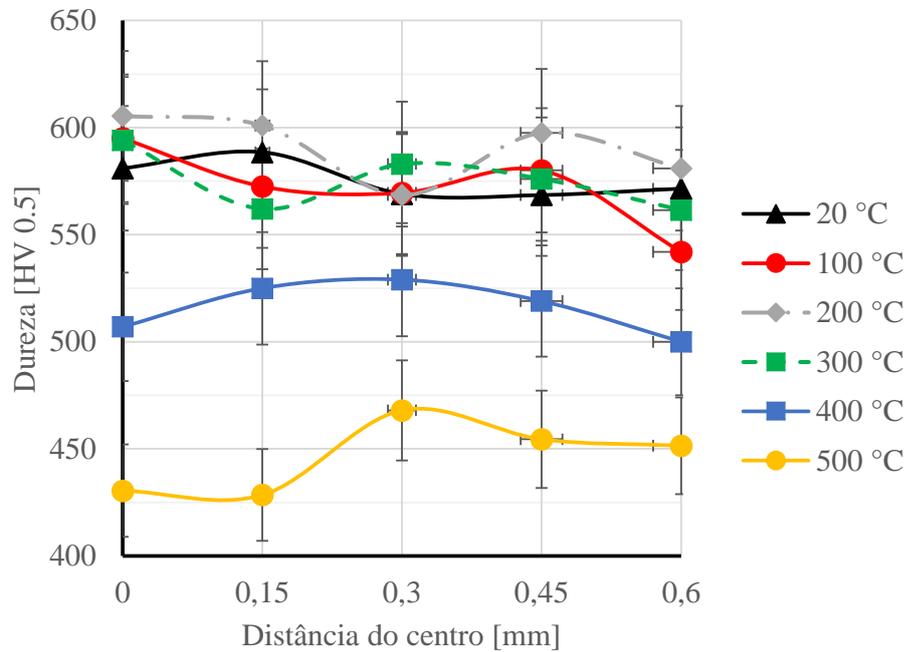
Temperatura	Raio [mm]	Dureza [HV]	Raio [mm]	Dureza [HV]
20 °C	3	579	6	596
100 °C	3	577	6	575
200 °C	3	584	6	578
300 °C	3	580	6	576
400 °C	3	509	6	510
500 °C	3	438	6	349

Fonte: O Autor.

Há ainda uma segunda metodologia de avaliação dos valores da dureza que é em relação ao afastamento da linha central de dobramento. Neste sentido de avaliação, cada corpo de prova obteve duas camadas de medição de dureza cada uma a 1 mm das superfícies da amostra, no gráfico da Figura 49, estes dados são apresentados de forma resumida para a conformação com o raio de 3 mm, onde são indicados os valores médios obtidos de acordo com o distanciamento das medições com relação a linha de centro da conformação. Constata-se que as amostras conformadas a maiores temperaturas mantem a sua tendência de apresentarem menores valores de dureza. Quanto ao comportamento da distribuição de dureza, é possível verificar que a mesma tende a apresentar valores inferiores quanto mais distante se avalia da linha de centro da conformação, porém esta variação é relativamente baixa, com amplitude média de 23 HV, apenas quando na avaliação do corpo de prova conformado a 500 °C que esta tendência não foi mantida, porém ainda, neste caso a variação foi de 21 HV.

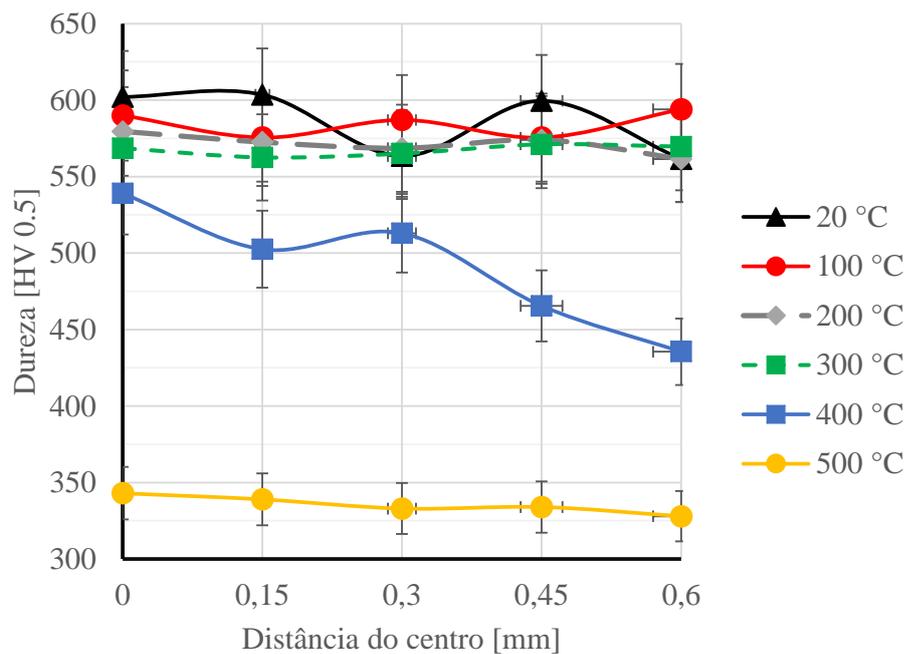
Já no gráfico da Figura 50, a dureza pode ser avaliada para o caso de conformação com raio de 6 mm. Para estas amostras, é possível identificar que ocorre uma pequena variação nos valores obtidos nas amostras conformadas entre 20 e 300 °C, com proximidade entre estes valores, também não apresentando considerável variação destas medições ao afastar-se do centro de conformação. A amostra conformada em temperatura de 400 °C foi a única que apresentou uma considerável variação nos seus valores, na linha de centro da conformação esta amostra apresenta uma dureza média de 539 HV, enquanto que a 600 μ m esse valor decaiu para 436 HV, um contraste de 104 HV.

Figura 49 – Dureza média obtida no sentido longitudinal das amostras conformadas com raio de 3 mm a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C.



Fonte: O Autor.

Figura 50 – Dureza média obtida no sentido longitudinal das amostras conformadas com raio de 6 mm a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C.



Fonte: O Autor.

5. DISCUSSÃO

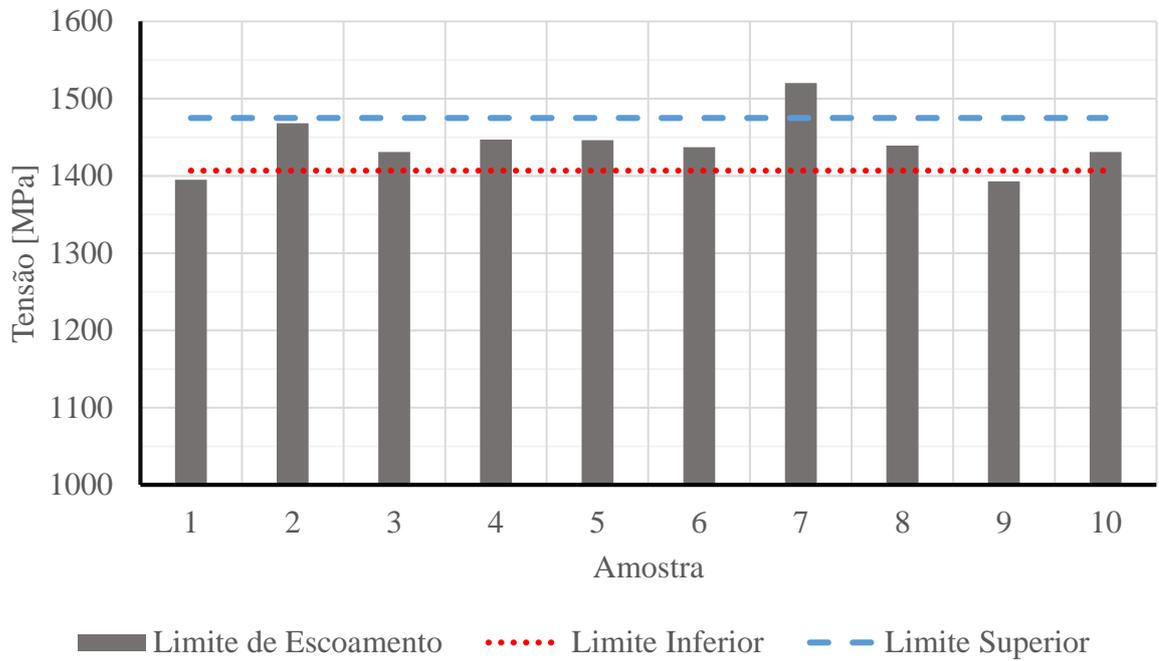
Os dados obtidos e apresentados no capítulo anterior, serão neste, comparados e debatidos com base nos resultados encontrados na bibliografia existente até o presente momento. Serão apresentados contrapontos bem como convergências com outros estudos já determinados pela comunidade científica e acadêmica.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os resultados do ensaio de tração apresentaram visivelmente uma flutuação em seus dados, porém para a avaliação é válida a ponderação sobre estes valores com o desvio padrão. O gráfico da Figura 51 representa os dados obtidos para o limite de escoamento no sentido paralelo a laminação, onde o valor médio encontrado foi de 1441 MPa, com um desvio padrão de 34 MPa, o limite superior apresentado trata-se da média acrescida de um desvio padrão, enquanto que o limite inferior é a média subtraída de um desvio padrão. Desta forma, observa-se que a amostra sete foi a única que apresentou valor superior a um desvio padrão, sendo este de 1520 MPa, logo 45 MPa acima de um desvio padrão, enquanto que as amostras um e nove foram as únicas abaixo do limite inferior, com respectivamente 1395 MPa e 1393 MPa, logo, ficando 14 MPa abaixo do limite inferior no pior cenário. Sendo assim observa-se que apesar da variação dos valores obtidos, grande parte fica a menos de um desvio padrão da média, apresentando convergência de valores.

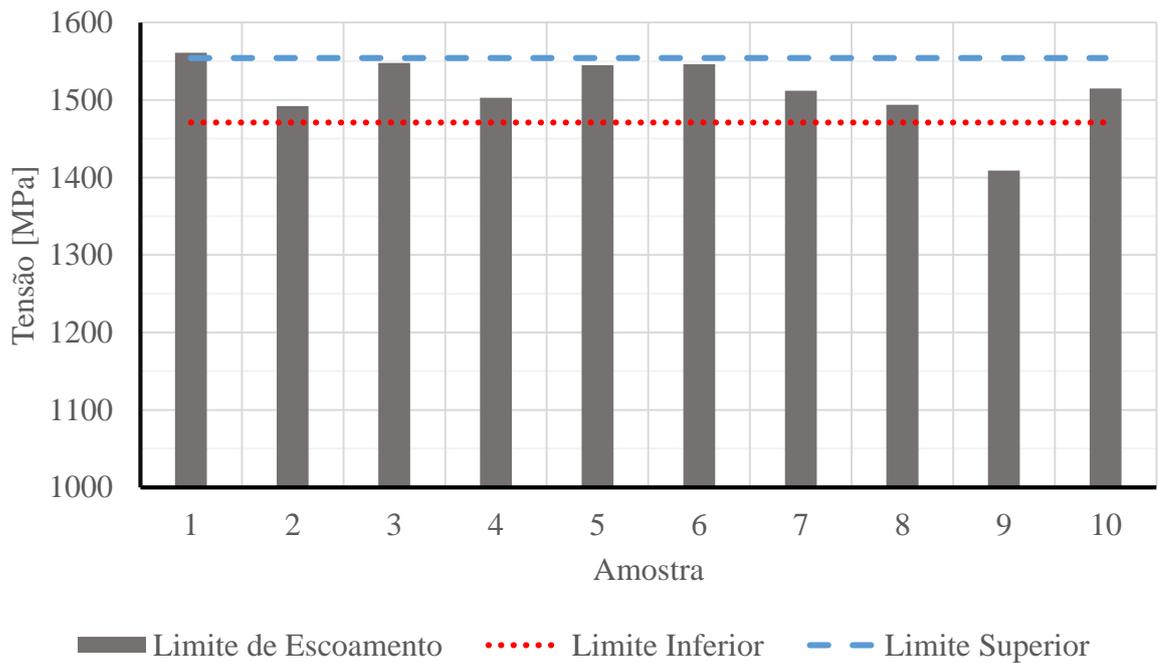
Já o gráfico da Figura 52, apresenta as mesmas avaliações para os ensaios realizados perpendiculares ao sentido de laminação. Neste caso, a média obtida foi de 1513 MPa, enquanto que o desvio padrão determinado foi de 42 MPa, entre as amostras apenas a de número um apresentou valor superior a um desvio padrão, sendo de 1561 MPa, logo, 7 MPa acima deste critério. Por outro lado, a amostra de número nove é a única que apresentou valor inferior a um desvio padrão, com limite de escoamento de 1409 MPa, resultando em 62 MPa abaixo. Observa-se também para este sentido de laminação que os valores em uma grande maioria ficaram próximos a média, ficando em poucas amostras fora de um desvio para mais ou para menos.

Figura 51 – Limite de escoamento e desvio padrão obtidos no ensaio de tração em amostras paralelas a laminação.



Fonte: O Autor.

Figura 52 – Limite de escoamento e desvio padrão obtidos no ensaio de tração em amostras perpendiculares a laminação.



Fonte: O Autor.

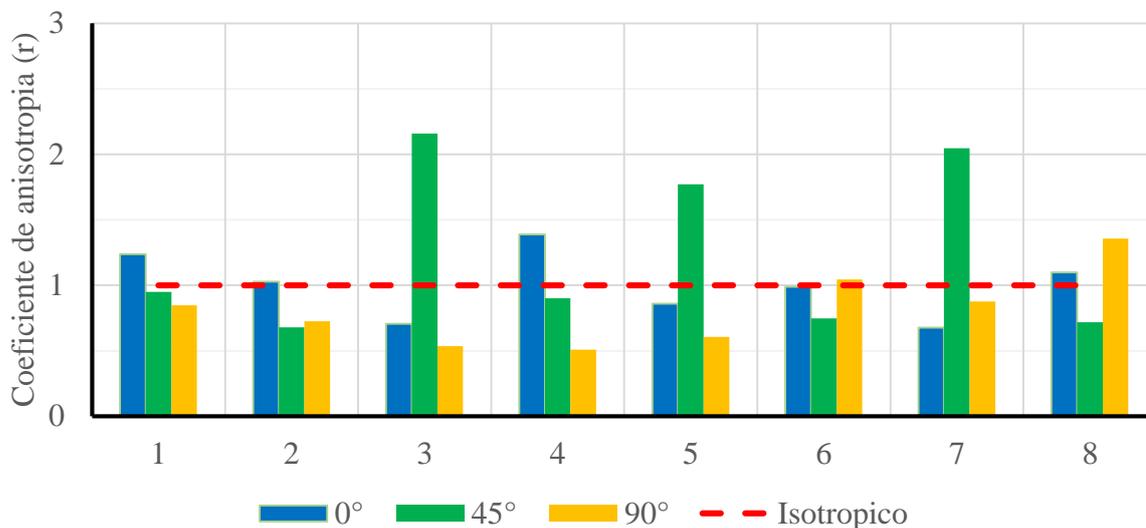
Sendo assim, é possível afirmar que o Hardox 500 apresentou um maior limite ao escoamento no sentido perpendicular a laminação, com 72 MPa superior ao sentido paralelo. Todavia, mesmo que apresentem um valor distinto, ambos são muito próximos, e indicam que no caso de aplicação do material, quanto a resistência a tração, não devem haver grandes variações em seu comportamento, é importante destacar ainda que o limite de escoamento nominal apresentada pela SSAB é de 1400 MPa.

Quanto as amostras obtidas paralelamente ao sentido de laminação, a média da resistência máxima à tração no ensaio foi de 1505 MPa enquanto que o limite de escoamento para a mesma condição foi de 1441 MPa. Já para as amostras perpendiculares a média da resistência máxima à tração foi de 1588 MPa, e 1513 MPa para o limite de escoamento.

Para o estudo de anisotropia, quanto mais o índice se aproxima de 1, mais isotrópico o material tende a ser, logo para o Hardox ele tende a se aproximar de isotrópico com relativamente baixa variação do comportamento conforme o sentido de laminação, e deve sofrer pequenas alterações de sua espessura quando submetido a processos de conformação de chapas metálicas, tais como dobramento e estampagem, mantendo assim uma boa proporcionalidade geométrica.

No gráfico da Figura 53, são apresentados de forma comparativa os valores dos índices de anisotropia obtidos com os ensaios para cada uma das amostras, no qual o valor de anisotropia igual a 1 é destacado como uma linha tracejada, o que indicaria um material idealmente isotrópico, enquanto os valores do índice de anisotropia de cada caso estão ilustrados pelas barras. É possível perceber que uma maior parte dos valores do índice ficaram levemente abaixo da linha de material idealmente isotrópico, porém com destaque para alguns picos e vales, os índices obtidos para as amostras a 90° apresentaram em média os menores valores, chegando a atingir o menor valor de 0,509, enquanto que os índices mais altos foram obtidos para as amostras a 45° , como pode ser observado nos corpos de prova três, cinco e sete, que apresentaram os maiores picos, atingindo valores de até 2,158. Apesar do índice médio de anisotropia encontrado ter sido de 1,07, com base nos dados apresentados no gráfico da Figura 53, encontra-se uma alta amplitude dos valores obtidos, não indicando uma necessária convergência dos valores.

Figura 53 – Dados de anisotropia obtidos para amostras a 0, 45 e 90° com o eixo de laminação.



Fonte: O Autor.

Lembra-se que como apresentado no capítulo anterior, referente aos resultados obtidos, os índices de anisotropia médios para cada sentido de laminação ficaram de 0,998 para a avaliação paralela, 1,247 para 45° e 0,813 no sentido perpendicular, resultando em um índice de anisotropia médio de 1,07, o que denota relativamente um bom comportamento deste material para a conformação, sem consideráveis variações em sua proporção geométrica, principalmente com relação a espessura. O índice de anisotropia planar obtido foi de -0,341, indicando que na aplicação do Hardox em processos de estampagem, o mesmo tende a apresentar a formação de “orelhas” a 45 e 135° com relação ao eixo de laminação. Os valores obtidos pelo ensaio de tração e pelo ensaio de anisotropia podem ser comparados para uma melhor compreensão do comportamento do Hardox para os processos de conformação.

No ensaio de tração assim como na anisotropia, o Hardox mostra que não possui elevada diferença em seu comportamento, seja qual for o sentido de laminação de emprego do material. No caso da tração, como apresentado, a resistência do material tende a ser muito similar, com uma variação relativamente baixa perto da resistência do material, comportamento este que se reflete também na anisotropia, quando na observação dos valores médios, uma vez que os resultados para avaliações a 0° e 90° apresentaram valores de 0,998 e 0,813 respectivamente. No sentido mais próximo da isotropia o limite de escoamento apresentou o valor mais baixo, como pode ser observado na Tabela 7.

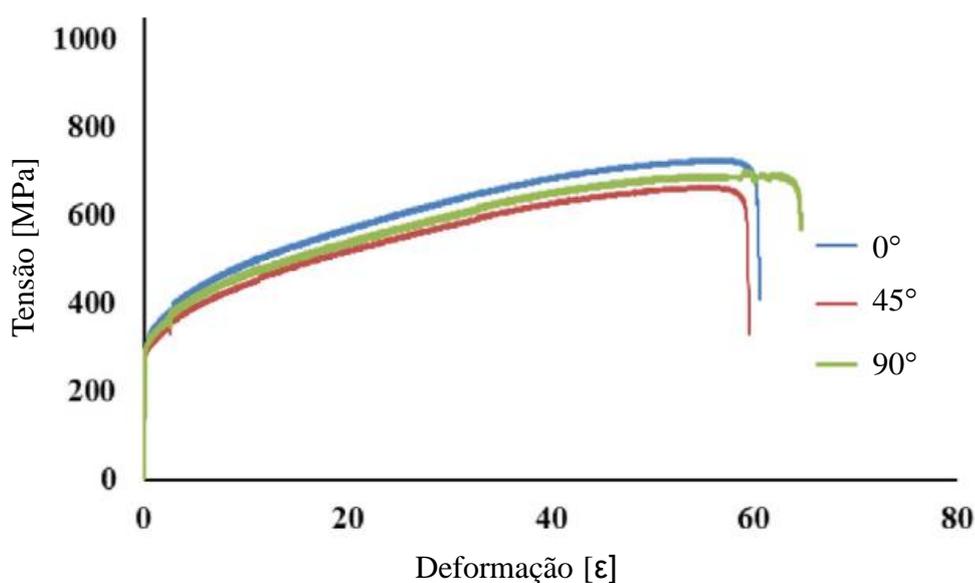
Tabela 7 – Comparação entre anisotropia e limite de escoamento do Hardox 500

	Índice de anisotropia	Limite de escoamento [MPa]
Paralelo	0,99	1441
Perpendicular	0,81	1513

Fonte: O Autor.

A avaliação do comportamento em chapas metálicas da anisotropia e do limite de escoamento são recorrentes nas mais distintas avaliações e sobre diversos materiais, como é o caso do estudo de Kori et al, 2020, onde os autores realizaram a avaliação do ensaio de tração em 3 distintas orientações com relação ao sentido de laminação, mesmos sentidos estes que foram aplicados nos ensaios de anisotropia, neste caso para o estudo de aço inoxidável 304. Os autores encontraram também para este material um valor relativamente próximo para a tensão de escoamento a 0° e 90° , sendo estes de respectivamente 314 e 300 MPa, apenas 14 MPa de diferença com a variação do sentido de laminação. Os autores ao contrario deste trabalho encontraram um índice de anisotropia maior no sentido que apresentou um maior limite de escoamento, o que neste estudo, foi encontrado de forma inversa. O gráfico da Figura 54 representam os valores do limite de escoamento encontrado pelos autores para o aço inoxidável 304 para os sentidos a 0° , 45° e 90° .

Figura 54 – Limite de escoamento Inox 304 a 0° , 45° e 90° com a laminação



Fonte: Adaptado de Kori et al, 2020.

Park et al, 2020, utilizou o estudo da anisotropia para prever a fratura do DP980 por meio de interpolação Lagrangiana, obtendo bons resultados para a previsão da fratura deste material sobre distintas condições de carregamento, tais como cisalhamento, tensão uniaxial entre outros. No estudo destes autores, também foi fundamental a avaliação conjunta de anisotropia e da resistência a tração, para caracterização deste material quando submetido a esforços inerentes a conformação de chapas metálicas. Os dados obtidos para o DP980 convergem com os obtidos neste trabalho, onde como pode ser observado na Tabela 8, a 45° com relação ao sentido de laminação, o índice de anisotropia apresenta um valor mais elevado, sendo de 1,126 para o DP980 e de 1,247 para o Hardox, já com relação ao limite de escoamento, no sentido no qual obteve-se o menor índice de anisotropia, foi o que apresentou maior limite de escoamento, sendo que para o Hardox foram de respectivamente 0,813 e 1513 MPa, enquanto que para o DP980 respectivamente de 0,84 e 704 MPa.

Tabela 8 – Comparação entre anisotropia e o limite de escoamento do Hardox e DP980

	Anisotropia		Limite de escoamento [MPa]	
	Hardox 500	DP980	Hardox 500	DP980
0°	0,998	0,84	1441	704
45°	1,247	1,126	-	690
90°	0,813	0,963	1513	697

Fonte: Adaptado de Park et al, 2020.

Índices de anisotropia mais elevados no sentido a 45° com a laminação, do que avaliações paralelas e perpendiculares são também encontrados para o JSH590R no estudo de Wu et al, 2020, já para o DP980 e AA5182-O este mesmo comportamento é encontrado nas avaliações de Abedini et al 2020, confirmando também os valores de Park et al, 2020 para o DP980. Porém Abedini et al 2020, encontraram para o DP1180 e AA6063-T6 um comportamento distinto, onde o maior índice de anisotropia apresenta-se a 90° com o sentido de laminação.

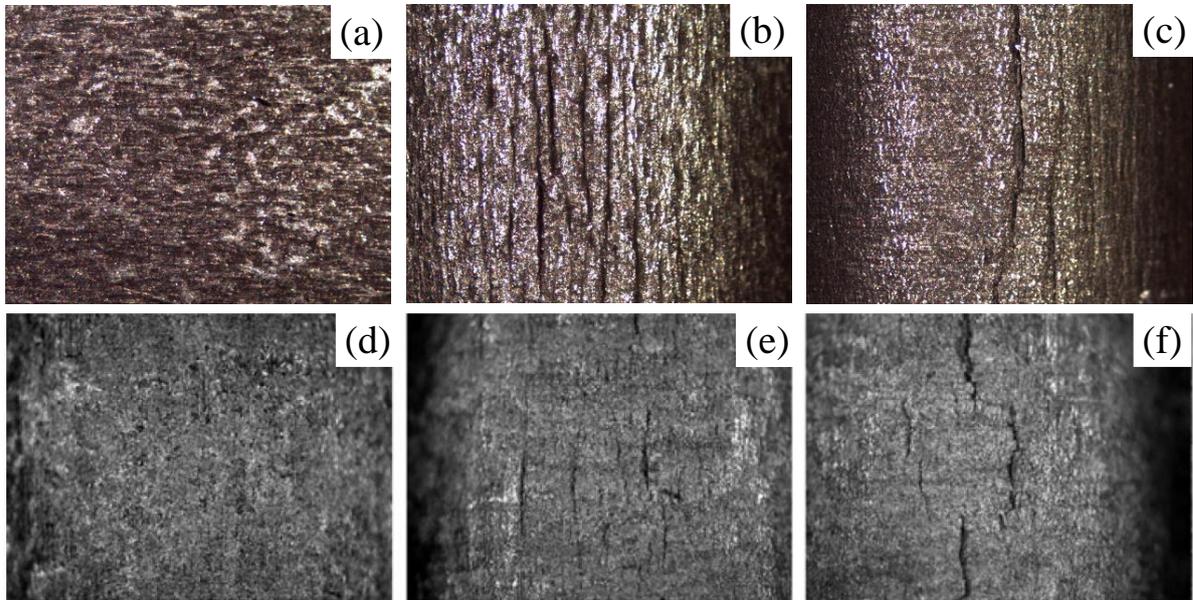
5.2 COMPORTAMENTO DA FRATURA

Observa-se que o Hardox apresentou durante a conformação, um comportamento esperado quando se atinge o limite de conformabilidade do material. Onde inicialmente com um raio de conformação de 12 e 15 mm as amostras apresentaram plena integridade, sem qualquer indicio de imperfeição ou falha. Com aplicação de um raio de 9 mm, iniciou-se a formação das primeiras nucleações, presentes de forma isolada, mas já indicando o início de uma condição limite de conformação do material. No raio de 6 mm iniciou-se a propagação de trincas superficiais, já com maior profundidade que no caso da aplicação anterior. Com o emprego do raio de 3 mm, ocorreu a ruptura das amostras, destacando definitivamente como inviável para conformação do Hardox, no qual detectou-se um alto índice de rupturas da região conformada.

Em seus estudos, Tekkaya et al, 2012, descreveram este mesmo comportamento de falha para aços martensíticos, porem os autores variaram o ângulo de dobramento, enquanto que neste trabalho foram alterados os raios de ferramental. Na figura 55, é apresentado uma comparação entre a evolução das superfícies até a fratura deste trabalho com o de Tekkaya et al, as imagens da linha superior são referentes a este projeto, enquanto que as imagens inferiores, são dos autores citados. Observa-se entre (a) e (d), que as superfícies estão com bom acabamento superficial, o que detectou-se neste trabalho com os raios de 12 e 15 mm. Nas imagens (b) e (e), detecta-se o início de formação de nucleações, como no dobramento com raio de 9 mm. Enquanto que nas imagens (c) e (f), as primeiras trincas foram detectadas, o que ocorreu nas amostras conformadas com o punção de 6 mm, enquanto que a fratura detectada ocorreu posteriormente com o punção de 3 mm. Logo, o comportamento da formação das falhas detectadas, neste estudo com o Hardox se assemelham muito com o encontrado pelos autores.

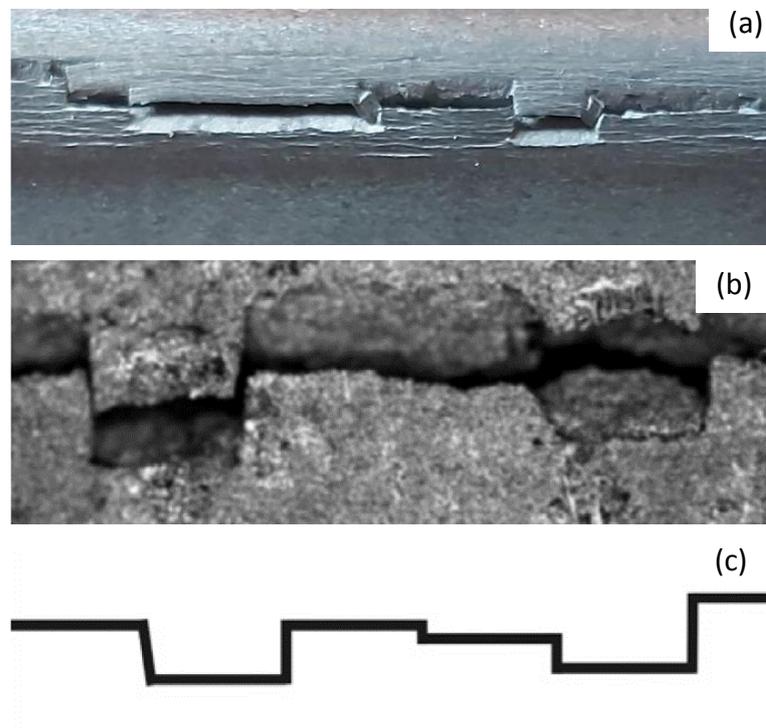
O comportamento de alternância da linha de fratura também é muito similar entre os autores Tekkaya et al, e esta dissertação. Observa-se que em ambos os casos a fratura não é completamente linear, mas sim com variações na sua propagação, como pode ser comparado pela Figura 56, a fratura obtida neste estudo (a), dos autores (b) e a representação das linhas de fratura (c). Este comportamento descrito, é recorrente na conformação de chapas de aço com baixa ductilidade na fratura, o que é característico para materiais martensíticos, pois estes apresentam estrutura de elevada dureza, com baixa deformação plástica, anterior a ruptura.

Figura 55 – Comparação da superfície de dobramento neste projeto com punção de 12 (a), 9 (b) e 6 mm (c) com Tekkaya et al, com ângulo de 90° (d), 100° (e) e 110° (f).



Fonte: Adaptado Tekkaya, 2012.

Figura 56 – Comparação da fratura obtida no Hardox (a), Tekkaya et al (b), e tipificação (c)

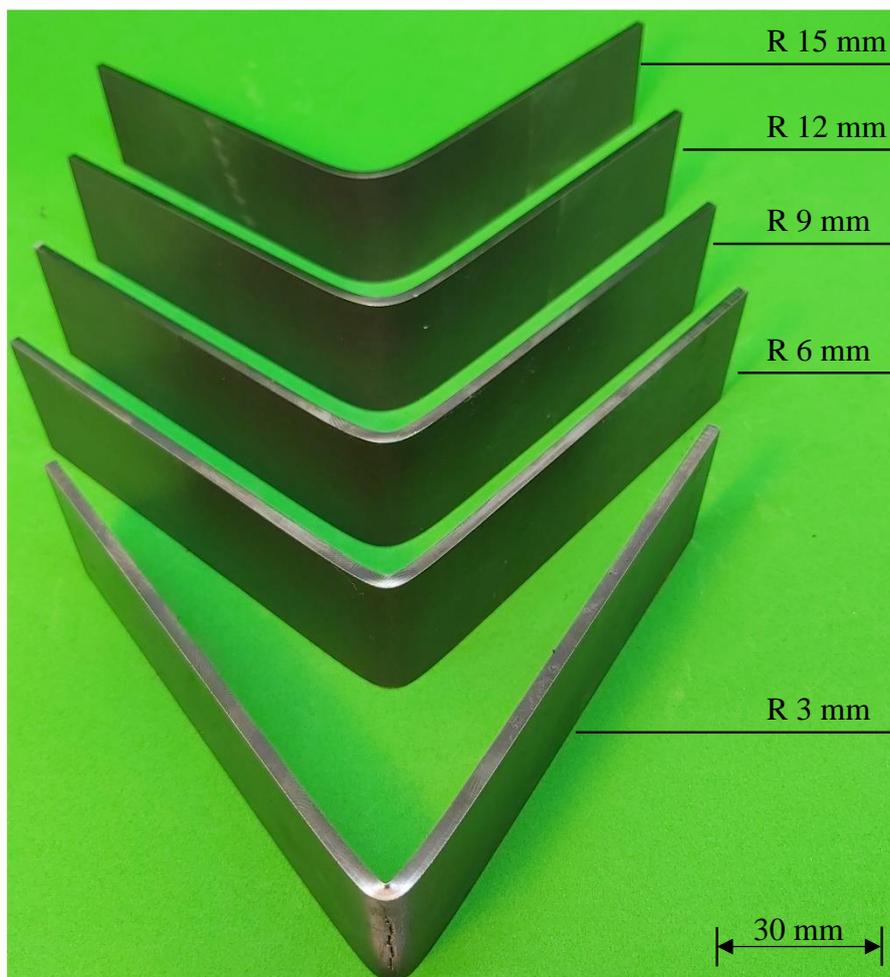


Fonte: Adaptado de Soyarsla, Gharbi, e Tekkaya, 2012.

5.3 VARIAÇÃO DOS RAIOS

O raio da ferramenta influencia consideravelmente na conformação de chapas, assim como foi detectado neste presente estudo. Na Figura 57, são apresentadas amostras conformadas com todos os raios considerados para este estudo, a uma mesma temperatura de 20 °C. Com o raio de punção de 3 mm, ocorreu a fratura de todas as amostras ensaiadas, com o punção de 6 mm, nenhuma apresentou ruptura, porém todas foram afetadas por trincas. Já para o raio de 9 mm, foram detectadas algumas nucleações pontuais, enquanto que para os raios de 12 e de 15 mm, nenhum destes defeitos foram encontrados.

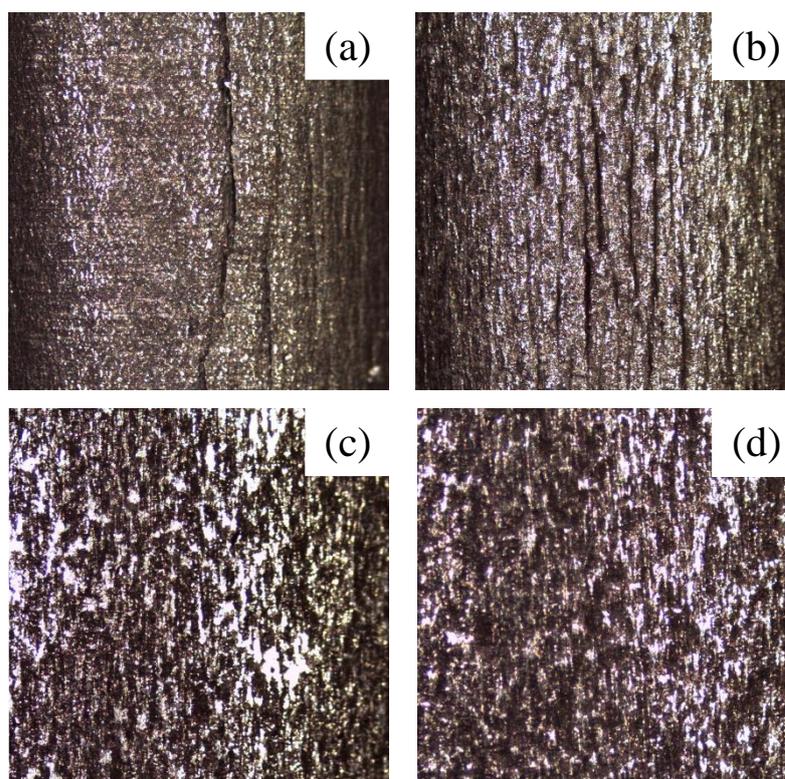
Figura 57 – Amostras dobradas a 20°C com aplicação dos punções com raios de 3, 6, 9, 12 e 15 mm



Fonte: O Autor.

O comportamento do Hardox mediante ao dobramento é ainda ampliado na Figura 58, observa-se por meio de macrografia com aumento de 12,5X que a superfície das amostras altera-se consideravelmente, com o surgimento de trincas na amostra de 6 mm (a), nucleações com 9 mm (b), e uma superfície lisa para os raios de 12 mm (c) e 15 mm (d)

Figura 58 – Comparação macrográfica do dobramento com punção de raio 6 mm (a), 9 mm (b), 12 mm (c) e 15 mm (d).



Fonte: O Autor.

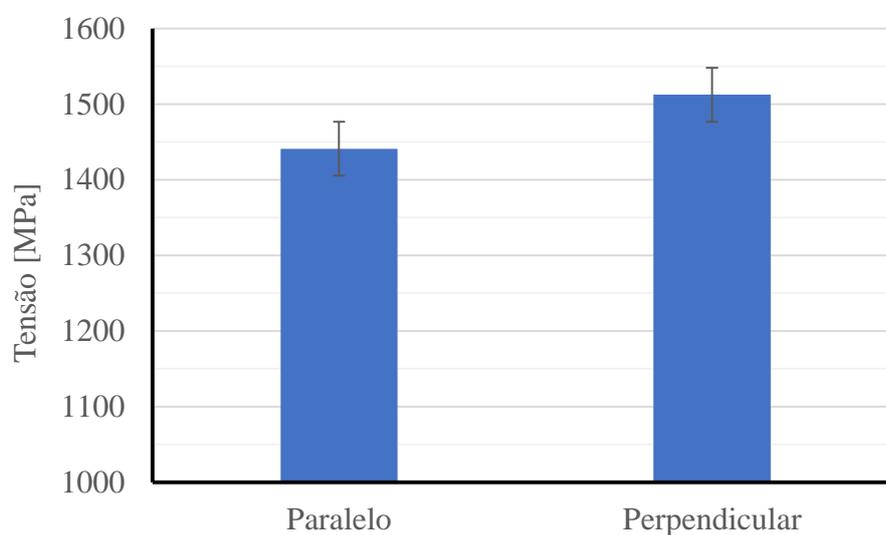
Zhao et al, 2017, em seus estudos sobre a fratura em corpos de prova por dobramento, obtém uma conclusão de que o raio de conformação influencia no comportamento e fratura do material, onde segundo os autores, a partir de determinados valores, os raios não influenciam significativamente no material, enquanto que raios menores apresentam valores diversos. O que neste estudo ocorre para os raios inferiores a 12 mm, com o surgimento de trincas e nucleações, atingindo-se a fratura, já para raios superiores, nenhuma alteração no material foi detectada.

A avaliação do sentido de laminação também foi levantado dentro deste estudo, onde foram realizados ensaios de tração, anisotropia e de dobramento, orientados em sentidos diferentes, tanto paralelos como perpendiculares ao eixo de laminação. Quanto ao sentido de

laminação no ensaio de tração, foi detectada uma diferença de 72 MPa no limite de escoamento. Na anisotropia, os valores dos índices convergiram para resultados próximos a 1, enquanto que no dobramento, não foram detectadas variações no comportamento do Hardox, de acordo com esta orientação, ou seja, o eixo de laminação, teve pouca influência na conformação deste material.

No gráfico da Figura 59, observa-se que considerando a margem de desvio padrão, os valores máximos e mínimos do limite de escoamento são aproximados. Todavia a pesquisa de Kaijalainen et al, 2018, apresenta que mesmo que os valores no ensaio de tração sejam similares, não descrevem plenamente seu comportamento mediante ao dobramento, sendo necessário um conjunto de avaliações. Os autores estudaram a conformação de chapas de aço STRIP, o qual apresentou apenas 7 MPa de diferença entre o limite de escoamento no sentido paralelo, com relação ao eixo perpendicular ao de laminação, enquanto que o comportamento do material no processo de dobramento, apresentou grande divergência.

Figura 59 – Limites médios de escoamento obtidos no ensaio de tração para amostras paralelas e perpendiculares a laminação

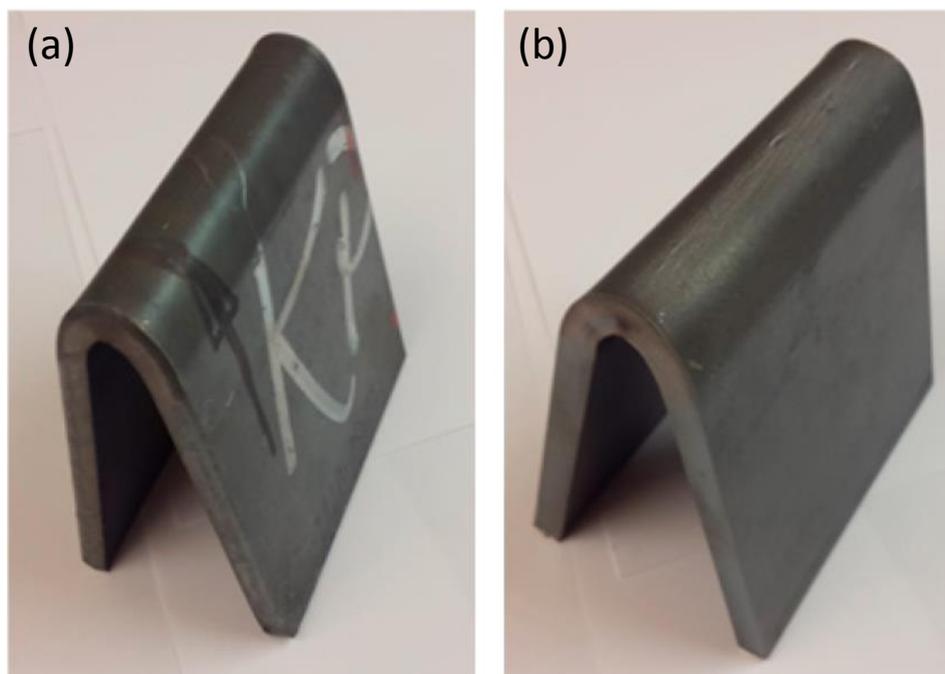


Fonte: O Autor.

Kaijalainen et al, 2018, detectaram que para um mesmo material, alterando o sentido de laminação o raio mínimo para a conformação alterou-se consideravelmente. Na Figura 60, são apresentados dois corpos de prova conformados sob o mesmo raio, porém com comportamento divergentes quando dobrados no sentido transversal (a) e longitudinal (b) ao sentido de

laminação. Segundo os autores para cada sentido de laminação os raios mínimos para dobramento são de 21 e 18 mm, sendo assim, para os autores é de suma importância a realização de ensaios que realizem a caracterização do material submetido os processos de conformação, porém os ensaios de dobramento são fundamentais, podendo assim apresentar valores levemente distintos do esperado. Observando-se o comportamento detectado pelos autores, apesar do emprego de um mesmo raio, o sentido de laminação influenciou consideravelmente no comportamento da amostra, sendo que transversalmente ao sentido de laminação as amostras não apresentaram falhas, enquanto que perpendicularmente diversas trincas foram detectadas.

Figura 60 – Amostras de aço STRIP dobradas transversalmente (a) e longitudinalmente (b) ao eixo de laminação.



Fonte: Kaijalainen et al, 2018.

Logo detecta-se que em ambos os estudos, a variação dos raios de conformação apresentam variação no comportamento do material até determinado ponto. Porém, a divergência detectada entre as autorias é a relação do sentido de conformação com o de laminação, onde pode acarretar em diferentes condições finais dos corpos de prova, podendo interferir diretamente no raio ideal de dobramento.

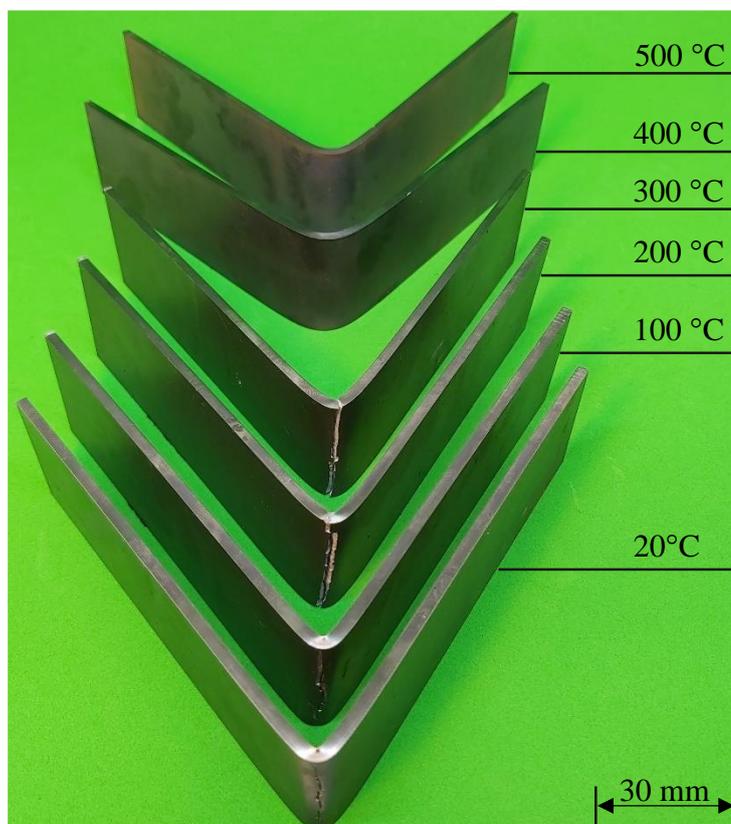
5.4 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

A aplicação de variação térmica em componentes conformados é amplamente empregado para os mais diversos focos de estudos, podendo ser citado o trabalho de Merklein et al, 2016, onde assim como nesta dissertação, o uso de aquecimento foi utilizado com o objetivo de reduzir o índice de imperfeições e otimizar a conformabilidade de aços de elevado nível de propriedades, melhorando a sua respectiva conformabilidade. Ainda segundo Merklein et al, 2016, a aplicação de temperaturas mais elevadas para a conformação, levou a um maior escoamento do material, ou seja, quanto maior a temperatura, maior pode ser a deformação aplicada, sem falhas do componente.

Com a conformação do Hardox neste estudo, a aplicação da variação da temperatura apresentou considerável divergência nos resultados. Observa-se por meio da comparação ilustrada pela Figura 61, o quanto a variável temperatura influenciou na conformabilidade do material. Com a aplicação da temperatura ambiente de 20 °C, e aquecimento a cada 100 °C, até o atingimento da temperatura de 300 °C, todas as amostras apresentaram fratura na região de dobramento com raio de 3 mm, denotando assim uma condição de inviabilidade de aplicação desta condição de processo. Porém ao atingir as temperaturas de 400 e de 500 °C, o comportamento do Hardox alterou-se abruptamente, ao invés da até então presente fratura, o material se comportou adequadamente ao processo, ou seja, não foram detectadas quaisquer falhas, fratura, nucleações, bandas, nenhuma das deformações encontradas em outras circunstâncias, mesmo mediante a aplicação da maior velocidade empregada neste estudo e com o menor raio de conformação.

Logo, a nível de avaliação da superfície e da integridade do material conformado, as temperaturas de aquecimento das amostras apresentaram uma linha limitante nítida, no qual o Hardox apenas apresentou uma variação significativa a um aquecimento relativamente elevado, sendo acima de 400 °C. Temperaturas de baixo aquecimento até 300°C, não mostraram uma considerável alteração no comportamento do material, quando conformado com raios de 3 e de 6 mm.

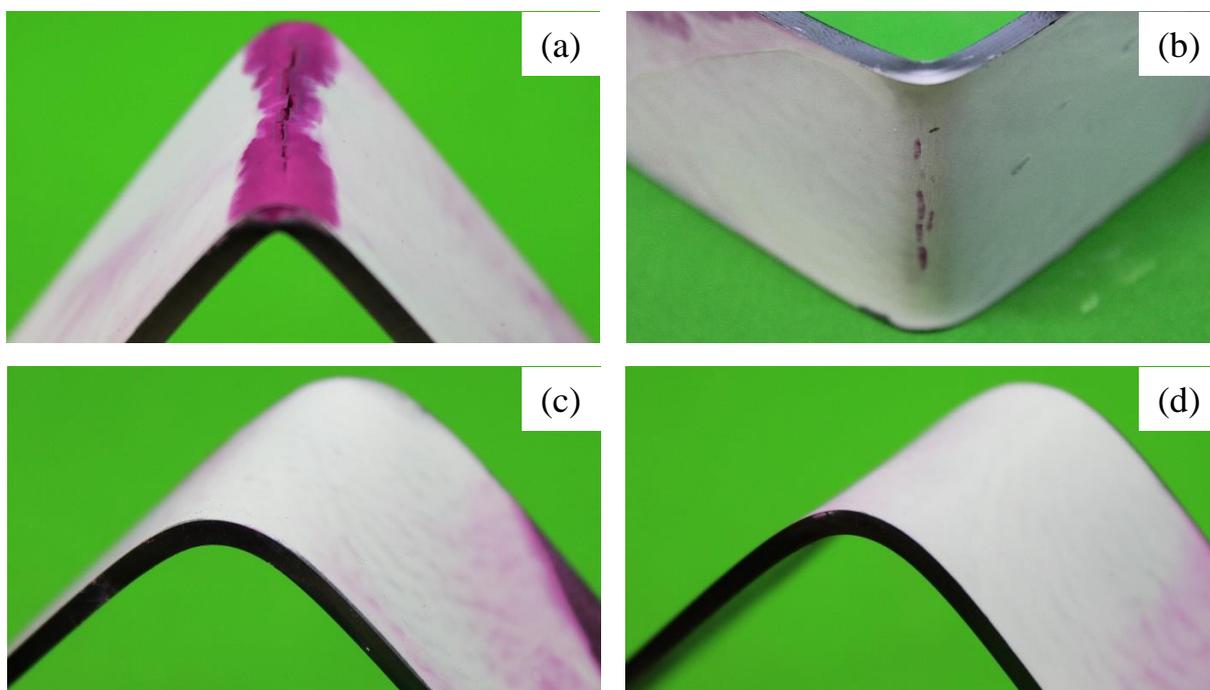
Figura 61 – Amostras conformadas a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C com punção de raio 3 mm.



Fonte: O Autor.

Outra importante comparação dessa mudança no comportamento do Hardox mediante a variação de temperatura, são os resultados obtidos pelo ensaio do líquido penetrante. As Figuras 39 e 40, apresentaram a comparação entre os resultados obtidos para o dobramento a 20 °C e 400 °C, para os raios de 3 e 6 mm, resultado este resumido na Figura 62. Observa-se que no dobramento a temperatura de 20°C com raio de 3 mm (a) e 6 mm (b), detectou-se a fratura e o surgimento de trincas, respectivamente, porém os mesmos raios, quando aplicados a temperatura de 400 °C (c) e (d), respectivamente, não apresentaram imperfeições.

Figura 62 – Comparação de amostras no ensaios de liquido penetrante, conformados com raio de 3 mm, a 20 (a) e 400 °C (b) e 6 mm a 20 °C (c) e 400°C (d)



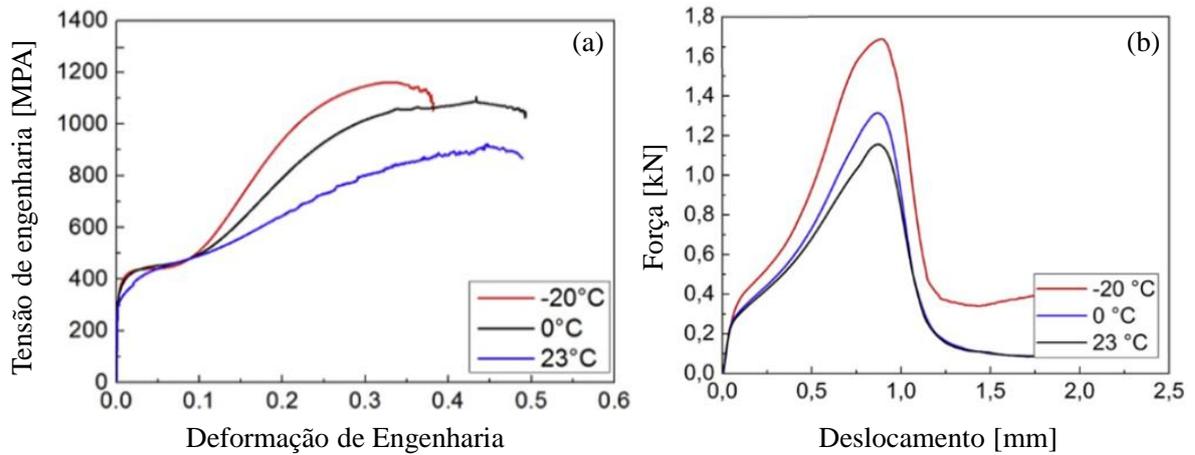
Fonte: O Autor.

No mesmo sentido, He et al, 2019, em seu estudo sobre a influência da temperatura sobre o dobramento, destaca por meio dos gráficos aqui transpostos na Figura 63, que as tensões de engenharia (a) e a força requerida para a conformação (b), foram consideravelmente alteradas devido a variação da temperatura, onde com o incremento, tanto as tensões como as forças necessárias foram reduzidas, melhorando assim, de certa forma, a conformabilidade do material. Observa-se que os resultados dos autores convergem, ou pelo menos pressupõe o mesmo comportamento obtido neste estudo, indicando que temperaturas alteram consideravelmente o comportamento mecânico do material, alterando assim a conformabilidade dos aços, facilitando a sua conformação e reduzindo o número de fraturas e falhas superficiais.

No mesmo sentido, os autores Vorkov et al, 2020, avaliaram a conformação do Strenx 700 e do Strenx 1300, ambos materiais da SSAB assim como o Hardox, porém tratam-se de aços com foco em resistência estrutural, diferentemente do empregado neste estudo, que possui aplicação em solicitações de desgaste. Os autores realizaram a conformação destes materiais com raio de punção de 10 mm, com chapas de 6 mm de espessura, realizando o aquecimento das amostras. Como pode ser observado na Figura 64, os autores detectaram uma redução na

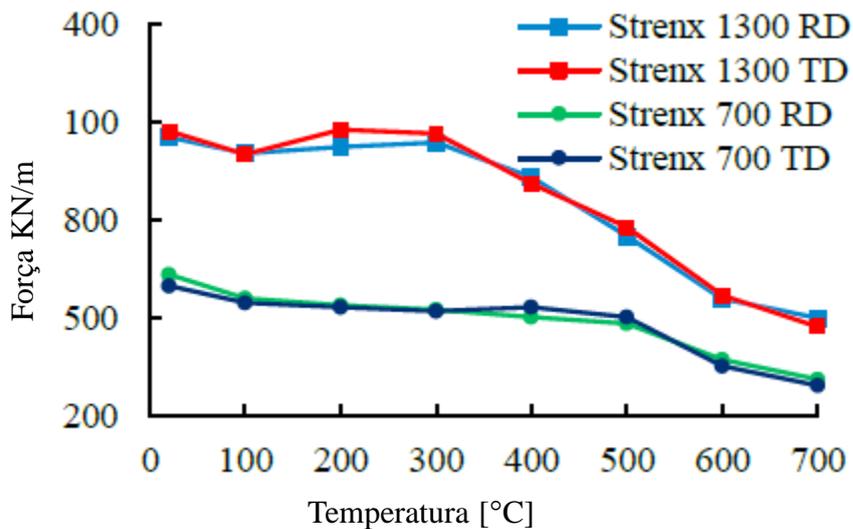
força necessária para a realização da conformação destas matérias, tanto quanto maior a temperatura de conformação, onde tanto para o sentido paralelo a laminação (RD, na sigla em inglês) quanto perpendicular (TD, na sigla em inglês), os valores detectados são relativamente parecidos, sem grande discrepância.

Figura 63 – Tensão de engenharia (a) e força requerida (b) para dobramento de aço AISI 301 a -20, 0 e 23 °C.



Fonte: Adaptado de He et al, 2019.

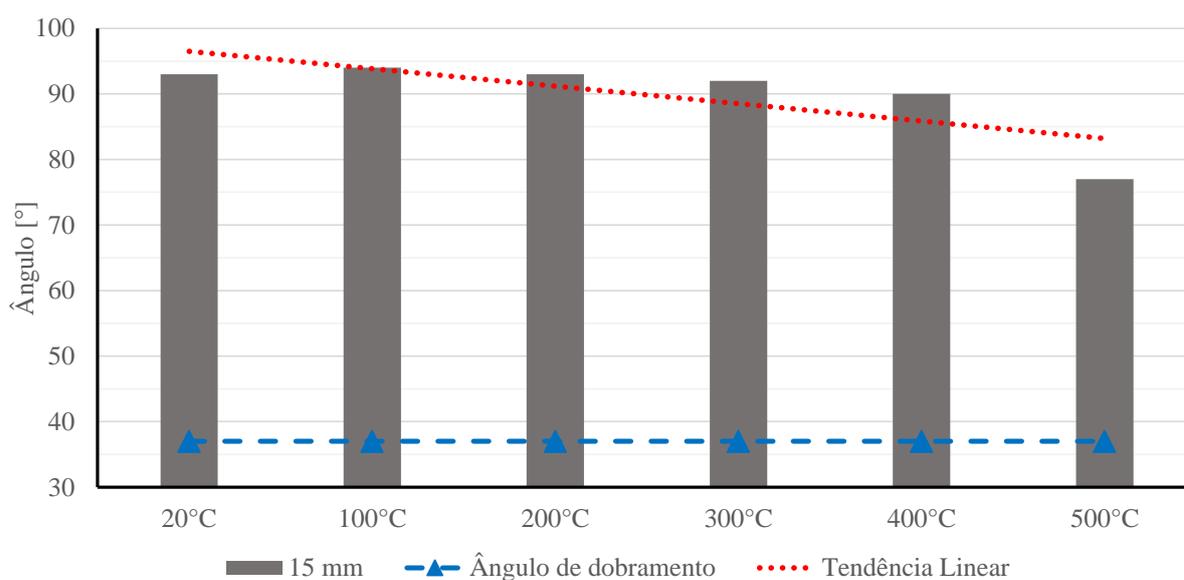
Figura 64 – Comparação da força de dobramento para o Strenx 700 e 1300 para diferentes temperaturas e eixos de laminação.



Fonte: Adaptado de Vorkov et al, 2020.

O aquecimento das amostras, nos ensaios de dobramento, indicaram também uma variação do ângulo resultante do dobramento, como apresentado, identificou-se que as amostras conformadas com maior temperatura, tiveram um retorno elástico menor, após cessada a carga de conformação. Tomando-se como exemplo o raio de ferramenta de 15mm, no momento de deslocamento máximo do punção, obteve-se um ângulo de 37°, após o dobramento o ângulo na temperatura de 20 °C foi de 93°, enquanto que a temperatura de 500 °C, o ângulo final foi de 77°. No gráfico da Figura 65, o comportamento destes ângulos é apresentado para o raio de conformação de 15 mm, a adição de uma linha de tendência linear, ilustra que os ângulos finais tendem a convergirem a valores menores, quanto maior a temperatura de conformação.

Figura 65 – Ângulos resultantes do dobramento a temperaturas de 20, 100, 200, 300, 400 e 500 °C com raio de 15 mm

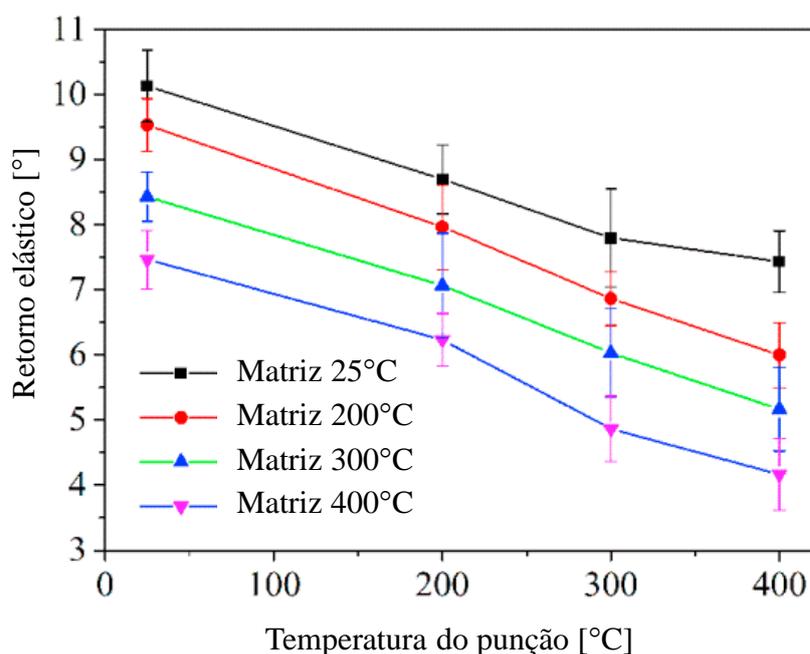


Fonte: O Autor.

A influência direta da temperatura no retorno elástico é abordado em artigos técnicos e científicos, com as mais distintas formas de aplicação e focos de estudo, como por exemplo no estudo de Deng et al, 2017, onde os autores avaliaram a variação da temperatura do punção de dobramento, sobre o retorno elástico de ligas de alumínio. De acordo com os autores, a variação do retorno elástico neste caso ocorre devido à alta taxa de transferência de calor da matriz para o material em conformação, uma vez que o aquecimento neste caso foi sobre a matriz, não

diretamente sobre o material em conformação. Como é apresentado no gráfico da Figura 66, os autores também apresentam valores que convergem com os obtidos neste estudo, onde quanto maior a temperatura de conformação, menor o ângulo final da peça, ou seja, menor o retorno elástico.

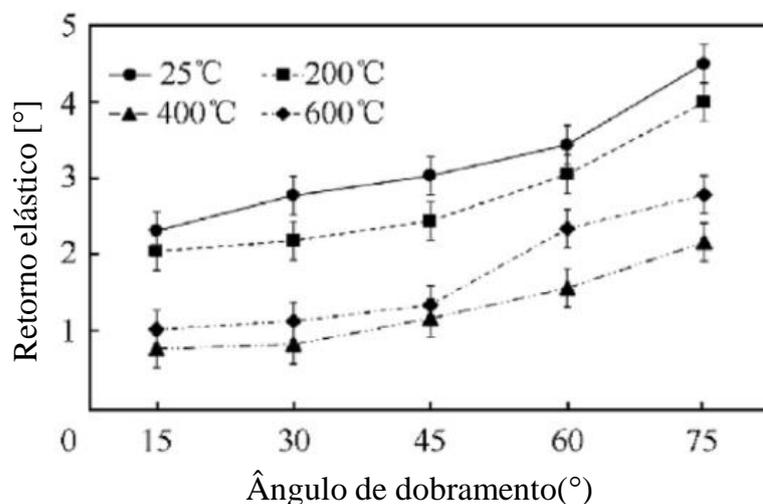
Figura 66 – Influência da temperatura da matriz sobre o retorno elástico em alumínio no dobramento a 25, 200, 300 e 400 °C.



Fonte: Adaptado de Deng et al, 2017.

Ainda no estudo da influência da temperatura sobre o retorno elástico, pode ser apontado o trabalho realizado por Pornputsiri e Kanlayasiri, 2019, onde os mesmos aplicaram temperaturas de 25, 200, 400 e de 600 °C, avaliando a variação do retorno de acordo com estas temperaturas. Observa-se na Figura 67, o resultado obtido pelos autores, que também consolida os dados apresentados e obtidos, onde foi encontrado que a menor temperatura empregada nos ensaios (25 °C) foi a que obteve o maior retorno elástico, enquanto que a maior temperatura aplicada (600 °C) apresentou o menor retorno, mostrando uma influência direta entre a temperatura e o retorno elástico, em que o comportamento é inversamente proporcional, ou seja, detecta-se com a aplicação de uma maior temperatura, um menor retorno elástico do material e vice-versa.

Figura 67 – Efeito da temperatura de dobramento a 25, 200, 400 e 600 °C sobre o retorno elástico em aços TRIP



Fonte: Adaptado de Pornputsiri e Kanlayasiri, 2019.

Ainda referente a avaliação da temperatura sobre a conformação de chapas metálicas Vorkov et al, 2020, nas suas avaliações sobre o Strenx 700 e 1300 apresenta uma avaliação muito similar as realizadas neste estudo. De acordo com os autores o aquecimento das amostras permite um dobramento com menores índices de danos visíveis, como rachaduras e fraturas, o que os mesmos também detectaram para o Strenx 700, sem pré-aquecimento, sendo o dobramento mediante as condições apresentadas, possível apenas acima de 400 °C. Os autores ainda citam que a aplicação de aquecimento expande a janela de processo de dobramento, permitindo o emprego de chapas com menor raio de ferramental, além disso, a temperatura afeta todos os principais parâmetros de dobramento, reduzindo a força necessária bem como o retorno elástico.

No entanto, de acordo com os autores a exposição de chapas metálicas a temperaturas elevadas pode levar a uma redução de suas propriedades mecânicas, o que pode implicar na principal razão do uso de aços de alta performance como a sua resistência mecânica ou dureza, que reduzem devido ao aquecimento sem controle do resfriamento. Devido a sua importância a avaliação do impacto térmico sobre o Hardox é assim apresentado no próximo subcapítulo

5.5 VARIAÇÃO DE PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA

Alterações nas propriedades dos materiais é recorrentemente identificada nos processos de conformação, principalmente quando ocorre a aplicação de processos por meio de aquecimento, como por exemplo, aquecimento do material a ser conformado, do ferramental, ou ainda de ambos. Em diversos estudos há uma combinação entre a aplicação de aquecimento para a conformação, com controle na taxa de resfriamento, como no caso de conformação de aços para a indústria automobilística, diferentemente de como foi avaliado neste estudo.

O objetivo da aplicação térmica na conformação deste estudo, foi de reduzir e até mesmo eliminar as falhas do material, além de possibilitar a conformação com raios de dobramento inferiores. O que provou-se válido, pois se observou que com a aplicação de pré-aquecimento a 400 e 500 °C, o Hardox apresentou boa conformabilidade, sem a presença de fraturas ou ainda de imperfeições.

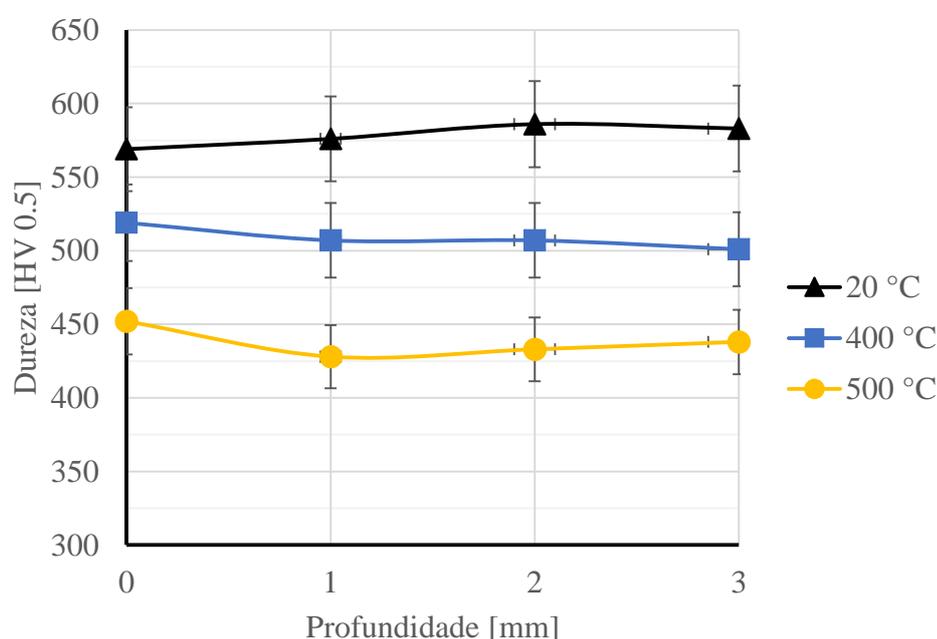
Contudo, o Hardox apresenta como sua principal aplicação o nicho de componentes com elevada resistência ao desgaste, o que pode ser diretamente afetado com a aplicação de pré-aquecimento sem o controle da taxa de resfriamento do material. O controle térmico do processo, para aços que apresentam alta performance é de grande relevância, pois estes materiais conferem as suas altas performances e características as suas microestruturas, além de sua composição química.

Merklein et al, 2016, em seus estudos avalia a conformação a quente de aços com adição de boro, onde os mesmos encontraram uma relação inversa entre a dureza e a temperatura do material. Os autores afirmam que a mínima dureza obtida no material foi quando na aplicação da máxima temperatura, sendo de 234 HV, para 400 °C, enquanto que na conformação a frio a dureza detectada foi de 488 HV, ou seja, a dureza decaiu a menos da metade com a aplicação de aquecimento. No mesmo sentido nos estudos de Abdollahpor et al, 2016, os autores avaliaram distintas condições para conformação de estampagem, sendo que em uma destas condições foi o resfriamento ao ar, que de acordo com os mesmos resultou no surgimento de fases mais “macias” como ferrita e carbonetos, resultando assim em menores índices de dureza do material.

Os dados obtidos por estes autores convergem com os dados obtidos neste presente estudo, tais como uma relação inversamente proporcional entre temperatura e dureza, bem como mudança de fases na microestrutura do material no resfriamento ao ar. Considerando-se inicialmente a relação entre temperatura e dureza, pode-se avaliar os dados apresentados no gráfico da Figura 68, onde compara-se a variação de dureza ao longo da espessura na

conformação com raio de ferramenta de 3 mm, alternando as temperaturas de pré-aquecimento entre 20, 400 e 500 °C, observa-se que ocorre uma considerável redução na dureza do material, onde em temperatura ambiente de 20 °C, a dureza média obtida é de 579 HV, passando para 509 HV para 400 °C e 438 HV para 500 °C, sendo assim uma redução de 70 HV de 20 para 400 °C e de 141 HV entre 20 e 500 °C.

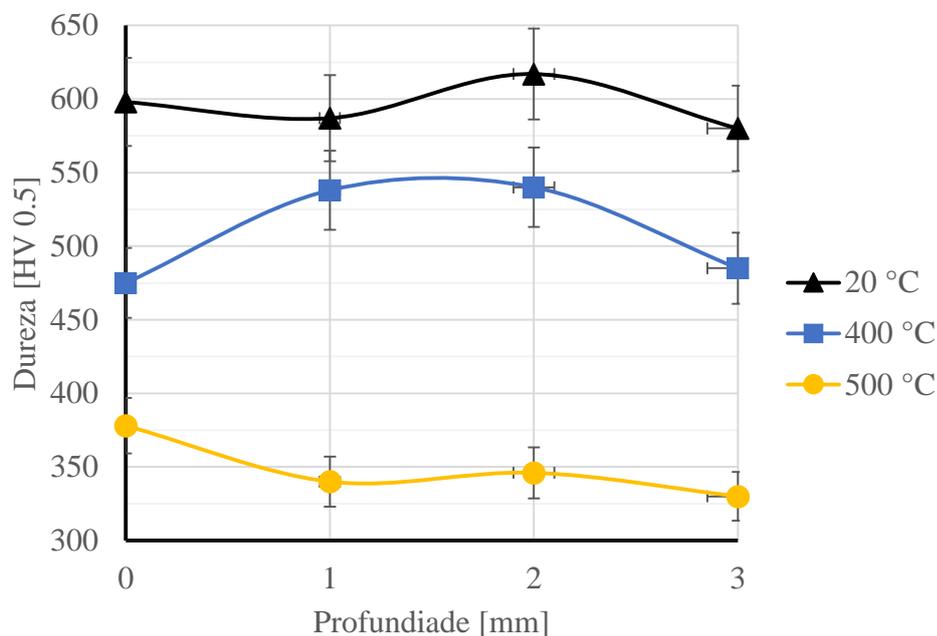
Figura 68 – Dureza mensurada ao longo da espessura em amostras conformadas a temperaturas de 20, 400 e 500°C, com raio 3 mm



Fonte: O Autor.

Esta correlação entre temperatura e dureza, fica também evidente se forem avaliadas a mesmas circunstâncias para o raio de conformação de 6 mm, onde também ocorre esta variação na dureza, sendo que o valor médio obtido para a dureza a temperatura ambiente de 20 °C foi de 596 HV, de 510 HV para 400 °C e por fim de 349 HV para 500 °C, chegando a apresentar uma variação de 247 HV, quando comparados os valores mensurados a 20 e 500 °C, como pode ser avaliado no gráfico da Figura 69.

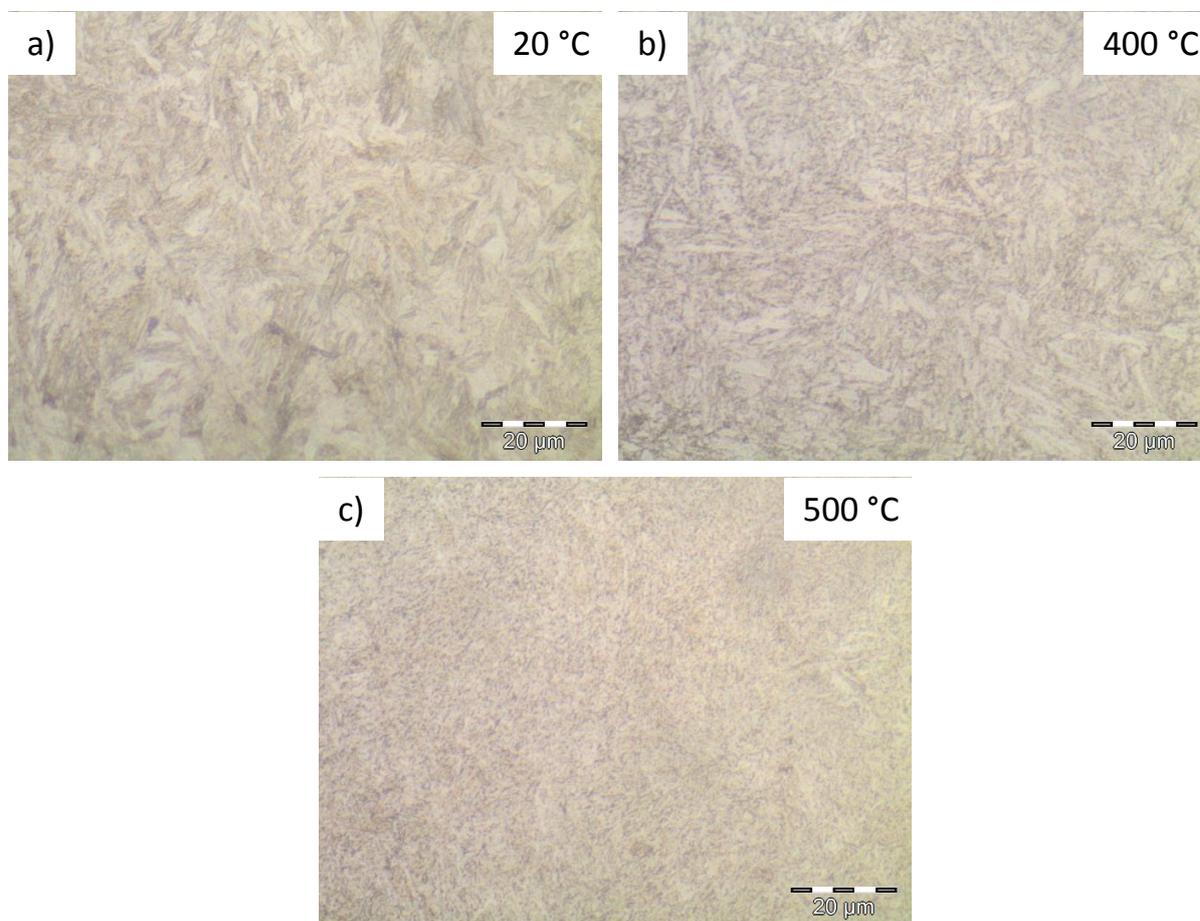
Figura 69 – Dureza mensurada ao longo da espessura em amostras conformadas a temperaturas de 20, 400 e 500°C, raio 6 mm



Fonte: O Autor.

Esta diferença mensurada quantitativamente pode ser também reforçada e de certa forma justificada, quando realizada uma observação sobre as metalografias destas mesmas amostras. Na Figura 70, é apresentada para a condição das conformações com raio de 3 mm, em temperaturas de 20 °C (a), 400 °C (b) e 500 °C (c). Quando sem aquecimento, observa-se uma estrutura predominantemente de martensita, o que é característico de aços temperados, como no caso do Hardox, entretanto, quando avalia-se a microestrutura a 400 °C, esta predominância martensítica já não é a mesma, e menor quando avaliado o material a 500 °C, onde então a presença martensita apresenta-se em menor escala, surgindo uma maior presença de estruturas mais macias como ferrita, cementita e precipitação de carbonetos. Importante destacar que não ocorre uma total transformação na estrutura do material, porém o suficiente para mudar o comportamento do mesmo mediante ao dobramento, bem como a sua dureza, que pode acarretar na sua aplicação posterior, com solicitações de desgaste por abrasão.

Figura 70 – Metalografia realizada na região de dobramento em amostras conformadas a temperaturas de 20 (a), 400 (b) e 500 °C (c), com raio 3 mm



Fonte: O Autor.

Estas avaliações se complementam e mostram que a aplicação de aquecimento a altas temperaturas podem ter sido uma solução para a conformação do Hardox com ferramentas de menor raio, todavia o impacto na microestrutura pode não compensar. Fica claro, que ocorre uma influência direta da alta temperatura, sem resfriamento controlado sobre a microestrutura do material, e conseqüentemente nas propriedades do mesmo, como menor resistência a abrasão. Como citado anteriormente, a aplicação do Hardox ocorre principalmente em peças para desgaste, onde o nível de dureza é um fator crucial, sendo que objetiva-se que este seja alto, no aquecimento a 400 e 500 °C, obtém-se um considerável decaimento na dureza, chegando a ser reduzido em até 50%, como no caso de aquecimento a 500 °C conseqüentemente a vida útil do componente manufaturado e empregado, poderá não atingir o esperado.

Esta mudança na microestrutura do material mediante ao aquecimento também foi identificado nos estudos de Pornputsiri e Kanlayasiri, 2019, onde os autores avaliaram a conformação de TRIP 780, a temperatura ambiente de 25 °C, com aquecimento a 200, 400 e 600 °C. Os autores destacam que houve uma alteração na microestrutura deste material, onde inicialmente possuía-se um estrutura predominante de bainita e austenita retida, com o aquecimento, estas estruturas foram incorporadas a matriz, sendo que a 400 °C, segundo os autores, a microestrutura da amostra de aço TRIP diferia claramente da amostra não aquecida. Ao se atingir a temperatura de 600 °C a fase de austenita retida diminuiu ao mínimo e o carboneto (Fe_3C) foi incorporado na matriz

Logo, os autores detectaram também uma influência da temperatura sobre a microestrutura do material, não acarretando em uma transformação plena, mas considerável, que pode afetar na aplicação do mesmo, sendo importante validar estas transformações, com as propriedades as quais se deseja obter, como no caso do Hardox, a dureza e resistência ao desgaste por abrasão.

6. CONCLUSÕES

Na realização desta dissertação, diversos ensaios e estudos foram realizados com a finalidade de caracterizar o Hardox, bem como seu comportamento quando submetido ao processo de conformação por dobramento, além da resposta do material a cada uma destas variáveis. Desta forma, a seguir é descrita a conclusão sobre cada avaliação envolvida neste trabalho.

Perante o ensaio de anisotropia, pode-se observar uma dispersão nos valores deste coeficiente, porém observa-se que os valores médios mantiveram-se próximos a um, o que indica que o Hardox apresenta baixa variação de suas características de acordo com o eixo de laminação avaliado, mantendo a proporcionalidade geométrica do material, característica que posteriormente foi endossada pelos ensaios de tração e principalmente no dobramento.

Nos ensaios de tração, destacou-se que o Hardox apresentou um limite de escoamento próxima ao indicado pelo fabricante, sendo que em alguns casos, apresentou valores até mesmo mais elevados. Quanto ao sentido de laminação, houve uma pequena variação no limite de escoamento e resistência máxima à tração obtida no ensaio, todavia, esta não foi alta o suficiente para que possa ser considerada uma variação significativa no limite de escoamento de acordo com o sentido de orientação, logo é possível afirmar, que estas propriedades se mantiveram muito próximas, com variação de aproximadamente 72 MPa.

Com relação ao ensaio de dobramento e suas variáveis algumas ponderações são possíveis:

- 1) As amostras conformadas com os raios de 3 e 6 mm, apresentaram bom aspecto de integridade física apenas com pré-aquecimento a temperaturas de 400 e 500 °C. Entretanto avaliações metalográficas e de dureza apontaram, respectivamente, alterações na microestrutura e nas propriedades do Hardox, o que pode comprometer significativamente a sua performance quando submetido a desgaste por abrasão;
- 2) Para a aplicação do punção de 9 mm, temperaturas a partir de 300 °C apresentam-se como melhor solução, sem manifestar qualquer indicio de imperfeições superficiais;

- 3) Os punções de 12 e 15 mm, podem ser aplicados para a conformação do Hardox, com espessura de 3 mm, em todas as condições aplicadas neste estudo;
- 4) A variação das velocidades de deslocamento do ferramental entre 2,5, 5 e 50 mm/s, combinada ao estudo do sentido paralelo e perpendicular ao eixo de laminação não apresentaram quaisquer influência sobre o comportamento do Hardox;
- 5) O Hardox aquecido até a temperatura de 500 °C não apresentou a formação de carepas, entretanto algumas amostras apresentaram uma maior tendência a oxidação superficial;
- 6) Observou-se que houve uma variação no retorno elástico das amostras, de acordo com a temperatura aplicada, onde constatou-se uma influência direta da temperatura sobre o ângulo final das peças dobradas. Constata-se que quanto maior foi a temperatura aplicada na conformação, menor foi este retorno, com maior tendência das amostras a se manterem próximos ao ângulo de dobramento. No dobramento com raio de 15 mm, por exemplo, o ângulo de dobramento foi de 37°, enquanto que o ângulo final da amostra na conformação a temperatura ambiente foi de 93°, alternando para 77° na temperatura de 500 °C.

7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, nota-se a possibilidade de aprofundamento e/ou análise de outras questões pertinentes ao estudo realizado. Desta forma, seguem-se as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- 1) Influência do ângulo de conformação sobre as condições do dobramento;
- 2) Estudo da conformação do Hardox através de simulação numérica;
- 3) Avaliação da influência da espessura do material sobre as condições de conformação;
- 4) Relação entre o método de dobramento e o comportamento do material, dobramento de três pontos, dobramento em matriz fechada, dobramento com lubrificação e sem lubrificação, entre outros;
- 5) Avaliação da relação entre o ângulo de dobramento e a integridade dos componentes;
- 6) Estudo da relação entre raios de punções e temperatura dos corpos de prova com a força requerida para a conformação;
- 7) Avaliação da viabilidade de conformação a quente do Hardox, porém com controle da taxa de resfriamento.

BIBLIOGRAFIA

- Abdollahpor, A., et al., Sensitivity of the final properties of tailored hot stamping components to the process and material parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, p. 125 – 136.
- Abedini, A., et al., Accounting for Shear Anisotropy and Material Frame Rotation on the Constitutive Characterization of Automotive Alloys using Simple Shear. *Mechanics of Materials* 2020.
- Bruschi, S., et al., Testing and modelling of material behavior and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2014, p. 727-749
- Daxin, E., et al., Research on the effect of the derived transverse stress during instability processes in the sheet metal's uniaxial tensile test. *Journal of alloys and Compound*, 2018, p. 418-429.
- Deng, L., et al., Springback and hardness of aluminum alloy sheet part manufactured by warm forming process using non-isothermal dies. *International Conference on the Technology of Plasticity*, Cambridge, United Kingdom, 2017, p. 2388 - 2393
- Garcia, A., Spim, J., Santos, C. *Ensaio dos materiais*. 2ª Edição. Rio de Janeiro, RJ. Editora LTC, 2012.
- Haiko, O., et al., Comparison of impact-abrasive wear characteristics and performance of direct quenched (DQ) and direct quenched and partitioned (DQ&P) steels. *Wear – An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, 2018, p. 21-30
- He, J., et al., Delayed cracking behavior of a meta-stable austenitic stainless steel under bending condition, *Material Science & Engineering A*, Edition 768, 2019.
- Kajjalainen, A., et al., Influence of surface microstructure on the bendability of ultrahigh-strength strip steel, *Material Science & Engineering A*, 2016, p. 151-160
- Kajjalainen, A., et al., Superior bendability of direct-quenched 960 MPa strip steels. *17th International Conference on Metal Forming*, Metal Forming 2018, Toyohashi, Japan.
- Kaupper, M., Merklein, M., Bendability of advanced high strength steels – A new evaluation. *CIRP Annals – Manufacturing technology*, 2013. Volume 51, p. 247–250.
- Komgrit, L., et al., Elimination of springback of high-strength steel sheet by using additional bending with counter punch. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, p. 199-206.
- Kori, Y., et al., Hot deformation characteristics of ASS-304 austenitic stainless steel by tensile tests. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- Leuning, N., et al. On the correlation of crystallographic macro-texture and magnetic magnetization anisotropy in non-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019.
- Li, Q., et al., Study on the plastic anisotropy of advanced high strength steel sheet: Experiments and microstructure-based crystal plasticity modeling. *International Journal of Mechanical Science*, 2020
- Li, X., et al., Comparison of the hot-stamped boron-alloyed steel and the warm-stamped medium-Mn steel on microstructure and mechanical properties. *Materials Science & Engineering A*, 2017, p. 240-248
- Liu, B., Villavicencio, R., Soares, C., Experimental and numerical analysis of residual stresses and strains induced during cold bending of thick steel plates. *Marine Structures*, 2018, p. 121-132.
- Liu, W., et al., Variation of tensile and bending rigidities of a duplex embossed steel sheet by small uniaxial tensile deformation. *Journal of Materials Processing Tech*, 2018, p. 123-139.
- Liu, Y., et al., Ductile fracture of dual phase steel sheets under bending. *International Journal of plasticity*, 2019

- Ma, B., et al., Investigation on forming limit of advanced high strength steels (AHSS) under hot stamping conditions. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, p. 320-327
- Ma, J., Chan, T., Young, B., Design of cold-formed high strength steel tubular beams. *Engineering Structures*, 2017, p. 432-443.
- Merklein, M., et al., Hot Stamping of Boron steel sheets with tailored properties: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, p. 11-24.
- Nakagawa, Y., et al., Springback behavior and quenchability in hot stamping of thick sheets. 17th International Conference on Metal Forming, Metal forming, 2018, Toyohashi, Japan.
- Park, N., et al., A new approach for fracture prediction considering general anisotropy of metal sheets. *International Journal of Plasticity*, 2020, p. 199-225
- Pornputsiri, N., Kannachai, K., Effect of bending temperatures on the microstructure and springback of a TRIP steel sheet, *Defence Technology*, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.11.018>
- Shuhui, L., et al., Anisotropic fracture of advanced high strength steel sheets: Experiment and theory. *International Journal of Plasticity*, 2018, p. 95-118
- Sofuoğlu, M., et al., Springback Behavior of AA6082T6 Tubes in Three-point Bending Operation. *Procedia Engineering*, 2017, p. 658-664.
- Tekkaya A., Soyarslan, C., Gharbi M., A combined experimental investigation of ductile fracture in bending of a class of ferritic-martensitic steel. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, p. 1608-1626
- SSAB, Hardox 500 – Datasheet, 2018. Disponível em: <https://www.ssab.com.br/products/brands/hardox/products/hardox-500>. Acessado em 19/08/2018
- Suppan, C., et al. On the microstructure control of the bendability of advanced high strength steels, *Material science & Engineering A*, Edition 735, 2018, p.89-98.
- Uthaisangsuk, V., et al., A microstructure based modelling of high strength steel sheet under stretch bending. *Journal of Physics*, 2018, Series 1063.
- Venkatsurya, P., et al., Understanding mechanical property anisotropy in high strength niobium-microalloyed line pipe steels. *Materials Science & Engineering A*, 2012, p. 194-210
- Vorkov, et al., Bending Parameters in Heat Assisted Air Bending of High Strength Steels. 23rd International Conference on Material Forming (ESAFORM 2020), 2020, p. 1314-1318
- Vorkov, V., et al, Accurate prediction of large radius air bending using regression. *International Conference on the Technology of Plasticity*, Cambridge, United Kingdom, 2017, p. 1623 – 1628.
- Vorkov, V., et al, Experimental investigation of large radius bending, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, p. 1– 17. doi:10.1007/s00170-017-0346-6.
- Wu, B., et al., A non-associated constitutive model considering anisotropic hardening for orthotropic anisotropic materials in sheet metal forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020.
- Xie, Z., et al., Microstructure-property relationship in a low carbon Nb-B bearing ultra-high strength steel by direct quenching and tempering. *Materials Science & Engineering A*, 2018, p. 200-207
- Zhao, J., Jiang, Z., Thermomechanical processing of advanced high strength steels. *Progress in Materials Science*, 2018, p. 174-242.
- Zhao, Y., et al., In-situ bending under tension shear fracture analysis and microstructure “earthquake” of DP780 dual phase steels. *Materials Science & Engineering A*, 2017, p. 80-91.

APÊNDICE A – DADOS COMPLETOS MENSURADOS NA ANISOTROPIA

		0°			45°			90°		
		Antes	Depois	r	Antes	Depois	r	Antes	Depois	r
1	Largura	19,99	19,91	1,237	19,95	19,75	0,950	20,05	19,74	0,847
	Comprimento	48,09	48,44		47,86	48,86		48,33	50	
	Espessura	3,06	3,01		3,03	3,01		3,03	3,01	
2	Largura	19,97	19,81	1,028	19,9	19,76	0,679	20	19,91	0,726
	Comprimento	48,13	48,9		47,12	47,95		47,32	47,83	
	Espessura	2,98	2,93		3,03	3,02		3,03	3,02	
3	Largura	19,97	19,83	0,706	19,95	19,72	2,158	20	19,78	0,536
	Comprimento	48,4	49,23		47,33	48,14		48,45	50,01	
	Espessura	3,05	3,03		3,04	3,03		3,03	3	
4	Largura	19,98	19,87	1,389	19,9	19,67	0,902	20,05	19,88	0,509
	Comprimento	48,21	48,67		47,55	48,73		46,96	48,16	
	Espessura	3,02	3		3,03	2,99		3,05	3,02	
5	Largura	19,98	19,88	0,861	19,95	19,69	1,772	20	19,79	0,607
	Comprimento	48,6	49,13		48,23	49,23		47,64	48,99	
	Espessura	3,05	3,03		3,04	3,02		3,02	3,01	
6	Largura	19,97	19,8	0,990	19,9	19,65	0,747	20,05	19,77	1,044
	Comprimento	48,45	49,29		47	48,41		47,64	48,97	
	Espessura	3,01	3		3,03	3,01		3,03	3	
7	Largura	19,99	19,76	0,677	19,95	19,72	2,047	20,05	19,85	0,877
	Comprimento	48,15	49,55		47,67	48,5		47,96	49	
	Espessura	3,02	2,99		3,04	3,02		3,03	3,01	
8	Largura	19,98	19,84	1,099	19,9	19,72	0,718	20,05	19,89	1,357
	Comprimento	48,07	48,72		47,77	48,82		47,1	47,76	
	Espessura	3,02	3		3,05	3,02		3,04	3,02	
		0,998			1,247			0,813		

Unidades em mm

Rm 1,0761

APÊNDICE B – DADOS MENSURADOS NO ENSAIO DE DUREZA

DUREZA COM RELAÇÃO A ESPESSURA RAIÃO DE 3 MM.

Raio de 3 mm		Espessura [mm]			
		0	1	2	3
Temperaturas	20 °C	569	576	586	583
	100 °C	565	625	565	552
	200 °C	565	617	594	558
	300 °C	551	609	579	580
	400 °C	519	507	507	501
	500 °C	452	428	433	438

DUREZA COM RELAÇÃO A ESPESSURA RAIÃO DE 6 MM.

Raio de 6 mm		Espessura [mm]			
		0	1	2	3
Temperaturas	20 °C	598	587	617	580
	100 °C	562	601	579	558
	200 °C	601	569	590	552
	300 °C	601	550	587	565
	400 °C	475	538	540	485
	500 °C	378	340	346	330

DUREZA LONGITUDINAL A CHAPA DOBRADA COM RAIÃO DE 3 MM

Raio de 3 mm		Profundidade 1 mm				
		0	0,15	0,3	0,45	0,6
Temperaturas	20 °C	576	583	580	572	585
	100 °C	625	558	594	601	532
	200 °C	617	601	586	609	583
	300 °C	609	579	572	601	551
	400 °C	507	525	526	513	510
	500 °C	428	428	457	457	430

Raio de 3 mm		Profundidade 2 mm				
		0	0,15	0,3	0,45	0,6
Temperaturas	20 °C	586	594	558	565	558
	100 °C	565	587	545	559	552
	200 °C	594	601	551	586	579
	300 °C	579	545	594	551	572
	400 °C	507	525	532	525	490
	500 °C	433	429	479	452	473

DUREZA LONGITUDINAL A CHAPA DOBRADA COM RAIOS DE 6 MM

Raio de 6 mm		Profundidade 1 mm				
		0	0,15	0,3	0,45	0,6
Temperaturas	20 °C	587	598	562	590	558
	100 °C	601	579	594	572	587
	200 °C	569	565	579	550	565
	300 °C	550	545	551	580	560
	400 °C	538	480	519	433	426
	500 °C	340	333	330	335	320

Raio de 6 mm		Profundidade 2 mm				
		0	0,15	0,3	0,45	0,6
Temperaturas	20 °C	617	609	565	609	565
	100 °C	579	572	580	579	601
	200 °C	590	580	558	598	558
	300 °C	587	580	579	562	579
	400 °C	540	525	507	498	445
	500 °C	346	345	336	333	336