

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

PAULO ROBERTO LEAL

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS G4 E ST4 PARA ESTAMPAGEM DE BUCHA
DE PROTEÇÃO DE CORDÃO DE ARRANQUE PARA MOTORES A COMBUSTÃO

Porto Alegre

2020

PAULO ROBERTO LEAL

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS G4 E ST4 PARA ESTAMPAGEM DE BUCHA
DE PROTEÇÃO DE CORDÃO DE ARRANQUE PARA MOTORES A COMBUSTÃO

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Porto Alegre

2020

CIP - Catalogação na Publicação

Leal, Paulo Roberto

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS G4 E ST4 PARA ESTAMPAGEM DE BUCHA DE PROTEÇÃO DE CORDÃO DE ARRANQUE PARA MOTORES A COMBUSTÃO / Paulo Roberto Leal. - 2020.

53 f.

Orientador: Alexandre da Silva Rocha.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Aço Baixo Carbono. 2. Estampagem. 3. Bucha de Proteção. I. Rocha, Alexandre da Silva, orient. II. Título.

PAULO ROBERTO LEAL

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS G4 E ST4 PARA ESTAMPAGEM DE BUCHA
DE PROTEÇÃO DE CORDÃO DE ARRANQUE PARA MOTORES A COMBUSTÃO

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia 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 da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Coordenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Aprovado em: 22/06/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Halston Mozetic - Uniritter - Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Mario Wolfart Junior - IFC – Santa Catarina

Prof. Dr. Tomaz Fantin de Souza - IFSUL - Rio Grande do Sul

*Dedico este trabalho a minha filha, Weyda, pelo olhar
motivante que me fez cruzar esta jornada.*

AGRADECIMENTOS

Aos colegas de trabalho Shanna Martinewski, pelo incentivo e apoio à minha participação neste programa, a Vinícius Diogo Flesch, pelo apoio nos ensaios realizados, Martim Wunsche pelo auxílio nas correções e também ao amigo Felipe Roy por toda ajuda prestada nesta caminhada.

Fica aqui registrado os meus mais sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha, pela dedicação, auxílio e conhecimentos imensuráveis transmitidos a mim durante o programa de pós graduação.

“Não conheço ninguém que conseguiu realizar um sonho sem sacrificar feriados e domingos pelo menos uma centena de vezes. O sucesso é construído a noite! Durante o dia você faz o que todos fazem. Mas para obter um resultado diferente da maioria, você tem que ser especial. Se fizer igual a todo mundo, obterá os mesmos resultados. Não se compare à maioria, pois infelizmente ela não é modelo de sucesso.”

(Roberto Shinyashiki¹)

¹ Roberto Shinyashiki é um psiquiatra e empresário brasileiro, famoso autor de livros de autoajuda e palestrante motivacional.

RESUMO

Durante a aplicação de uma Bucha de Proteção, com material G4, do Cordão de Arranque em uma Carcaça de Arranque de Roçadeiras, há a ocorrência de trincas, ocasionando danificação do Cordão de Arranque e posterior perda de sua função primária, ou seja, ligar o motor. A fim de evitar tal falha trinca, foi realizado o presente estudo, para determinar outro material com melhor comportamento e sem incidência de trincas. Para validar a hipótese de similaridade entre os materiais e também justificar a ausência de trincas, foi realizado o comparativo entre os materiais NBR 5007 – G4 RL e DIN EN 10139 – ST4 LG, através de seis ensaios: Análise Química, Microestrutura, Dureza, Tração Erichsen e Anisotropia. Como resultado, tem-se: maiores tamanhos de grão no material G4, maior dureza, menor ductilidade, do material e menor limite de escoamento ($R_{p0,2}$), potencializando o surgimento de trincas. Porém, sem diferenças significativas nos resultados nos ensaios Erichsen e Anisotropia, com valores próximos. Por fim os resultados melhores, dentro do que foi proposto, ou seja, não apresentar a incidência de trincas na Bucha, ficaram para o Material ST4. Isto valida a possibilidade de utilização do material ST4 sem incidência de trincas na aplicação de Bucha de Proteção.

Palavras-chave: Aço Baixo Carbono. Estampagem. Bucha de Proteção.

CHARACTERIZATION OF G4 AND ST4 MATERIALS FOR STAMPING OF STARTER PROTECTION BUSHING FOR COMBUSTION ENGINES

ABSTRACT

During the application of a Protection Bushing, with material G4, of the Starter Rope in a Brush Cutter Starter Cover, cracks appear, causing damage to the Starter Rope and subsequent loss of its primary function, in other words, the engine doesn't start. In order to avoid failure crack, the present study was performed to determine another material with a better performance for this type of application, that is, no incidence of cracks. To validate the hypothesis of similarity between the materials and also avoid crack appearance, a comparison between the materials NBR 5007 - G4 RL and DIN EN 10139 - ST4 LG was carried out. The investigation involved: Chemical Analysis, Microstructure analysis, Hardness testing Tensile testing, Erichsen testing and determination of Anisotropy coefficient. It was found that the increased in grain sizes at the material G4, increased hardness, less ductility, of the material and lower yield limit value ($R_{p0.2}$) that leveraging the appearance of cracks. Nevertheless, Erichsen and Anisotropy results presented close values with no significant differences. Finally, tests revealed a positive result, within what was proposed, that is, not presenting crack occurrence in Bushing, were found in the ST4 material. This validated the possibility of applying the ST4 material without incidences of cracks for the manufacturing of the Protection Bushing.

Key-words: Low Carbon Steel. Drawing. Protection Bushing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Principais parâmetros geométricos	20
Figura 2: Direções corpo de prova para Ensaio de Anisotropia	20
Figura 3: Ensaio de Embutimento Erichsen	22
Figura 4: Resumo dos Ensaios realizados	24
Figura 5: Dimensões corpo de prova	25
Figura 6: Gravação de identificação a laser nos corpos de prova.....	26
Figura 7: CP's antes (a) e depois (b) do ensaio de Tração	26
Figura 8: Resultado de Curva Verdadeira obtida durante ensaio.....	28
Figura 9: Resultado de Curva Verdadeira e de Engenharia obtida durante ensaio...28	
Figura 10: Linha Linear (a) e Curva verdadeira juntamente com linha deslocada 0,002 (b).....	29
Figura 11: Curva de Escoamento desprezando a porção da deformação elástica do material	29
Figura 12: Demonstrativo de da Equação da reta	30
Figura 13: Máquina de ensaio Universais UFRGS.....	31
Figura 14: CP para Tração (esquerda) e Anisotropia (direita), dimensões em mm...31	
Figura 15: Realização de ensaio de Anisotropia e Tração	32
Figura 16: CP's antes (a) e depois (b) do ensaio de Anisotropia	32
Figura 17: Sistema de Arranque.....	34
Figura 18: Conjunto do Arranque de uma roçadeira	34
Figura 19: Nove passos da estampagem da Bucha de Proteção.....	35
Figura 20: Local da medição da dureza	35
Figura 21: Evolução da dureza do produto em relação à dureza da bobina	36
Figura 22: Metalografia G4 e ST4 - Ampliações de 100, 200 e 500X	38
Figura 23: Comparativo de tamanho de grão entre G4 (esq.) e ST4 (dir.).....	38
Figura 24: Relação Hall-Petch para um aço baixo carbono	39
Figura 25: Chapas dos materiais G4 e ST4 após ensaio Erichsen	43
Figura 26: Resultado ensaio Erichsen materiais G4 e ST4.....	43
Figura 27: Fatores de influência na Anisotropia de aços laminados a frio	45
Figura 28: Trincas após remanche da Bucha de Proteção na Carcaça de Arranque45	
Figura 29: Tira progressiva do material G4	46
Figura 30: Tira progressiva do material ST4	46

Figura 31 - Bucha de Proteção com ST4 antes (a) e depois (b) da montagem na Carcaça de Arranque	46
Figura 32: Comparativo aplicação final da Bucha de Proteção no G4 (a) e ST4 (b).	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados quantitativos obtidos na norma NBR 5007	18
Tabela 2: Dados quantitativos obtidos na norma DIN EN 10139	19
Tabela 3: Ensaio de Anisotropia	32
Tabela 4: Influência da dureza da matéria-prima na dureza do produto	36
Tabela 5: Composição Química dos materiais	37
Tabela 6: Valores de dureza	40
Tabela 7: Resultados de ensaio de Tração e curva de escoamento	41
Tabela 8: Médias dos valores de R_m , $R_{p0,2}$, A, C, n e K_{f0} dos materiais ST4 e G4	42
Tabela 9: Resultados ensaio Anisotropia	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
PPGE3M	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

k_f	[Mpa]	Tensão Verdadeira
φ	[]	Deformação Verdadeira
l_i	[mm]	Deslocamento instantâneo
A_i	[mm]	Área instantânea
ε	[]	Deformação Engenharia
σ	[Mpa]	Tensão Engenharia
C	[]	Coeficiente de resistência
n	[]	Coeficiente de encruamento
R_m	[Mpa]	Limites de resistência
$R_{p0,2}$	[Mpa]	Limite convencional de escoamento
A	[%]	Percentual de alongamento
C	[Mpa]	Coeficiente de resistência
n	[]	Coeficiente de encruamento
K_{f0}	[Mpa]	Tensão de escoamento inicial
r	[]	Razão de deformação
r_m	[]	Anisotropia média
Δr	[]	Anisotropia Planar
σ_y	[MPA]	Limite de escoamento do material
σ_0	[MPA]	Resistência do material
k_y	[]	Constante do material
$d^{1/2}$	[mm]	Diâmetro do grão elevada na potência $\frac{1}{2}$.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.1.1 Objetivos específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 MATERIAL	18
2.1.1 NBR 5007 - G4 RL	18
2.1.2 DIN EN 10139 - ST4 LG	18
2.1.3 Encruamento e trinca	19
2.2 MÉTODOS DE ANÁLISE.....	19
2.2.1 Anisotropia	20
2.2.2 Ensaio Erichsen	22
2.2.3 Ensaio de Tração	22
3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	23
3.1 ANÁLISE QUÍMICA	24
3.2 MICROESTRUTURA DO MATERIAL.....	24
3.3 ENSAIO DE DUREZA.....	25
3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	25
3.5 ENSAIO ERICHSEN.....	30
3.6 ENSAIO DE ANISOTROPIA	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
4.1 APLICAÇÃO DA BUCHA DE PROTEÇÃO	33
4.1.1 Processo de Fabricação da Bucha de Proteção	34
4.1.2 Influência da dureza (G4)	35
4.2 ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL	37
4.3 MICROESTRUTURA DO MATERIAL.....	38
4.4 ENSAIO DE DUREZA.....	40
4.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS A TRAÇÃO E CURVA DE ESCOAMENTO DAS CHAPAS.....	40
4.6 ENSAIO ERICHSEN.....	42
4.7 ANISOTROPIA	44
4.8 TESTE DE ESTAMPAGEM	45
4.8.1 Material G4.....	45

4.8.2 Material ST4.....	46
4.8.3 Comparativo entre G4 e ST4.....	47
5 CONCLUSÕES.....	48
APÊNDICE A – DESENHO PARA REALIZAR PROGRAM DE CORTE A LASER..	51
APÊNDICE B – CERTIFICADO DE MATÉRIA-PRIMA G4.....	52
APÊNDICE C – CERTIFICADO DE MATÉRIA-PRIMA ST4.....	53

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a grande competitividade dos mercados, seja nacional ou internacional, exige produtos cada vez mais detalhados e complexos, tarefa esta atribuída aos “designers” de novos produtos. Para viabilizar tais produtos, opções econômicas devem ser adotadas. Isso deve ser considerado durante a determinação das ferramentas e parâmetros a serem utilizados em seus processos de fabricação, onde é necessário, na maioria dos casos, o aumento da produtividade, sem que este afete a qualidade do produto.

O grande desafio é atender os requisitos técnicos e econômicos de produção, em decorrência da necessidade de viabilizar a produção destes produtos, durante o processo de transformação mecânica das matérias-primas, mas especificamente, durante o processo de conformação de chapas, que visa, além dos fatores acima citados, também utilizar a deformabilidade das matérias-primas a serem transformadas ao máximo (SCHAEFFER, 2016). Para lidar com tal complexidade, há três meios para se determinar os parâmetros ideais de processo: através de tentativas e erros nos anos de experiência adquirida; experimentos; e modelos teóricos (MACHADO, 2011).

Para o presente trabalho, foi selecionado o método experimental, onde foram realizados seis ensaios, Anisotropia, Erichsen, Tração, Dureza, Metalografia e Análise Química, a fim de determinar o material com melhor comportamento de estampabilidade, visando a não incidência de trincas durante o processo de conformação progressiva em uma Bucha de Proteção do Cordão de Arranque para motores a combustão.

Na indústria, a utilização de fontes de fornecimento está atrelada a diversos fatores, sendo um destes, a sua localização. A utilização de fontes locais por vezes é a mais lógica a ser utilizada, porém os resultados podem não ser satisfatórios. Para tal viés, é necessário realizar estudos comparativos.

No mercado nacional tem-se a utilização do material NBR 5007 – G4 RL, denominado a partir de agora como somente G4, relaminado baixo carbono, devido a sua excelente característica de estampagem de repuxo profundo, conferindo a peça aplicada um acabamento superficial diferenciado a boa planicidade. Já no mercado internacional, o material DIN EN 10139 – ST4 LG, também a partir de agora

denominado somente como ST4, tendo grande gama de aplicação para diversos tipos de estamparia e também para dobras a frio.

O presente estudo visa verificar a possibilidade de utilização de um material ST4, provinda de uma fonte de fornecimento diferente do material atual G4, a fim de evitar o aparecimento de trincas. Para isso, faz-se necessário comparar o comportamento destes dois materiais, buscando justificativa nos ensaios para a ocorrência ou não de trincas.

O material ST4 foi indicado pela matriz europeia fabricante de motores a combustão para Motosserras e Roçadeiras onde já utilizam este material. Este estudo foi realizado antes da aquisição do material ST4, pois para a compra deste, o fornecedor limita a quantidade mínima de uma bobina, com aproximadamente 600 kg.

Este trabalho foi desenvolvido parte no interior do campus da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) e parte em uma empresa do setor privado. Visa também empregar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) além dos conhecimentos profissionais do mestrando.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi determinar o material que não apresentasse trinca, através de um comparativo entre dois aços para estampagem, o G4, produzido na indústria brasileira, e o aço ST4, material produzido na indústria europeia.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Avaliar a possibilidade de substituição do material G4 pelo similar ST4, descrevendo vantagens e desvantagens;
- b) Obter através da realização de ensaios de conformação dos materiais, informações a respeito das principais propriedades de interesse para o processo de estampagem;
- c) Determinar a suscetibilidade a formação de trincas através das variações nos resultados entre os dois materiais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem como principal objetivo prover sustentação teórica, visando fomentar o tema proposto assim como o objeto da pesquisa. Isso possibilita a criação de cenários teóricos e conceituais, proporcionando sustentação à pesquisa.

2.1 MATERIAL

2.1.1 NBR 5007 - G4 RL

A norma NBR 5007 (2008) estabelece, dentro de diversos fatores, os requisitos para fabricação e fornecimento de tiras de aço de baixo carbono relaminadas, em bobinas ou não, com espessuras de até 6mm. Este tipo de material é apropriado para conformação a frio, devido a sua excelente característica de estampagem de repuxo profundo, e também para revestimento de superfícies. Os materiais contidos nesta norma apresentam acabamento superficial diferenciado a boa planicidade, porém, não são apropriados para tratamentos térmicos de tempera ou revenimento posteriores.

A Tabela 1, são apresentados os valores sugeridos pela norma para as principais características, relevantes a este trabalho.

Tabela 1: Dados quantitativos obtidos na norma NBR 5007

Erichsen	Limite escoamento Mpa	Limite Resistência a Tração Mpa	Dureza HV	Composição Química %
10,4	máx 220	270 - 350	máx 104	C ≤0,08 Mn ≤0,5 P ≤0,03 S ≤0,035 Al ≥ 0,02

2.1.2 DIN EN 10139 - ST4 LG

A norma DIN EN 10139 (1997) especifica as condições técnicas de entrega de tiras estreitas de aço de liga leve e não ligados, com espessura de no máximo 10mm e largura inferior a 600mm sem revestimento, laminadas a frio (skin-passed), passe realizado a frio na etapa final da laminação final, com baixíssima deformação, que são ideais para conformação a frio. Por outro lado, não são adequados para tratamento de endurecimento seguido de têmpera. Este material tem grande gama de aplicação para diversos tipos de estamparia e também para dobras a frio.

A Tabela 2, assim como na norma anterior também são apresentados os valores sugeridos pela norma para as principais características, relevantes a este trabalho.

Tabela 2: Dados quantitativos obtidos na norma DIN EN 10139

Erichsen	Limite Escoamento Mpa	Limite Resistência a Tração Mpa	Dureza HV	Composição Química %					
-									
11	140 - 210	270 - 350	máx 95	C ≤0,08	Mn ≤0,4	P ≤0,03	S ≤0,03	Al -	

2.1.3 Encruamento e trinca

As propriedades mecânicas de um material conformado variam em função da sua direção. Isso ocorre devido à orientação preferencial dos grãos após uma grande deformação por forjamento, laminação ou trefilação. Em materiais dúcteis policristalinos para a geração dos deslizamentos dos planos cristalinos há um aumento das tensões cisalhantes, geradas durante o processo de deformação. Este aumento de tensões é denominado encruamento do material. Este endurecimento devido às interações das discordâncias gera uma espécie de barreira, impossibilitando o escorregamento dos planos, e quando a tensão aplicada supera o limite de escoamento do material, introduzindo um estado de tensões tri-axial no material, formam-se micro cavidades neste, coalescendo e crescendo formando uma trinca longitudinal, até a superfície do material (DIETER, 1981).

2.2 MÉTODOS DE ANÁLISE

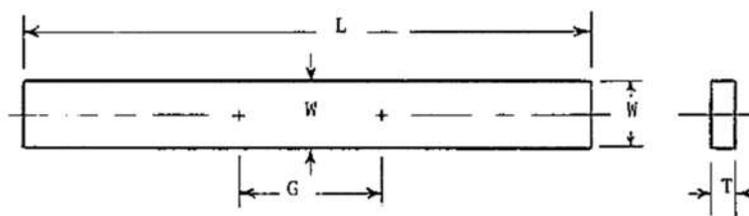
A capacidade que uma chapa tem para ser conformada e dar forma a um produto através de uma ferramenta, matriz, é denominada de estampagem. A avaliação da estampabilidade de uma chapa exige que sejam executados muitos testes ou ensaios, simulativos ou não, para verificação/comparação do material a ser utilizado para certo processo.

A análise da estampabilidade de uma chapa é de suma importância tanto para os clientes como para os fabricantes, pois são através deles que são determinados os equipamentos e processos a serem utilizados. São muitos os métodos de análise possíveis para ensaios de caracterização de chapas metálicas. Para o presente estudo foram adotados os Ensaios de Análise Química, Microestrutura, Dureza, Tração, Erichsen e Anisotropia.

2.2.1 Anisotropia

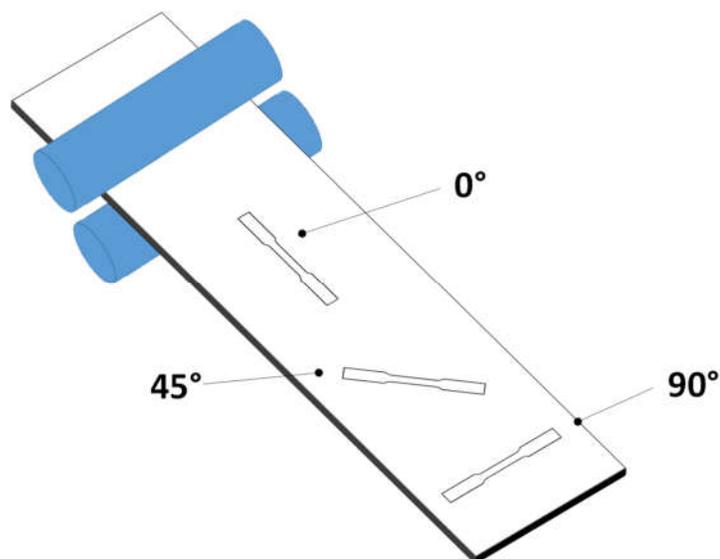
As propriedades mecânicas de um material conformado variam em função da direção, no sentido de laminação ou oposto a este. Isso ocorre devido à orientação preferencial dos grãos após uma grande deformação por forjamento, laminação ou trefilação. No caso de chapas laminadas, o material isotrópico é aquele que apresenta o mesmo comportamento mecânico, indiferente à direção escolhida, seja ela na direção de laminação, à 45° ou à 90° desta. A variação existente nos materiais é estudada a partir de ensaios de Anisotropia. O ensaio de Anisotropia consiste na aplicação de uma deformação de tração em um corpo de prova previamente determinado, Figura 1, em diferentes direções em relação a direção de laminação, ou seja, 0, 90 e 45°, exemplificado na Figura 2, que mostra a orientação dos corpos de prova visando este ensaio.

Figura 1: Principais parâmetros geométricos



Fonte: Adaptado de: SCHAEFFER, 2016

Figura 2: Direções corpo de prova para Ensaio de Anisotropia



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a retirada dos corpos de prova, estes são fixados à uma máquina de tração com o intuito de aplicação de uma força tracional, alongando o material normalmente na faixa de 15 a 20% de seu comprimento útil. Após a deformação é realizada a verificação da razão entre a espessura e a largura inicial/final do material. Um material isotrópico é aquele que apresenta as mesmas propriedades em qualquer direção escolhida, o que resultaria em uma relação espessura/largura de 1, ou seja, estes deformariam na largura o mesmo que na espessura. Basicamente, a Anisotropia prevê a relação da deformação na largura e a deformação na espessura. Materiais usuais não apresentam este comportamento. Por fim, a ASTM E517 (2010) define que a razão de deformação é um parâmetro que indica a capacidade de uma chapa de metal resistir ao estiramento quando submetida a forças de tração ou compressão.

De acordo com Schaeffer (2016) os principais defeitos para materiais anisotrópicos são a redução da espessura e o efeito de “orelhamento”, oscilações de altura nas bordas do material, ambos causados em decorrência do alongamento dos grãos provenientes do processo para obtenção das chapas, mais precisamente, a laminação destes. Em relação a espessura: Valores da razão de deformação (r) maiores que 1 indicam que ocorre maior deformação de largura do que de espessura, a qual é a relação da deformação da largura pela deformação da espessura. Isto significa que numa estampagem há uma melhor distribuição das deformações no plano da chapa e menor tendência ao afinamento. Em relação ao orelhamento: A variação da razão da deformação (r), dado em diferentes planos da chapa (0, 45 e 90°) denominada como Anisotropia Planar (Δr), ou também Coeficiente de Orelhamento, se não houve-se diferenças, deveria ser igual a 0, mas em se tratando de matérias anisotrópicos, nos quais há esta diferença, os valores positivos indicam formações de orelhas a 0 e 90° em relação a direção de laminação, enquanto valores negativos indicam a formação de orelhas a 45° em relação a direção de laminação.

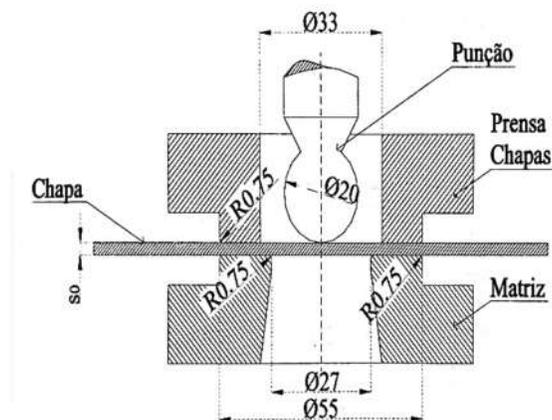
Qayyum et al. (2016) afirma que um alto índice de Anisotropia em chapas pode afetar diretamente o surgimento de trincas, um acabamento superficial ruim dificulta a estampabilidade do material, devido as modificações de direção dos escorregamentos dos planos cristalinos que leva um alongamento na parede do copo estirado.

2.2.2 Ensaio Erichsen

O ensaio Erichsen tem como principal objetivo dar um indicativo de ductilidade de um material, ou seja, quanto o material suporta ser estirado.

Para realização do ensaio Erichsen pode-se utilizar a norma ABNT NBR16281 (2014), onde esta estabelece o procedimento a seguir: Um material laminado em tira, corpo de prova, é preso numa matriz através de um prensa-chapa, após, um punção desloca-se sobre o corpo de prova, penetrando-o até o seu rompimento, a Figura 3 exemplifica a execução do ensaio Erichsen.

Figura 3: Ensaio de Embutimento Erichsen



Fonte: Adaptado de: SCHAEFFER, 2016

O momento em que ocorre a ruptura da chapa pode ser acompanhado a olho nu ou pelo estalo característico da ruptura do material. A altura da calota gerada determina o grau de estampabilidade do material. Quanto maior a altura da calota, maior a estampabilidade do material. O ensaio tem como objetivo determinar de forma aproximada, o quanto o material pode ser estirado, servindo como caracterizador de matéria prima de chapa, onde maiores índices de Erichsen indicam boa estampabilidade e menores valores deste índice indicam o inverso (SCHAEFFER, 2016).

2.2.3 Ensaio de Tração

No processo de conformação mecânica a relação entre a força a ser aplicada, para obtenção do produto, e a resistência do material que irá recebê-la é o principal aspecto a ser verificado. Os mecanismos para determinação desta relação são os

ensaios mecânicos, que podem ser de: torção, compressão e tração, pois representam as condições reais de processo (KOLL et al., 2007).

A propriedade mecânica responsável pela determinação da resistência do material é a tensão de escoamento (k_f), onde uma vez aplicada uma força uniaxial, em ensaio de compressão, tração, ou outros, leva o material a sua deformação permanente, ou seja, atua na zona plástica do material. A tensão de escoamento varia em função da deformação verdadeira (ϕ) do material (SCHAEFFER, 2016).

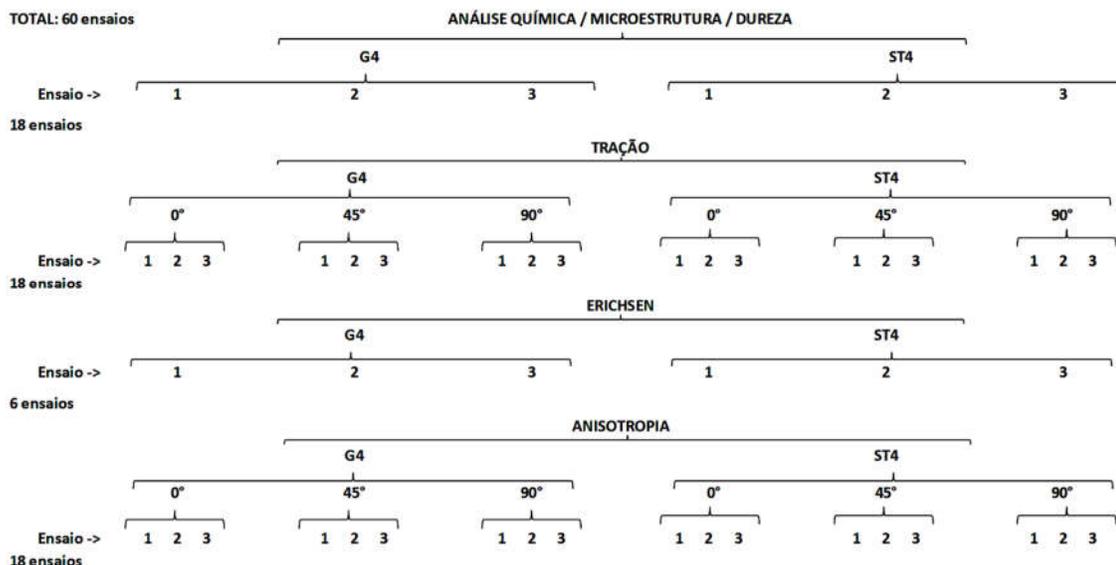
O ensaio de Tração para determinação da Curva de Escoamento em um material consiste na aplicação de uma força uniaxial, trativa, gradativa, em um corpo de prova, onde a deformação na região central, seção, representa a distribuição de carga ao longo do seu comprimento. Convém salientar que este não sofre influência pelo atrito, uma vez que é fixada externamente pelas extremidades.

Segundo Schaeffer (2004), para a conformação mecânica a zona mais importante a ser estudada é a zona plástica do material, quando o material já apresenta deformações permanentes. A relação entre tensão e deformação pode ser verificada diretamente através de um ensaio de Tração, gerando uma curva verdadeira, através da análise da força aplicada com a área instantânea do material, pois esta muda a cada instante do ensaio, diferente da curva de engenharia, onde a análise ocorre com base somente na área e comprimento iniciais. Em pequenas solicitações, onde as tensões aplicadas são menores que o limite de escoamento do material, esta relação não se faz necessária, somente para solicitações próximas ao limite de escoamento do material, caso contrário a deformação não ocorrerá. O conhecimento do valor do escoamento do material é de suma importância para determinação de forças de trabalho de conformação menores, geração do dimensionamento correto das matrizes e, conseqüentemente levando a menores gastos no processo de conformação mecânica.

3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Para tornar a realização dos ensaios a mais eficiente possível, foi criado um mapa com todos os ensaios a serem abordados neste trabalho. A principal finalidade deste mapa é a visualização macro dos ensaios. A Figura 4 apresenta os 60 ensaios realizados.

Figura 4: Resumo dos Ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a escolha do material para ser comparado, no caso o ST4, tomou-se como base os seguintes ensaios de conformabilidade: Análise Química, Microestrutura, Dureza, Tração Erichsen e Anisotropia, devido a estes serem comumente utilizados para determinação do comportamento de estampabilidade no processo de estampagem, como já citado anteriormente.

A partir de 3 chapas de aproximadamente 400mm de comprimento, retiradas de uma bobina, para cada material, ou seja, 6 chapas, foram confeccionados os 60 corpos de prova.

3.1 ANÁLISE QUÍMICA

A análise Química do material foi realizada conforme norma ASTM E415-17 (2008) utilizando um Espectrômetro de Emissão Ótica Marca Spectro, modelo Spectromaxx para todos os elementos exceto o carbono, este foi analisado com um carbonômetro da marca LECO, modelo C-200.

3.2 MICROESTRUTURA DO MATERIAL

Foi realizada uma comparação metalográfica, com a técnica de lixamento/embutimento convencional conforme descrito na norma ABNT NBR 13284 (1995). Após, foi realizado um ataque com Picral, para verificação do tamanho de grão e também um ataque com Nital, para verificação de matriz Ferrita. Por fim, foi utilizado

um Microscópio ótico Marca Leica, modelo DM1750 M, com ampliação e 1,25x até 100X para registros das imagens neste trabalho.

3.3 ENSAIO DE DUREZA

Em relação à dureza dos materiais, foi realizada análise de dureza Vickers com aplicação de uma carga de 10kgf (HV10) conforme norma ISO 6507-1 (2005), utilizando um Durômetro marca Qness.

Foi respeitada a relação de penetração de dureza ser 1/10 em função da espessura do material, onde para a medição em HV10, que causa a maior profundidade de penetração, o valor encontrado foi de 0,050mm, o que representa uma relação de 1/15 em relação a espessura do material de aproximadamente 0,80mm.

3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para a determinação da curva de escoamento dos dois materiais G4 e ST4 foram ensaiados 18 CP's dimensionados conforme norma ASTM E8M (2016), dimensões conforme Figura 5, corpo de prova reduzido, dispostos conforme será apresentado no ensaio de Anisotropia, assim como os equipamentos e locais de realização dos ensaios.

Figura 5: Dimensões corpo de prova



Dimensão Nominal	Dimensões, mm		
	Chapa grossa 40 mm	Chapa fina 12,5 mm	6 mm
G - Comprimento da parte útil	200,0 ± 0,2	50,0 ± 0,01	25,0 ± 0,1
W - Largura da parte útil	40,0 ± 2,0	12,5 ± 0,2	6,0 ± 0,1
T - Espessura	Espessura do material		
R - Raio de concordância, mim.	25	12,5	6
L - Comprimento total	450	200	100
A - Comprimento da parte útil	225	57	32
B - Comprimento da cabeça	75	50	30
C - Largura da cabeça, aprox.	50	20	10

Fonte: Adaptado de: ASTM E8M, 2016

Destaque-se que os corpos de provas foram devidamente identificados com gravação a laser, onde foram identificados: o respectivo material, o número do corpo

de prova e a direção de corte atribuída (0, 45 ou 90°), a fim de evitar misturas entre eles, conforme ilustrado na Figura 6.

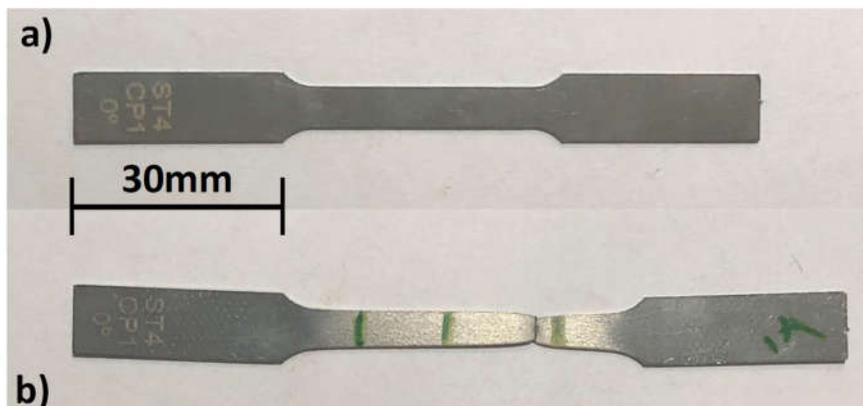
Figura 6: Gravação de identificação a laser nos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor

Para os parâmetros de velocidade de ensaio utilizado, seguiu-se a norma EN 10002-1 (2001), ou seja, velocidade constante e sem atrito de 5 mm/mim. A Figura 7 apresenta os corpos de prova antes e depois dos ensaios de Tração.

Figura 7: CP's antes (a) e depois (b) do ensaio de Tração



Fonte: Elaborado pelo autor

Abaixo se tem as equações necessárias para realização do presente trabalho:

Deslocamento instantâneo (l_i)

$$l_i = l_0 - \Delta l_0 \quad (1)$$

Área (A)

$$A = l_0 \cdot e_0 \cdot c_0 \quad (2)$$

Área instantânea (A_i)

Determinada através da Lei da Constância de Volume.

$$V_f = V_i \rightarrow A_0 x l_0 = A_i x l_i \rightarrow A_i = \frac{A_0 x l_0}{l_i} \quad (3)$$

Deformação Verdadeira (φ)

$$\varphi = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (4)$$

Tensão Verdadeira (kf)

$$k_f = \frac{F}{A_i} \quad (5)$$

Deformação Engenharia (ε)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_1} \quad (6)$$

Tensão Engenharia (σ)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

Equação de Resistência ao Escoamento de Hollomon:

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (8)$$

Coefficiente angular (a)

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (9)$$

Coefficiente linear (b)

$$b = y_1 - a_1 x \quad (10)$$

Equação da reta

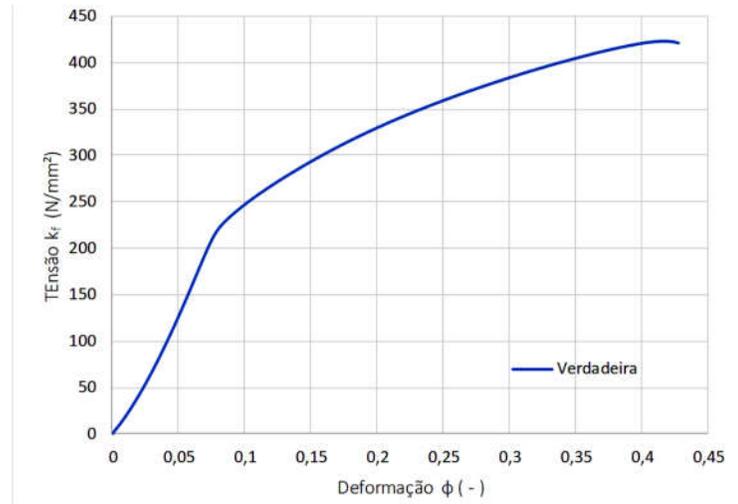
$$y = ax + b \quad (11)$$

Para realização dos gráficos, os cálculos foram realizados na planilha Excel e seguiram a seguinte sequência de cálculos:

- a) Convertido o valor da força para Newton (1N = 0,1 kg força);
- b) Deslocamento instantâneo (l_i), conforme Equação (1);
- c) Área instantânea (A_i), conforme Equação (3);
- d) Tensão verdadeira (kf), conforme Equação (6);
- e) Deformação verdadeira (φ), conforme Equação (4);
- f) Logaritmo da tensão verdadeira (Log Kf);
- g) Logaritmo da deformação verdadeira (Log φ);
- h) Deformação de engenharia (ε), conforme Equação (6);
- i) Tensão de Engenharia (σ), conforme Equação (7);

Com os cálculos realizados para cada ponto de dado fornecido, primeiramente, são apresentados os valores de Tensão Verdadeira, eixo y, em função da Deformação Verdadeira, eixo x, conforme Figura 8.

Figura 8: Resultado de Curva Verdadeira obtida durante ensaio

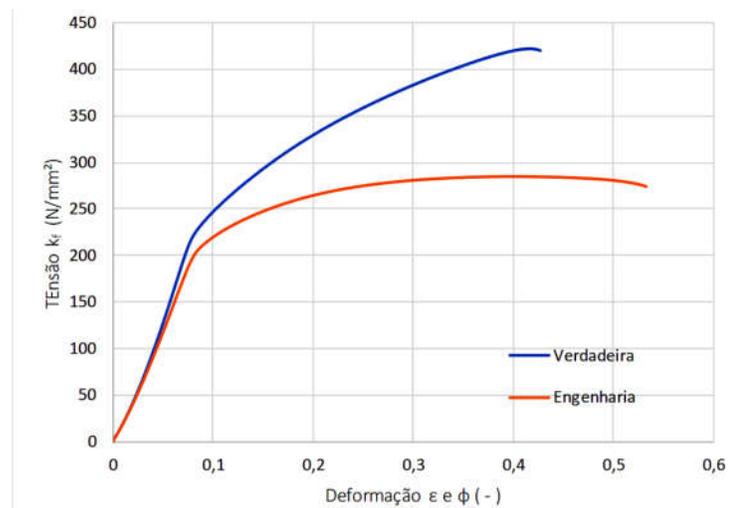


Fonte: Elaborado pelo autor

Para identificação da região elástica do material, foi realizado um comparativo entre a curva verdadeira e a curva de engenharia.

Para determinação da curva de engenharia, foram realizados os cálculos conforme equações já apresentadas, sendo possível gerar Figura 9, onde temos a relação entre a Curva verdadeira e a Curva da Engenharia, podendo assim determinar, visualmente que para tensões maiores que 50 N/mm^2 há o afastamento destas curvas.

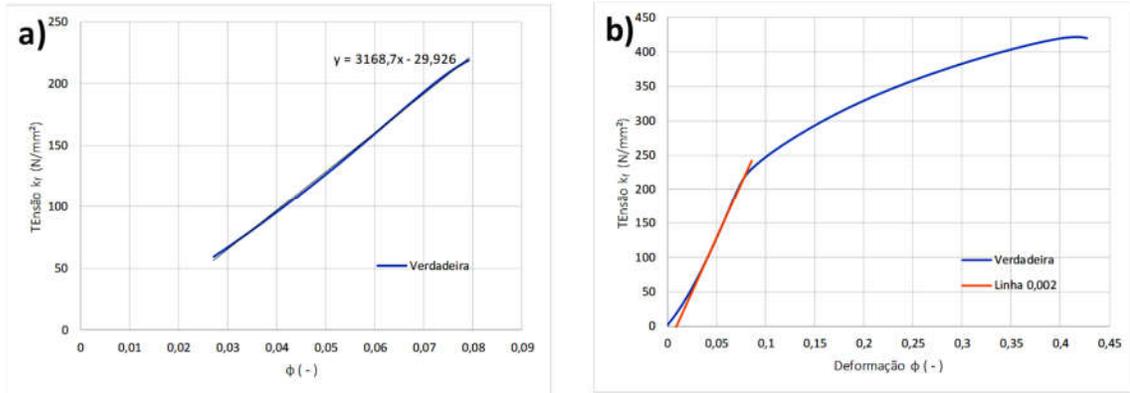
Figura 9: Resultado de Curva Verdadeira e de Engenharia obtida durante ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizando os valores entre 50 e 200 N/mm², foi possível gerar uma linha de tendência, conforme Figura 10 (a), para construção de uma linha deslocada de 0,002 mm Figura 10 (b).

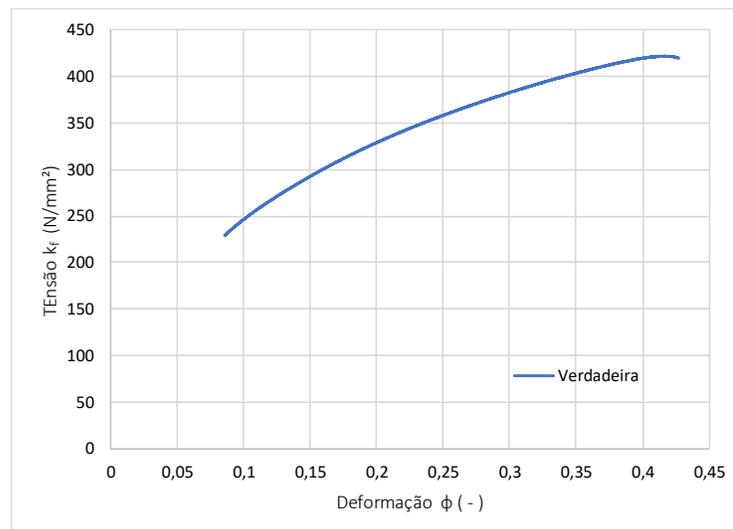
Figura 10: Linha Linear (a) e Curva verdadeira juntamente com linha deslocada 0,002 (b)



Fonte: Elaborado pelo autor

Para representar graficamente a curva de escoamento os dados referentes à região elástica foram desprezados, ou seja, abaixo de 200 N/mm², sendo possível a construção da Figura 11.

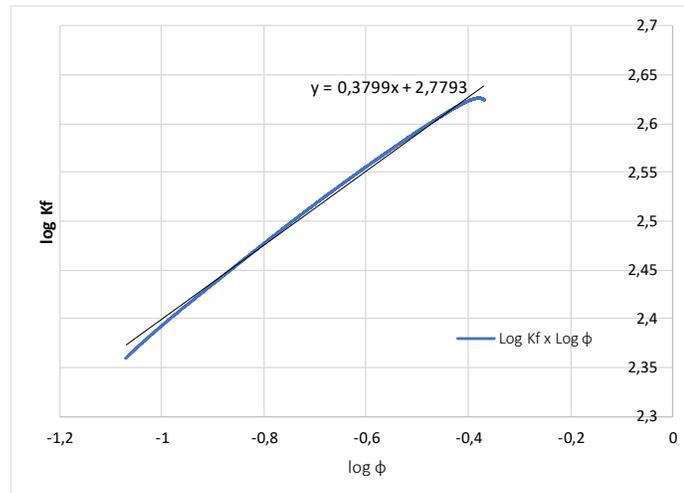
Figura 11: Curva de Escoamento desprezando a porção da deformação elástica do material



Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizando a função log do Excel para a tensão verdadeira (k_f) e da deformação verdadeira (ϕ) a partir da região do limite de escoamento determinado na Figura 12, e inserindo uma linha de tendência foi possível encontrar a equação da reta.

Figura 12: Demonstrativo de da Equação da reta



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, para determinação da equação de Resistência ao Escoamento de Hollomon (KOLL et al., 2007) deve-se igualar a Equação da reta obtida com a Equação Hollomon em log:

$$y = 0,3799 \cdot x + 2,8027$$

Onde:

$$\log(kf) = n \cdot \log(\varphi) + \log(C) \quad (12)$$

Sendo:

$$a = 0,3799 = n / b = 2,7793 = \log(C) / C = 10^{2,7793} = 601,59$$

$$\text{Logo: } k_f = 601,59 \cdot \varphi^{0,3799}$$

3.5 ENSAIO ERICHSEN

O ensaio Erichsen foi realizado nas dependências da UFRGS (LdTM) e seguiram-se os procedimentos estabelecidos conforme norma ABNT NBR16281 (2014), assim como a confecção dos CP's, onde estes foram cortados em guilhotina com as dimensões de 90x90mm. O Equipamento utilizado no ensaio foi uma máquina de ensaio universal (EMIC) com capacidade de 600kN e velocidade do ensaio de 5 a 20mm/min.

Para o presente estudo a velocidade do ensaio utilizada foi de 5mm/min, com o diâmetro da matriz de 27mm, por fim, não foi utilizado lubrificantes em ambos os corpos de prova. A Figura 13 mostra o ensaio sendo realizado.

Figura 13: Máquina de ensaio Universais UFRGS

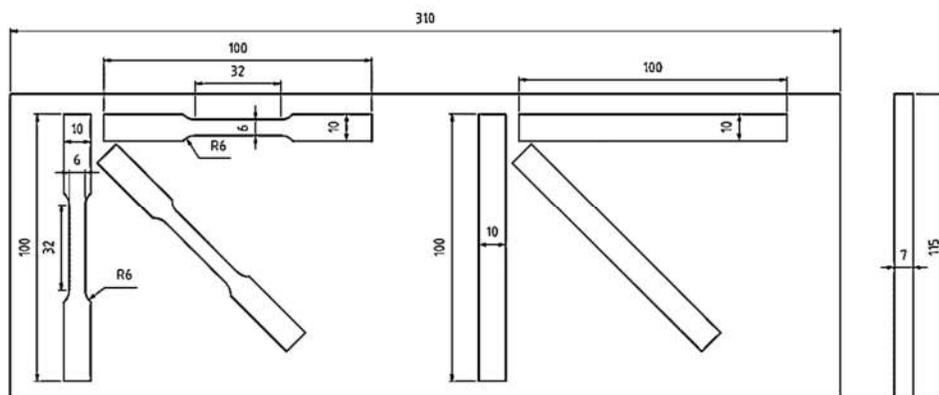


Fonte: Elaborado pelo autor

3.6 ENSAIO DE ANISOTROPIA

Para realização do Ensaio de Anisotropia os corpos de prova foram dimensionados conforme norma ASTM E8M (2016), corpo de prova reduzido, Figura 5, e produzidos por corte a laser, Figura 14. Convencionou-se que o corte a laser, se por ventura, causar alguma influência nos ensaios, esta ocorrerá nos dois materiais de forma igual, uma vez que ambos foram submetidos ao mesmo processo de corte, o mesmo para a zona afetada pelo calor na borda do corpo de prova, que neste caso é desprezível em relação a área do corpo de prova. Portanto, não haverá influência na tomada de decisão dos resultados apresentados.

Figura 14: CP para Tração (esquerda) e Anisotropia (direita), dimensões em mm



Fonte: Elaborado pelo autor

No total, para os ensaios de Anisotropia, foram confeccionados 18 corpos de provas para os dois materiais: 9 do G4, e 9 do ST4. Foram utilizadas 3 chapas para

cada material e para cada chapa foram realizados cortes nos 3 sentidos de laminação (0, 45 e 90°), conforme descrito na Tabela 3, totalizando os 18 ensaios.

Tabela 3: Ensaios de Anisotropia

	G4			STL4		
	Chapa 1	Chapa 2	Chapa 3	Chapa 1	Chapa 2	Chapa 3
0°	1 CP					
45°	1 CP					
90°	1 CP					

Para realização dos ensaios foi utilizada uma máquina de Ensaios Universais marca EMIC Instron, modelo 23-100 com capacidade de 10kN, Figura 15. As células de carga utilizadas também foram da marca Instron com capacidades de 500 kg.

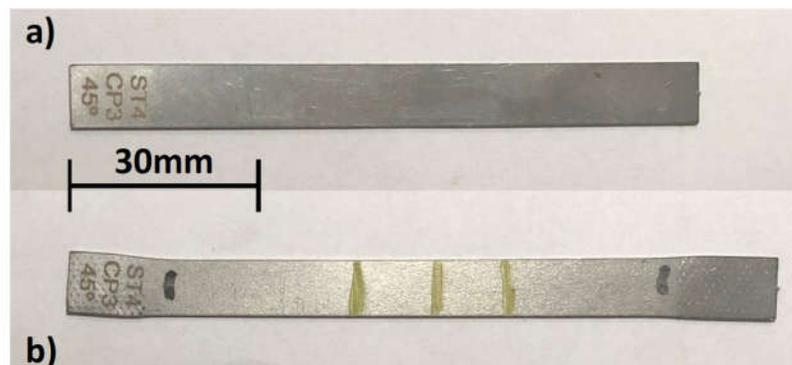
Figura 15: Realização de ensaio de Anisotropia e Tração



Fonte: Elaborado pelo autor

Os 18 corpos de provas foram tracionados em 18% (4,5 mm) do seu comprimento útil (25 mm). Para os parâmetros de velocidade de ensaio utilizado seguiu-se a norma ABNT NBR 16282 (2014), ou seja, velocidade constante e sem atrito de 5 mm/mim. A Figura 16 apresenta um corpo de prova antes (a) e depois (b) do ensaio de Anisotropia.

Figura 16: CP's antes (a) e depois (b) do ensaio de Anisotropia



Fonte: Elaborado pelo autor

As equações necessárias, numeradas a seguir de (13) até (15), foram utilizadas para a realização do presente trabalho, sendo elas:

Razão de deformação (r)

$$r = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{s_1}{s_0}} \quad (13)$$

Onde: b= largura do corpo de prova e s= espessura do corpo de prova

Anisotropia média (r_m)

$$r_m = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (14)$$

Anisotropia Planar (Δr)

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (15)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 APLICAÇÃO DA BUCHA DE PROTEÇÃO

Atualmente, a exigência do usuário em relação a um produto é relativamente igual, indiferentemente ao seu valor agregado, quando comparado a outro da mesma categoria, tendo como principal requisito que o produto funcione, opere, inicie, etc., quando este for solicitado. A principal perda de fidedignidade do cliente é quando este requisito não é atendido.

Tem-se como fonte de reclamações de consumidores, referente a falha de operação inicial, ou seja, ligar a máquina, o rompimento do Cordão de Arranque, problema que ocorre devido a falhas provenientes da Bucha de Proteção, componente estampado que foi objeto de estudo deste trabalho.

Para um motor à combustão interna utilizados em Motosserras e Roçadeiras funcionar é necessário um estímulo externo que supere a inércia do rotor principal para assim funcionar por si só. Este estímulo é dado através de um Manípulo de Arranque ligado a um Cordão de Arranque, como mostrado na Figura 17.

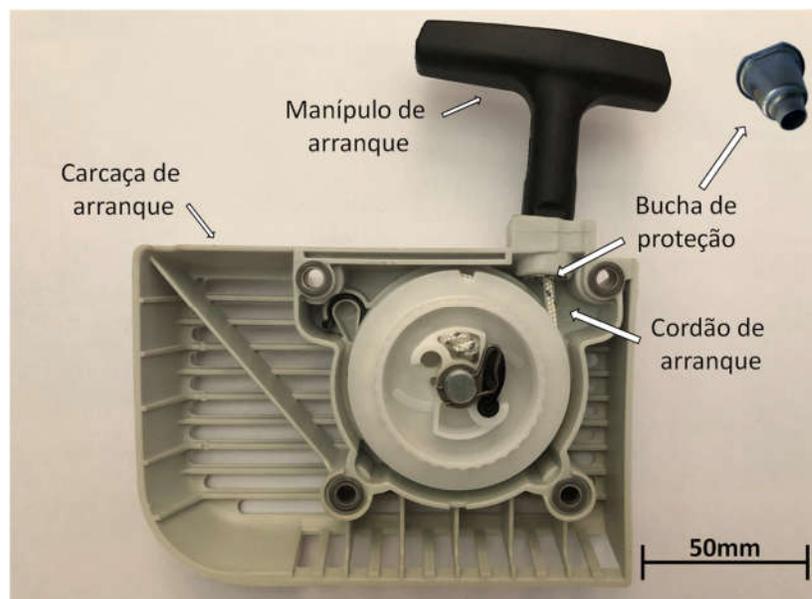
Figura 17: Sistema de Arranque



Fonte: Adaptado de: Howstuffworks, 2019

O conjunto de Arranque é composto por Cordão de Arranque, Bucha de Proteção e Carcaça de Arranque. A Bucha de Proteção da Carcaça de Arranque tem como função alojar o Manípulo e proteger o Cordão de Arranque contra danificações, evitando que este, através do atrito gerado em decorrência do contato com a Carcaça, desfie/rompa e, conseqüentemente, o produto perca a função de acionamento. A Figura 18 apresenta o conjunto do Sistema de Arranque de uma Roçadeira a combustão e seus principais componentes;

Figura 18: Conjunto do Arranque de uma roçadeira



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.1 Processo de Fabricação da Bucha de Proteção

O processo de estampagem da Bucha de Proteção é realizado através de deformação e corte de uma bobina de aço. Para este processo é utilizada uma prensa

excêntrica de capacidade máxima de 30 toneladas, bem como uma prensa chapas e utilização de óleo lubrificante.

O ferramental utilizado é uma matriz de estampo progressivo, que garante maior produtividade do que o processo de estampagem com diversas ferramentas, além da utilização de uma só prensa. Na Figura 19, podem-se verificar os nove passos de estampagem progressiva realizada para fabricação da Bucha de Proteção. Convém salientar que esta quantidade de passos é necessária para evitar o estiramento da peça durante o processo de estampagem.

Figura 19: Nove passos da estampagem da Bucha de Proteção



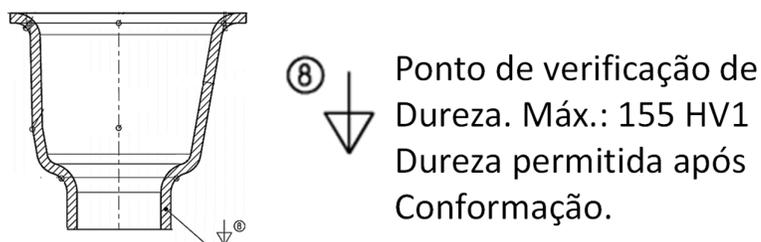
Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Influência da dureza (G4)

Para verificação do comportamento da dureza durante o processo de estampagem, foram realizadas medições no limite inferior da dureza da matéria-prima, 90 HV1 até seu limite superior, 100 HV1. Para tal fim, foi realizada a verificação da dureza em 30 amostras, sendo 10 amostras de uma bobina com 90 HV1 de dureza, 10 amostras de uma bobina com 95 HV1 de dureza e mais 10 amostras de uma bobina com 100 HV1 de dureza.

A medição de dureza foi realizada na parte inferior da Bucha de Proteção, conforme Figura 20, pois esta é a parte remanchada para a fixação da Bucha de Proteção na Carcaça de Arranque e posterior contato de fricção com o Cordão de Arranque.

Figura 20: Local da medição da dureza



Fonte: Elaborado pelo autor

Como resultado obtém-se que a dureza da matéria-prima, bobina, influência diretamente na dureza final do produto, elevando a dureza deste acima da especificação de máximo 155 HV1, microestrutura, como mostrado na Tabela 4, nas bobinas com 95 e 100 HV1, que podem vir a apresentar trincas.

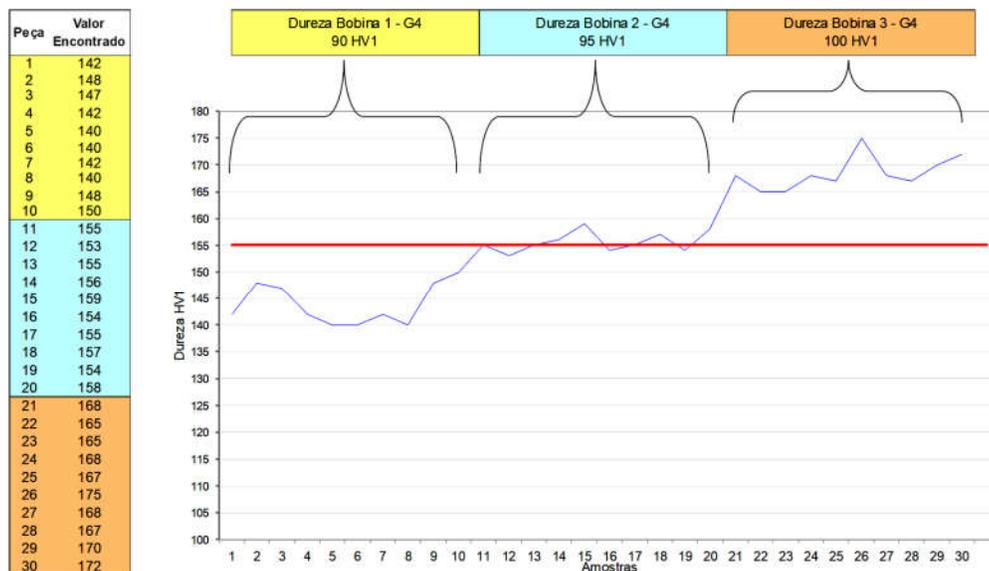
Destaque-se que os passos 5 e 6 foram os que mais aumentam a dureza do material, chegando a variarem até 28 HV1 de dureza entre eles, na bobina com maior dureza, ou seja, passo 6 com 165 HV1 e passo 5 com 137 HV1 ambos na bobina 3 com dureza de 100 HV1.

Tabela 4: Influência da dureza da matéria-prima na dureza do produto

	Bobina 1 - 90 HV1	Bobina 2 - 95 HV1	Bobina 3 -100 HV1
Passo 1	91	115	116
Passo 2	113	120	125
Passo 3	115	122	134
Passo 4	116	123	136
Passo 5	126	128	137
Passo 6	142	150	165
Passo 7	143	169	169
Passo 8	144	168	170
Passo 9	143	166	172

A Figura 21 demonstra claramente a evolução da dureza do produto em relação à dureza da bobina. Também é possível verificar na Figura 21 os valores de todas as 30 medições realizadas.

Figura 21: Evolução da dureza do produto em relação à dureza da bobina



Fonte: Elaborado pelo autor

Como resultado tem-se que, se a dureza da matéria-prima, bobina, for maior que 95 HV1, a dureza do produto final fica em torno de 165 ~ 175 HV1, ficando fora da tolerância máxima estabelecida de 155 HV1 e podendo vir a apresentar trincas, decorrentes do alto encruamento e, conseqüentemente, de uma maior dureza.

Esta verificação foi realizada pelo fornecedor da Bucha e somente para o material G4, pois para o ST4 seriam necessárias diversas bobinas, o que impossibilitou a realização do mesmo estudo para o ST4, em decorrência da fonte de fornecimento deste material não ser usual na região.

Por fim, esta análise foi realizada no produto final, Bucha, onde esta já apresentava camada de proteção contra corrosão, zincada. As influências geradas através de intermetálicos entre o metal base e a camada de zinco não foram consideradas (NETO, 2019).

4.2 ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL

Na Análise Química do material, os resultados são apresentados através da Tabela 5, bem como os valores especificados nas suas respectivas normas, na qual se pode verificar pequenas diferenças em relação as composições químicas de alguns elementos, porém isso não descaracteriza que ambos os materiais possam ser considerados como sendo de baixo carbono.

Tabela 5: Composição Química dos materiais

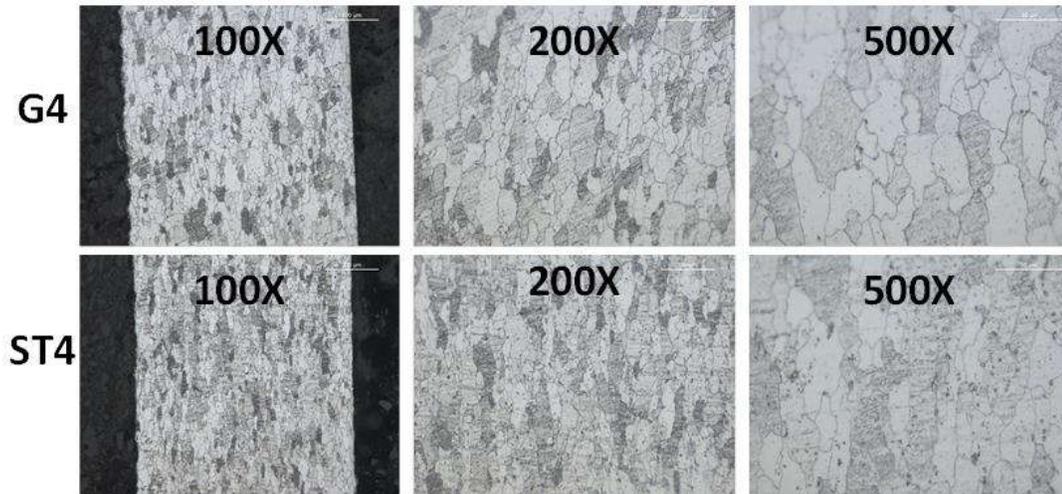
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	Ti	Nb	W	Pb	Sb	Zn
Informação DIN 13139	<0,080	-	<0,400	<0,030	<0,030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ST4 - CP01	0,041	0,013	0,214	0,015	0,007	0,028	0,013	0,004	0,053	0,017	0,005	<0,0005	<0,001	0,010	0,007	<0,001	0,021
ST4 - CP02	0,041	0,016	0,192	0,013	0,008	0,009	0,008	0,001	0,049	0,008	0,007	<0,0005	<0,001	0,010	0,007	<0,001	0,020
ST4 - CP03	0,041	0,015	0,214	0,014	0,006	0,028	0,012	0,003	0,042	0,016	0,007	<0,0005	<0,001	0,013	0,007	<0,001	0,020
Informação NBR 5007	<0,080	-	<0,500	<0,030	<0,035	-	-	-	>0,020	-	-	-	-	-	-	-	-
G4 - CP01	0,029	0,016	0,192	0,014	0,009	0,009	0,010	0,001	0,048	0,008	0,006	<0,0005	<0,001	0,008	0,006	<0,001	0,017
G4 - CP02	0,032	0,016	0,192	0,013	0,008	0,009	0,008	0,001	0,049	0,008	0,007	<0,0005	<0,001	0,010	0,007	<0,001	0,015
G4 - CP03	0,031	0,016	0,193	0,014	0,009	0,009	0,010	0,001	0,049	0,008	0,007	<0,0005	<0,001	0,010	0,007	<0,001	0,015

Para o resultado de análise química, têm-se estes como satisfatórios uma vez que os valores apresentados foram próximos entre os dois materiais. Tanto para o G4 como para o ST4, os valores atendem suas respectivas normas, ou seja, estão dentro das especificações. Os demais elementos, cujo os valores não estão especificados na norma, são considerados como residuais e foram analisados em relação a dispersão de seus valores, nos quais não apresentam variações consideráveis entre os dois materiais analisados.

4.3 MICROESTRUTURA DO MATERIAL

Em relação à microestrutura dos materiais, conforme apresentado na Figura 22, ambas apresentaram base Ferrita, onde se constata que não há diferenças significativas entre os materiais estudados.

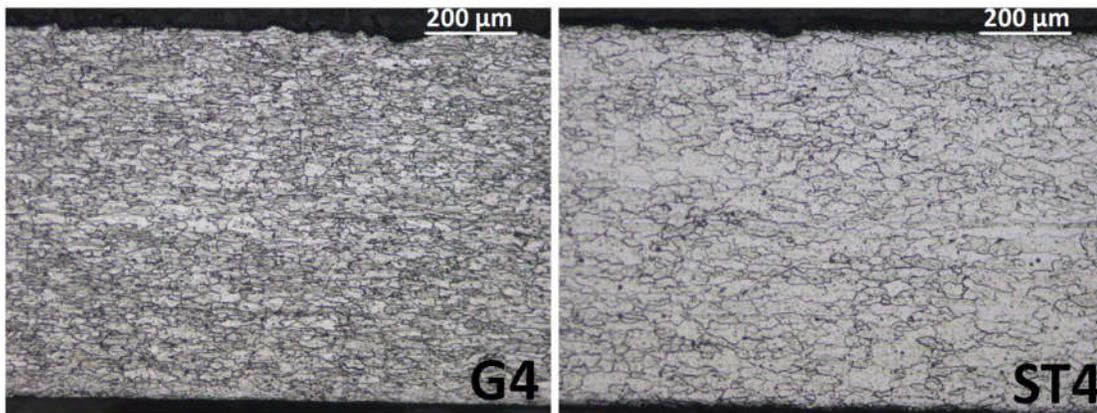
Figura 22: Metalografia G4 e ST4 - Ampliações de 100, 200 e 500X



Fonte: Elaborado pelo autor

Foi realizada também uma análise do tamanho do grão conforme DIN 643 (2003) e com ataque de Picral em 3 corpos de prova para cada material, a Figura 23 apresenta a imagem de 1 CP de cada material. O material G4 apresenta grãos de tamanho 3, 4 e 5, na maioria grãos de tamanho 4, raramente se vê grãos 2 e 6. No material, ST4 há grãos de tamanho 2, 3 e 4, na maioria de tamanho 3, raramente se vê um grão de tamanho 5.

Figura 23: Comparativo de tamanho de grão entre G4 (esq.) e ST4 (dir.)



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Metalografia foi possível verificar estruturas bases de Ferrita semelhantes entre os materiais, diferentemente do tamanho de grãos, onde o material G4 apresentou um grão mais refinado, tamanho 4, do que o material ST4, tamanho 3. Segundo Dieter (1981) o tamanho do grão, ou seja, a quantidade de contornos de grão atua como uma barreira para a movimentação dos planos cristalinos, influenciando diretamente nos escorregamentos destes, onde um grão mais refinado provoca um aumento na resistência do material, o que pode justificar o aumento do Limite de resistência (R_m) no material G4, que será discutido posteriormente.

Madivala (2020) comenta que à medida que o refinamento de grãos aumenta, aumenta também a resistência e a tenacidade dos aços, isso ocorre devido ao fato do refinamento do tamanho de grão aumentar o limite de escoamento plástico do material, e conseqüentemente a resistência à tração, isto está diretamente ligado com a relação de Hall-Petch que implica na explicação que a resistência mecânica de um material, ou melhor, a dureza deste é uma função linear com grão férrico elevando na potência $-1/2$, desconsiderando os valores tabelados para cada material que completam a teoria deste. A Equação (16) apresenta relação de Hall-Petch onde:

σ_y é o limite de escoamento do material;

σ_o é a resistência do material;

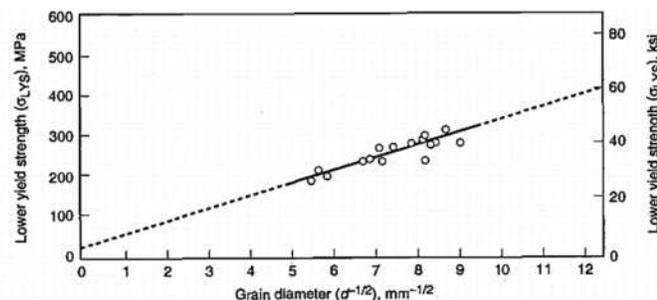
k_y é uma constante do material;

$d^{1/2}$ é o diâmetro do grão elevada na potência $-1/2$.

$$\sigma_y = \sigma_o + k_y d^{1/2} \quad (16)$$

Destaca-se que σ_o e k_y são as constantes responsáveis em fazerem lineares a relação do tamanho de grão ($d^{1/2}$) e o limite de escoamento do material (σ_y). A relação linear é facilmente identificada na Figura 24 que apresenta a variação do valor do limite do escoamento do material em função do tamanho do grão férrico em um aço baixo carbono.

Figura 24: Relação Hall-Petch para um aço baixo carbono



Fonte: Adaptado de: ASM Handbook, 1997

4.4 ENSAIO DE DUREZA

Em relação à dureza dos materiais, a Tabela 6, apresenta os valores encontrados no ensaio de dureza. Estes foram satisfatórios, pois encontram-se na faixa de dureza especificada das bobinas pelo fornecedor, ou seja, de 80 a 100 HV10.

Tabela 6: Valores de dureza

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média
ST4 - Pç1	83,2	86,2	84,2	84,5
ST4 - Pç2	81,1	79,7	80,2	80,3
ST4 - Pç3	81,1	89,7	85,5	85,4
Média ST4	81,80	85,20	83,30	83,43
Desvio pad.	1,21	5,07	2,76	2,72
G4 - Pç1	85,9	89,7	87,5	87,7
G4 - Pç2	86,9	86,4	88,6	87,3
G4 - Pç3	82,5	88,5	84,3	85,1
Média G4	85,10	88,20	86,80	86,70
Desvio pad.	2,31	1,67	2,23	1,40

*Valores em HV10

Com os dados obtidos nos ensaios de Dureza, o material G4 apresentou, em média, 3 pontos (HV10), que representa, aproximadamente, 4% maior em relação ao ST4. Isso indica que o material G4 tende a apresentar valores de dureza finais maiores, o que resultaria em um comportamento com menor ductilidade e, conseqüentemente, favorecendo a formação de trincas, pois a ductilidade é a característica que um determinado material apresenta de ser moldado sem que haja rompimento abrupto, isso ocorre devido a facilidade da movimentação dos planos atômicos destes, ou seja, menor dureza, uma vez que a dureza está diretamente relacionada a ligação atômica do material.

4.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS A TRAÇÃO E CURVA DE ESCOAMENTO DAS CHAPAS

Para uma melhor visualização dos resultados encontrados no ensaio de Tração, a Tabela 7 apresenta todos os valores em função da média aritmética, e seus respectivos desvios padrões, para cada sentido de laminação do material (0, 45 e 90°), onde fica convencionado que o 0° representa o sentido de laminação do material, das seguintes características:

- Limites de resistência (R_m);
- Limite convencional de escoamento ($R_{p0,2}$);

- Percentual de alongamento (A);
- Coeficiente de resistência (C);
- Coeficiente de encruamento (n);
- Tensão de escoamento inicial (K_{f0}).

Tabela 7: Resultados de ensaio de Tração e curva de escoamento

Ensaio	Propriedades mecânicas á Tração do material			Equação de Resistência ao Escoamento de Hollomon: $k_f = C \cdot \varphi^n$		
	R_m (Mpa)	$R_{p0,2}$ (Mpa)	A (50mm) (%)	C (Mpa)	n (-)	K_{f0} (Mpa)
Média ST4 - 0°	346,55	209,22	14%	608,09	0,39	223,58
Desvio pad.	1,61	8,79	2%	1,98	0,00	3,76
Média ST4 - 45°	360,77	218,41	11%	643,56	0,40	234,73
Desvio pad.	7,24	7,59	1%	20,89	0,02	5,72
Média ST4 - 90°	349,31	213,41	12%	605,12	0,39	227,54
Desvio pad.	3,33	2,82	0%	3,42	0,01	3,83
Média G4 - 0°	360,85	211,78	13%	590,00	0,39	225,88
Desvio pad.	11,05	12,54	0%	7,28	0,00	7,93
Média G4 - 45°	374,97	206,70	12%	625,67	0,40	234,34
Desvio pad.	5,94	7,61	0%	5,44	0,00	5,72
Média G4 - 90°	353,34	203,46	13%	562,71	0,37	222,91
Desvio pad.	7,57	5,80	0%	10,70	0,01	3,24

Já a Tabela 8 apresenta o resultado das médias das direções três direções (0, 45 e 90°) para: R_m , $R_{p0,2}$, A, C, n e K_{f0} dos materiais ST4 e G4 bem como os desvios padrões relacionadas a esta média. Os resultados obtidos através dos ensaios de Tração dos materiais foram satisfatórios, uma vez que estes não divergem significativamente entre si, destaca-se, porém, que há diferenças entre as direções de ângulos (0, 45 e 90°) ensaiados, conforme já era esperado, pois para matérias de baixo carbono e com espessura delgada seu comportamento é anisotrópico, ou seja, haverá resultados diferentes para cada direção, devido a orientação preferencial dos grãos no metal (PADMANABHAN, 2019). Para os valores de limites de resistência (R_m) do material G4, estes são, em média, 4% maiores do que o ST4. Já para o limite convencional de escoamento ($R_{p0,2}$) ocorre o inverso, onde os valores do G4 são, em média, 2% menores do que o ST4. Para o coeficiente de resistência (C) este

apresentou um valor médio 3% maior do G4 em relação ao ST4. Já para o Alongamento (A), o coeficiente de encruamento (n) e a tensão de escoamento inicial (K_{f0}) do material, estes tendo um comportamento médio de somente 1% de diferenças, não sendo valores significativas, ficando todos com valores muito próximos.

Tabela 8: Médias dos valores de R_m , $R_{p0,2}$, A, C, n e K_{f0} dos materiais ST4 e G4

Ensaio	Propriedades mecânicas á Tração do material			Equação de Resistência ao Escoamento de Hollomon: $k_f = C \cdot \varphi^n$		
	R_m (Mpa)	$R_{p0,2}$ (Mpa)	A (50mm) (%)	C (Mpa)	n (-)	K_{f0} (Mpa)
Média ST4 - 0°	346,55	209,22	14%	608,09	0,39	223,58
Média ST4 - 45°	360,77	218,41	11%	643,56	0,40	234,73
Média ST4 - 90°	349,31	213,41	12%	605,12	0,39	227,54
Média ST4	353,66	213,81	13%	625,82	0,40	229,15
Desvio pad.	10,05	6,50	3%	25,08	0,01	7,88
Média G4 - 0°	360,85	211,78	13%	590,00	0,39	225,88
Média G4 - 45°	374,97	206,70	12%	625,67	0,40	234,34
Média G4 - 90°	353,34	203,46	13%	562,71	0,37	222,91
Média G4	367,91	209,24	12%	607,84	0,39	230,11
Desvio pad.	9,98	3,59	1%	25,22	0,01	5,98

Através do ensaio de Tração, foi possível verificar, mesmo com o comportamento semelhante dos materiais, que o material ST4 apresentou um comportamento melhor, no que tange a deformação plástica, pois este apresentou valores de limite convencional de escoamento ($R_{p0,2}$) maiores do que o material G4. Isso implica em uma área de deformação plástica maior, o que possibilitaria um encruamento no material menor, e possivelmente a ausência de trincas. Destaca-se também o Limite de resistência (R_m) com o material G4 sendo maior que o ST4, como já era esperado, pois como acima mencionado, a área de escoamento foi maior.

4.6 ENSAIO ERICHSEN

O Ensaio Erichsen foi realizado em três chapas de cada tipo de material, G4 e ST4, representados na Figura 25, que mostra os corpos de provas já ensaiados.

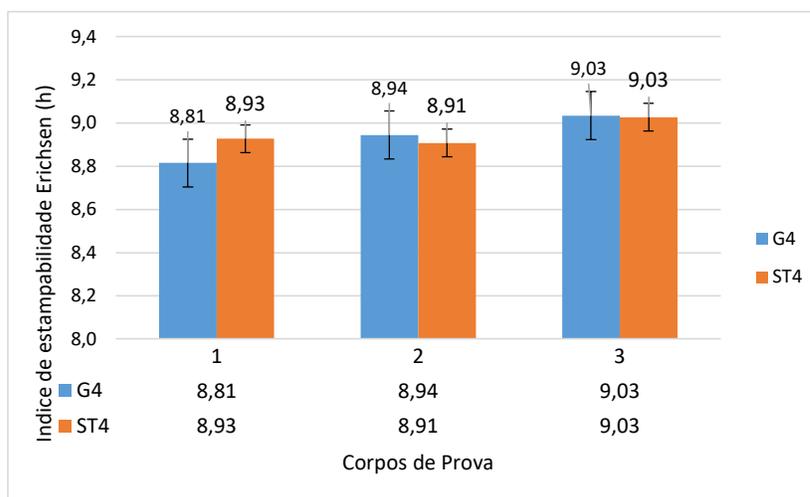
Figura 25: Chapas dos materiais G4 e ST4 após ensaio Erichsen



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 26 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios Erichsen para ambos os materiais, G4 e ST4, onde se conclui que ambos têm comportamentos próximos, devido aos valores das médias e desvio padrões para o G4 e ST4 sendo $8,94 \pm 0,11$ e $8,95 \pm 0,06$, respectivamente.

Figura 26: Resultado ensaio Erichsen materiais G4 e ST4



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o ensaio Erichsen os resultados foram satisfatórios, uma vez que estão muito próximos, na casa dos décimos, ou até mesmo idênticos. Utiliza-se o valor do fabricante, somente como referência, sendo 11 para o ST4 e 10,4 para o G4.

No ensaio Erichsen não foi possível verificar diferenças que possam invalidar qualquer hipótese de que o comportamento seja diferente, uma vez que os valores foram basicamente idênticos, diferenciando apenas 0,1 pontos, que representa 1, 1% de diferença.

4.7 ANISOTROPIA

A Tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de Anisotropia, assim como os valores dimensionados, para as quais foram realizadas 3 medições para cada valor. Convém salientar que para os valores de espessura final, devido à espessura delgada dos CP's (0,80 – 0,85mm), além das medições com micrômetro, foi utilizada a lei da constância dos volumes (FERRARI, 2004), onde estas apresentaram valores muito próximos, validando assim os valores encontrados.

Tabela 9: Resultados ensaio Anisotropia

CP's	Espessura Inicial (mm)	Espessura Final (mm)	Δ Espessura	Largura Inicial (mm)	Largura Final (mm)	Δ Largura	r_{0°	r_{45°	r_{90°	Coefficiente de Anisotropia Planar Tendência ao Orelhamento (Δr)	Coefficiente médio de Anisotropia (r_m)	Média dos materiais (r_m)
ST4 - CP1	0,799	0,760	0,039	10,003	8,990	1,083	2,14	1,31	2,58	1,05	1,83	1,75
ST4 - CP2	0,802	0,748	0,053	10,050	9,030	1,077	1,55	1,17	2,20	0,70	1,53	
ST4 - CP3	0,806	0,769	0,037	10,027	8,927	1,083	2,44	1,42	2,29	0,94	1,89	
G4 - CP1	0,859	0,815	0,044	9,560	8,493	1,133	2,25	1,61	2,37	0,69	1,96	1,73
G4 - CP2	0,840	0,787	0,053	10,077	9,030	1,080	1,69	1,31	2,71	0,89	1,76	
G4 - CP3	0,859	0,817	0,042	10,060	8,980	1,053	2,261	1,026	1,544	0,88	1,46	

Os valores de Anisotropia encontrados do ensaio foram satisfatórios, uma vez que apresentaram resultados próximos em ambos os materiais, quando analisados na média, apesar da dispersão dos valores individuais.

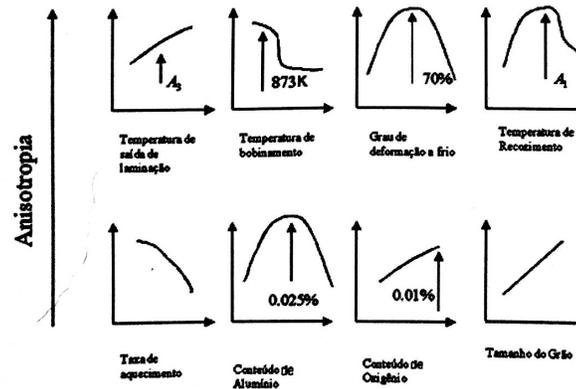
Destaca-se somente, a diferença entre as espessuras dos materiais, justificada por Padmanabhan (2019) onde a espessura entre os materiais de folha monolítica produz estado de tensões complexas durante a estampagem profunda, onde o material mais espesso tende a resistir mais a deformação. Todavia, com base nos resultados apresentados, a diferença de 0,05mm na espessura, de 0,85mm no G4 para 0,80mm no ST4, não influenciou nos resultados dos testes de Anisotropia para os materiais estudados, uma vez a norma ASTM E8M (2016) especifica que o valor máximo da espessura do corpo de prova reduzido deve ser 6 mm.

Em relação ao ensaio de Anisotropia, o coeficiente de Anisotropia médio (r_m), com os valores praticamente idênticos, sendo a média entre as três chapas ensaiadas de 1,73 (G4) e 1,75 (ST4), indica que o comportamento das tensões dos materiais tende a serem também semelhantes. Estes valores de r_m , apesar de serem comparativos, foram satisfatórios em vista do fato de estarem muito próximos ao valor indicado para este material de 1,6 (SCHAEFFER, 2004). Há uma pequena diferença em relação Anisotropia Planar (Δr), coeficiente de orelhamento, de 0,08 pontos, o que se pode atribuir esta diferença a diversos fatores provenientes ao processo de

fabricação da chapa, tais como: temperatura de saída da laminação, temperatura de bobinamento, taxa de aquecimento, temperatura de recozimento, etc.....

Por fim, existem outros fatores, Figura 27, que influenciam diretamente no índice Anisotropia em aços que são laminados a frio, estes estão relacionados a: temperaturas (saída de laminação, recozimento e bobinamento), taxa de aquecimento, % de elementos (alumínio e oxigênio), grau de deformação a frio, e tamanho do grão.

Figura 27: Fatores de influência na Anisotropia de aços laminados a frio



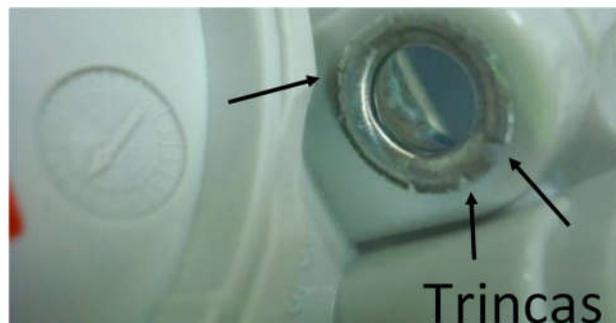
Fonte: Adaptado de: SCHAEFFER, 2004

4.8 TESTE DE ESTAMPAGEM

4.8.1 Material G4

Atualmente, após o processo de montagem da Bucha de Proteção na Carcaça de Arranque, onde a parte superior da Bucha de Proteção é remançada na Carcaça de Arranque, existe o aparecimento de trincas, conforme Figura 28. No decorrer das solicitações de partida do motor há o contato da Bucha de Proteção com o Cordão de Arranque, podendo ocasionar danificação deste e a perda de sua função primária.

Figura 28: Trincas após remanche da Bucha de Proteção na Carcaça de Arranque



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 29 apresenta uma tira do processo progressivo para fabricação da Bucha de Proteção retirado durante produção em série do material atual, ou seja, G4.

Figura 29: Tira progressiva do material G4



Fonte: Elaborado pelo autor

4.8.2 Material ST4

Para validação final do trabalho, foi realizado um teste de estampagem com o material ST4 com uma tira de aproximadamente 1200mm, equivalente a 2x a largura da ferramenta, como pode ser visto na Figura 30.

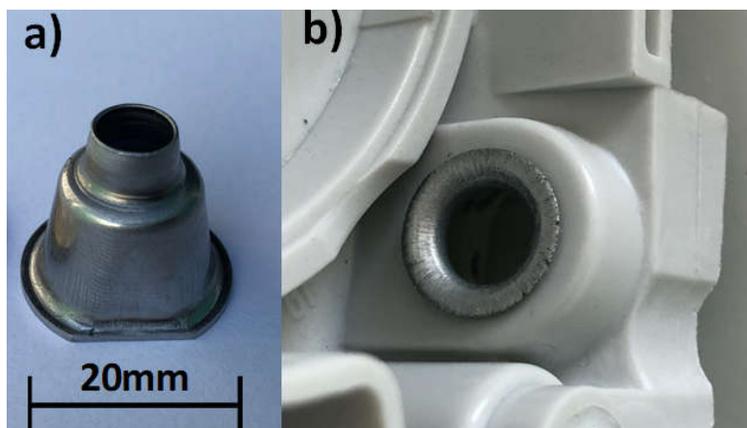
Figura 30: Tira progressiva do material ST4



Fonte: Elaborado pelo autor

Após, foi realizada a montagem da Bucha de Proteção em uma Carcaça de Arranque, Figura 31, e como pode ser visto, não houve o surgimento de trincas, validando os resultados comparativos dos materiais.

Figura 31 - Bucha de Proteção com ST4 antes (a) e depois (b) da montagem na Carcaça de Arranque

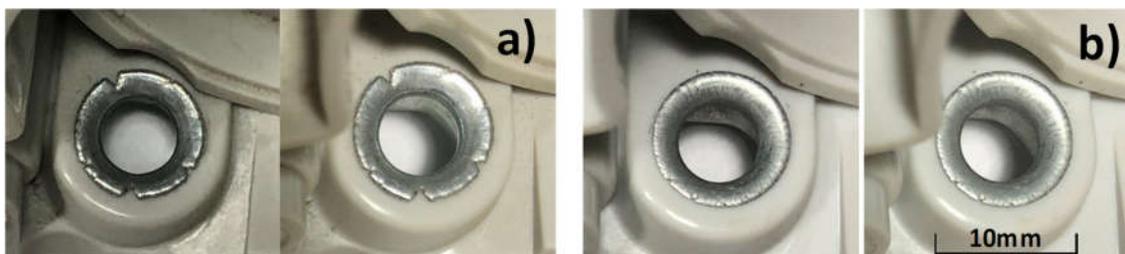


Fonte: Elaborado pelo autor

4.8.3 Comparativo entre G4 e ST4

Foi realizado um comparativo entre os dois materiais, G4 e ST4, em uma mesma aplicação, Figura 32, onde fica evidente a diferença entre os dois materiais. Notou-se que o material ST4 apresenta algumas pequenas fissuras, trincas, na parte externa da Bucha de Proteção, o que não é necessariamente um problema, pois esta área é distante do raio onde ocorre o contato entre o Cordão de Arranque com a Bucha de Proteção.

Figura 32: Comparativo aplicação final da Bucha de Proteção no G4 (a) e ST4 (b)



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, foi finalizado o estudo, deixando evidente o não surgimento de trincas na região mais crítica, raio de contato com o Cordão de Arranque. Isto ocorreu, devido principalmente as diferenças entre as microestrutura e dureza dos dois materiais, diferenças estas já discutidos e apresentadas, pois para as demais propriedades mecânicas, de uma forma geral, apresentaram resultados similares, o que valida a sugestão de equivalência entre os dois materiais.

Convém salientar que outras diferenças provenientes ao processo de fabricação da chapa, tais como: temperatura de saída da laminação, temperatura de bobinamento, taxa de aquecimento, temperatura de recozimento, etc..., também influenciam diretamente a não incidência de trincas, que não foram estudados aqui, mas se apresentam de forma intrínseca no resultado positivo no teste de comparativo de estampabilidade na mesma ferramenta de produção realizado entre o G4 e o ST4, onde o ST4 não apresentou a incidência de trincas, sendo esta a principal vantagem da substituição. Como desvantagem está o lead time de aquisição do produto, de aproximadamente 60 dias, que é de fácil solução, onde o departamento de planejamento deve somente antecipar a aquisição da matéria prima, além do fato de poder haver um aumento do valor do material, em consequência da variação da taxa cambial.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos foi possível concluir que os materiais estudados, G4 e ST4, tem comportamento, em relação à estampabilidade destes, semelhantes, porém o ST4 não irá proporcionar trincas durante a aplicação da Bucha de Proteção na Carcaça de Arranque. Esta conclusão está baseada nos resultados apresentados dos principais ensaios de caracterização das propriedades para conformação de materiais, tendo:

- Maior dureza no G4, que apresenta um comportamento com menor ductilidade e, conseqüentemente, favorecendo a formação de trincas.
- Valor de limite convencional de escoamento ($R_{p0,2}$) menor no G4, e conseqüentemente uma área de deformação plástica menor;
- A diferença dos tamanhos de grãos, que está atrelada aos processos de fabricações dos materiais, onde grãos mais refinados dificultando a movimentação dos planos cristalinos;
- Sem diferenças significativas nos resultados entre os dois materiais para os ensaios Erichsen e Anisotropia, com os resultados praticamente idênticos.

Em vista dos fatos acima expostos, foi validada a possibilidade de aplicação do material ST4 na estampagem de Bucha de Proteção para motores a combustão apresentada como problema neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ASM Handbook, Volume 20: Materials Selection and Design. **Effects of Composition, Processing, and Structure on Properties of Irons and Steels.** Dieter, p. 357-382. 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E415-17:** Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry. Pennsylvania, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E517-00:** Standard Test Method for Plastic Strain Ratio for Sheet Metal. Pennsylvania, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8M-16A:** Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Pennsylvania, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5007:** Tiras relaminadas de aço de baixo teor de carbono para estampagem - Especificações. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13284:** Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica - Procedimento. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16282:** Folhas e chapas de aço de baixo carbono - Determinação da anisotropia plástica e do expoente de encruamento - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR16281:** Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen modificado. Rio de Janeiro, 2014.
- DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica.** 2. ed. Guanabara Dois. Rio de Janeiro, 1981.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 10139.** Cold rolled uncoated mild steel narrow strip for cold forming. Berlin, 1997
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN ISO 643.** Steel - Micrographic determination of the apparent grain size. Berlin, 2003.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 10002:** Metallic materials; tensile testing; part 1: method of test. Brussels, 2001.
- FERRARI, José Luiz. **Caracterização de materiais para o processo de estampagem.** 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

QAYYUM, Faisal; SHAH, Masood; AFZAL, Jawad. **The effect of anisotropy on the intermediate and final form in deep drawing of SS304L, with high draw ratios: Experimentation and numerical simulation.** 14th International Symposium on Advanced Materials, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 146, 2016. Disponível em: < <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/146/1/012031/pdf>>. Acesso em: 01 Abril 2020.

HOWSTUFFWORKS. **Chainsaw.** Disponível em: <<http://home.howstuffworks.com/chainsaw.htm>>. Acesso em 05 Junho 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6507-1:** Metallic materials - Vickers hardness test. Part 1: Test method. Geneva, 2005.

KOLL, P.; LIMA, D.; SCHAEFFER, L. **Estudo para descrever a obtenção da curva de escoamento do alumínio por ensaios de compressão.** Revista Corte & Conformação de Metais. São Paulo, Editora Aranda, n. 28, p.74-79. Agosto, 2007.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** 2. ed. Edgard Blucher. São Paulo, 2011.

MANG , THEO; DRESEL, WILFRIED. **Lubricants_and_Lubrication.** 2. ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim. 2007

MADIVALA, Manjunatha; ULRICH, Alexander Schwedt; BLECK, Prah, Wolfgang. **Anisotropy and strain rate effects on the failure behavior of TWIP steel: A multiscale experimental study.** International Journal of Plasticity., v. 115, p. 178-199, April 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749641918304716>>. Acesso em: 07 Abril 2020.

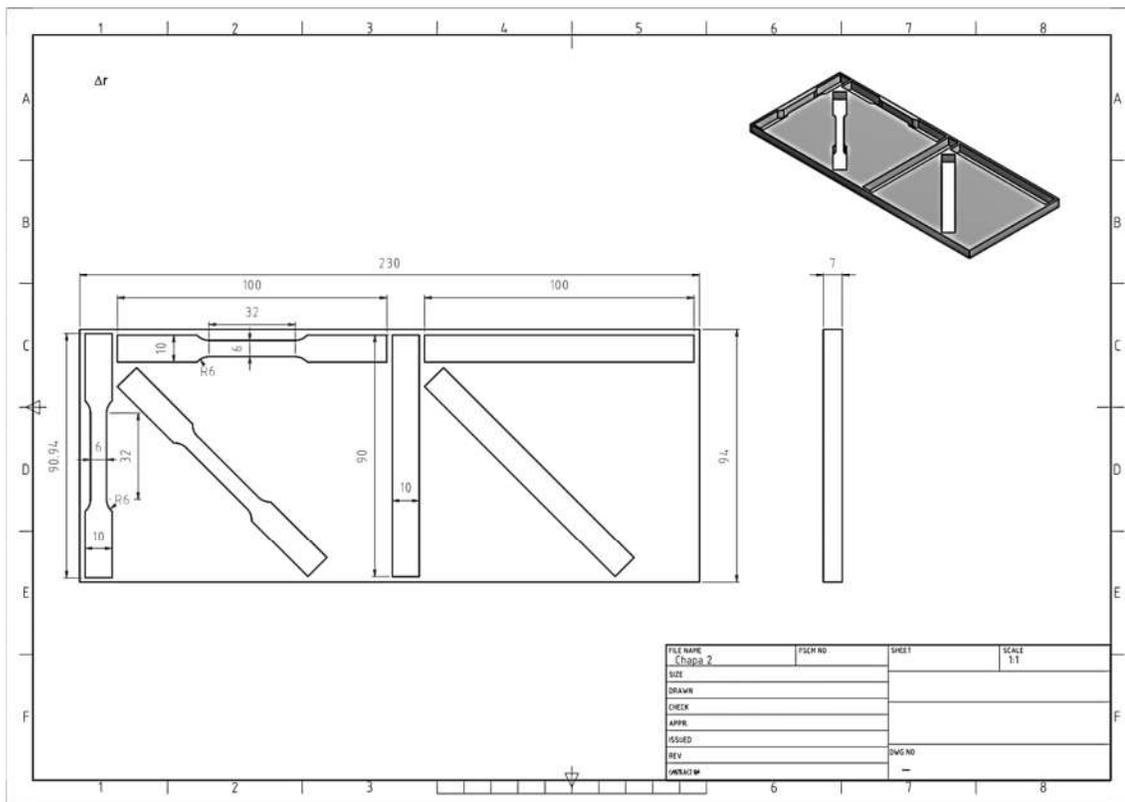
NETO, Bruno Kneipel; CERQUEIRA, Fabricio; FILHO, José Francisco da Silva; CORREIA, Mylena Inaiê. **Metallographic Techniques Procedures for the Intermetallic Layer Morphology Characterization in Hot Dip Galvanized Steels – GI,** p. 171-177. In: 56° Seminário de Laminação e Conformação de Metais, São Paulo, 2019.

PADMANABHAN. R.; Baptista, Oliveira, A.J.; Menezes, M.C., L.F. **Effect of anisotropy on the deep-drawing of mild steel and dual-phase steel tailor-welded blanks.** Journal of Materials Processing Technology, v 184, p. 288–293, April. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606009459>>. Acesso em: 01 Junho 2019.

SCHAEFFER, L.; **Conformação de Chapas Metálicas.** Ed. Imprensa Livre. Porto Alegre, 2004.

_____.: **Manufatura por Conformação Mecânica: Projetar – Fabricar – Utilizar.** Ed. Imprensa Livre. Porto Alegre, 2016

APÊNDICE A – DESENHO PARA REALIZAR PROGRAM DE CORTE A LASER



APÊNDICE B – CERTIFICADO DE MATÉRIA-PRIMA G4



Número Identificação M.P.	Ordem Produção Heat	Quantidade Quantity (Kg)	Ensaio de Tração / Tensile test						Ensaio de Dureza / Hardness test		Embut. / Cupping Encheim (mm)		Dobramento Bend test Dir Ang		Ensaio Metalográfico Metallographic tests Inclusões TG []	
			Ensaio de Tração / Tensile test			Dureza HRB Hardness test			Embut. / Cupping Encheim (mm)		Dobramento Bend test Dir Ang		Ensaio Metalográfico Metallographic tests Inclusões TG []			
			LE / ys (MPa)	LR / ts (MPa)	AL / el (%)	Dureza HRB Hardness test		Embut. / Cupping Encheim (mm)		Dobramento Bend test Dir Ang		Ensaio Metalográfico Metallographic tests Inclusões TG []				
410359	8452475	1.098,0000	198,00	303,0	40,00	44 / 46		11,50								
			Composição Química / Chemical composition (%)													
Número Certificado Usina			C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	
410359	0343983		0,030	0,002	0,153	0,012	0,009	0,037								

Certificamos que o material aqui relacionado foi produzido, inspecionado, ensaiado e analisado de acordo com os requisitos das normas ou especificações solicitadas.

We hereby certify that the material here reported has been produced, examined, tested and analyzed in accordance with the requirement of standards or specifications requested.

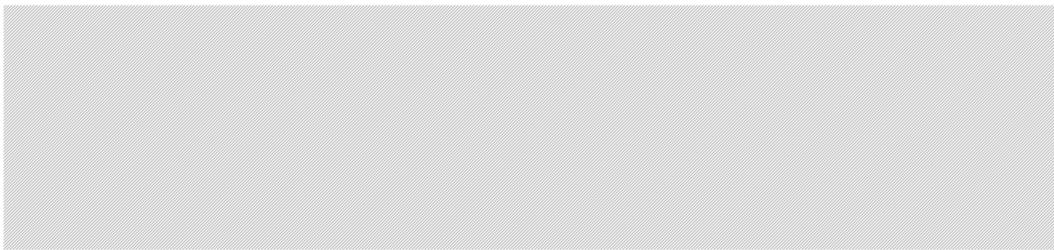
Observações / Remarks:



Legenda / Legend				Responsável / Authorized signature:
Dobramento / Bend test		Ensaio Metalográfico / Metallographic test		
Dir - direção	Ang = ângulo	Inclusões - XYZ (Norma ASTM E 45 I)		Leandro da Silva Vargas
L = longitudinal	G = 90°	X - Tipo	Y - Quantidade de 1 a 4	
T = transversal	H = 180°	A = sulfetos	Z - Espessura	
		B = aluminatos	F = série fina	
		C = silicatos	G = série grossa	
		D = óxidos		
			TG = Tamanho de grão (1 a 8)	
			F = ferrítico	
			A = austenítico	

Programa: DZCQ007

APÊNDICE C – CERTIFICADO DE MATÉRIA-PRIMA ST4



Analyse Datum	Analyse Programm	Prüfer					
28.11.2013 13:18:11	Fe-10-MO	QS Werkstoffe D1					
Materialnummer	Charge	Lieferant	WE Nr.	Werkstoffnorm	Werkstoffanzeige		
				DIN Fe	DC04		
Meas.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	%	%	%	%	%	%	%
	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.
1	0,070	<0,005	<0,31	0,009	0,013	0,021	0,006
2	0,065	<0,005	<0,31	0,011	0,012	0,021	0,007
W. Min			0,35				
<x>	0,068	<0,005	<0,31	0,010	0,013	0,021	0,006
W. Max	0,100		0,45	0,040	0,040		
Meas.	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V
	%	%	%	%	%	%	%
	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.
1	0,025	0,026	0,003	0,035	0,014	0,003	<0,002
2	0,028	0,026	0,002	0,035	0,013	0,003	<0,002
<x>	0,027	0,026	0,002	0,035	0,014	0,003	<0,002
Meas.	W	Pb	Sn	As	Zr	Ca	Ce
	%	%	%	%	%	%	%
	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.
1	0,055	<0,010	0,002	<0,005	<0,003	0,0005	0,015
2	0,063	<0,010	0,002	<0,005	<0,003	<0,0005	0,015
<x>	0,059	<0,010	0,002	<0,005	<0,003	0,0005	0,015
Meas.	B	Zn	La	Fe			
	%	%	%	%			
	Konz.	Konz.	Konz.	Konz.			
1	<0,0005	0,004	<0,002	99,4			
2	<0,0005	0,004	<0,002	99,4			
<x>	<0,0005	0,004	<0,002	99,4			