

## CARACTERIZAÇÃO DE FALHA DE UM COMPONENTE AUTOMOTIVO EM AÇO LNE 380 NA OPERAÇÃO DE ESTAMPAGEM

### FAILURE CHARACTERIZATION OF A COMPONENT AUTOMOTIVE IN STEEL LNE 380 IN THE STAMPING OPERATION

Rodrigo Amancio da Silva <sup>1, i</sup>  
Odilon de Moraes Junior <sup>2, ii</sup>  
Fernando Antonio Corrêa <sup>3, iii</sup>  
Antenor Ferreira Filho <sup>4, iv</sup>  
Mateus Botani de Souza Dias <sup>5, v</sup>

Data de submissão: (07/12/2023) Data de aprovação: (29/10/2025)

#### RESUMO

Os componentes automotivos são itens de alta responsabilidade, pois deles, dependem vidas humanas, sendo todos os seus componentes caracterizados como de alta performance. Um dos itens que compõem esse produto é chamado de suporte do para-lama traseiro. Trata-se de um componente produzido a partir de uma chapa de aço microligado ABNT NBR LNE 380 que confere sustentação ao conjunto do chassi. Neste trabalho foram realizados ensaios em máquina de tração para determinação das propriedades mecânicas do material como Limite de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ), Limite de resistência ( $\sigma_{máx}$ ), e Alongamento ( $\Delta l$ ). Após os ensaios metalúrgicos, foi realizada a troca do tipo de prensa utilizada no processo, partindo de uma prensa excêntrica para uma prensa hidráulica. Como resultado pode-se destacar o comportamento do material quanto a influência da velocidade de conformação mecânica durante o processo de fabricação. Esse fato se confirmou na prática, quando aplicada a prensa hidráulica para realizar as operações de dobramento.

**Palavras-chave:** caracterização de falhas; NBR LNE 380; componente automotivo; aço microligado; estampagem.

---

<sup>1</sup> Graduado em Tecnologia em Processos Metalúrgicos pela Escola e Faculdade SENAI de Tecnologia Nadir Dias Figueiredo – Osasco SP. E-mail: rodrigoamancio2000@gmail.com

<sup>2</sup> Docente e Mestre em Engenharia Metalúrgica da Escola e na Faculdade de Tecnologia SENAI Nadir Dias Figueiredo - Osasco SP. E-mail: odilon.junior@sp.senai.br

<sup>3</sup> Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais; Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais; Engenheiro de Soldagem/EFW-DVS/SLV; Professor Assistente na Faculdade de Tecnologia SENAI Nadir Dias Figueiredo - Osasco SP. E-mail: fernando.correa@sp.senai.br

<sup>4</sup> Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais e Professor Adjunto na Faculdade de Tecnologia SENAI Nadir Dias Figueiredo. E-mail: antenor.filho@sp.senai.br.

<sup>5</sup> Doutor em Engenharia de Materiais e Coordenador de Atividade Técnica e Pedagógica na Faculdade de Tecnologia SENAI Nadir Dias Figueiredo – Osasco SP. E-mail: mateus.dias@sp.senai.br.

## ABSTRACT

Automotive components are items of high responsibility, as human lives depend on them, and all of their components are characterized as high-performance. One of the items that make up this product is called a rear fender support. It is a component produced from an ABNT NBR LNE 380 microalloyed steel plate that provides support to the chassis assembly. In this work, tests were carried out in a traction machine to determine the mechanical properties of the material, such as Yield Limit ( $\sigma_{esc}$ ), Resistance Limit ( $\sigma_{max}$ ), and Elongation ( $\Delta l$ ). After the metallurgical tests, the type of press used in the process was changed, starting from an eccentric press for a hydraulic press. As a result, the behavior of the material can be highlighted regarding the influence of the speed of mechanical conformation during the manufacturing process.

**Keywords:** fault characterization; NBR LNE 380; automotive componente; microalloyed steel; stamping.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Problema de pesquisa

O problema identificado para a elaboração desse projeto de pesquisa, foi a presença de trincas no aço ABNT NBR LNE 380 durante os processos de estampagem.

### 1.2 Objetivo(s)

O objetivo desse projeto foi realizar análises metalúrgicas da matéria-prima, avaliar as variáveis do processo de estampagem e comparação de utilização de prensa mecânica x prensa hidráulica.

### 1.3 Justificativa

A justificativa para esse estudo é minimizar a formação de trincas na matéria prima durante a estampagem, objetivando também levar mais subsídios de conhecimento técnico para melhoria contínua dos processos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A estampagem é um processo de conformação mecânica, geralmente realizada a frio, que contempla um conjunto de operações, onde uma chapa plana é sujeita a esforços mecânicos com o intuito de conferir uma nova forma geométrica para esta chapa.

A deformação plástica é atingida com a utilização de prensas de estampagem e com o emprego de dispositivos chamados estampos ou matrizes (Chiaverini, 1965).

De forma geral, o processo de estampagem compreende as seguintes operações:

- Corte;
- Dobramento;
- Estampagem profunda.

### Operação de corte

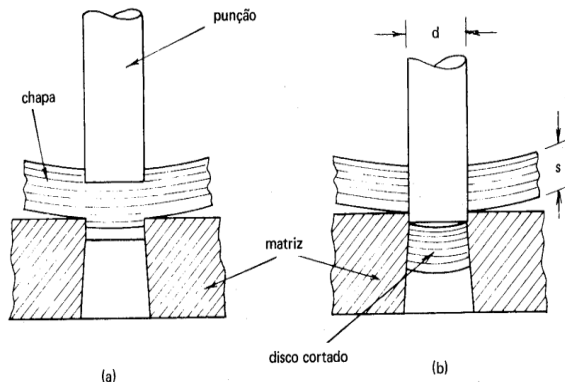
Este processo corresponde à obtenção de formas geométricas determinadas, a partir de chapas planas, utilizando uma ferramenta ou punção de corte que é aplicada utilizando

uma prensa que executa pressão sobre a chapa posicionada numa matriz. No momento em que o punção penetra na matriz, o esforço de compressão é convertido em esforço de cisalhamento e acontece o desprendimento de forma brusca de um pedaço da chapa (Chiaverini, 1965).

A espessura que deve ser penetrada pela ferramenta de corte, está diretamente ligada com a ductilidade do material. Se o material apresenta uma baixa ductilidade, somente uma pequena fração da espessura deverá ser penetrada, em contrapartida, para materiais de alta ductilidade esta penetração pode exceder ligeiramente a espessura da chapa (Dieter, 1981).

A Figura 1 mostra uma representação esquemática de uma operação de corte.

**Figura 1:** Operação de corte.



**Fonte:** Chiaverini, 1965.

Segundo (Koninck e Gutter, 1966) na operação de corte é preciso ultrapassar a resistência à ruptura do material.

A força necessária para essa ruptura pode ser expressa pela Equação 1:

$$E_p = 0,8 \times K_s \times L_s \times S \quad \text{Eq.( 1 )}$$

Onde:

$E_p$  = Força de corte (Kgf)

$K_s$  = Resistência ao cisalhamento (Kgf/mm<sup>2</sup>)

$L_s$  = Perímetro da região a ser cortada (mm)

$S$  = Espessura (mm)

$K_s$  = 0,8 x limite de resistência a tração

## 2.1 Operação de dobramento

Em operações simples de dobramento, para a fabricação de peças relativamente curtas, são utilizadas matrizes dispostas em prensas de estampagem (Chiaverini, 1965).

A operação de dobramento tem como objetivo, dar forma a uma superfície sem que se contraia ou modifique nenhuma dimensão desta mesma superfície (Helman; Cetlin, 2005).

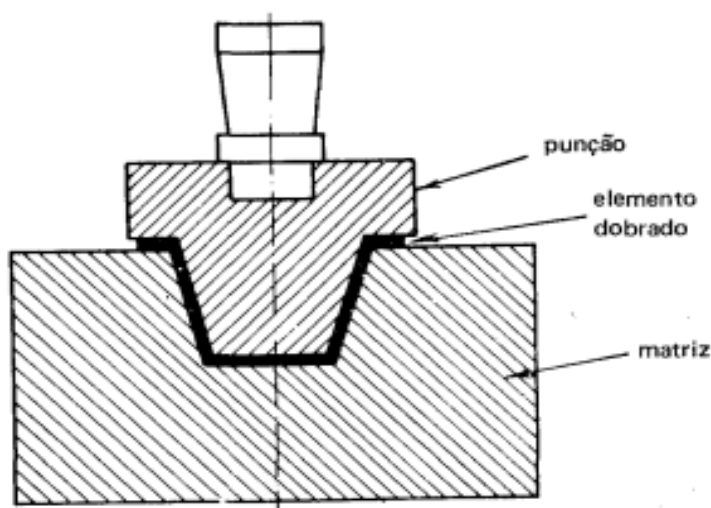
No dobramento, duas condições são importantes: o raio de curvatura e a elasticidade do material. Sempre se deve evitar os cantos vivos, para os raios de curvaturas que constituem de 1 a 2 vezes a espessura da chapa para materiais moles e de 3 a 4 vezes a espessura para

materiais de maior dureza (Chiaverini, 1965).

Na condição de dobramento elástico, abaixo do limite elástico, a deformação passa por metade da espessura da chapa, ou seja, na linha neutra. No caso de dobramento plástico, além de ultrapassar o limite elástico a linha neutra se aproxima da superfície interna durante a conformação. A deformação plástica é proporcional à distância da linha neutra, as fibras na superfície externa sofrem uma maior deformação em relação às internas que são contraídas. As fibras que se encontram na metade da espessura são chamadas fibras médias, com isso deverá ocorrer uma redução da espessura (direção radial) na dobra para que o volume seja mantido constante. Quanto menor o raio de curvatura, maior será a redução da espessura no dobramento (Dieter, 1981).

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática de dobramento de uma chapa.

**Figura 2:** Representação esquemática de dobramento.



**Fonte:** Chiaverini, 1986.

## 2.2 Estampagem profunda

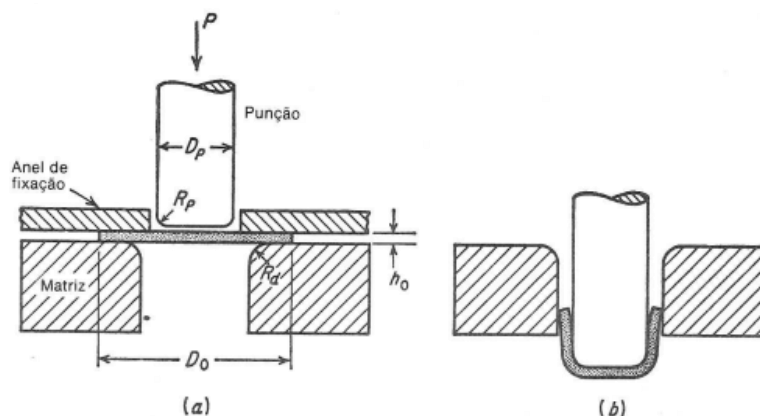
A estampagem profunda é um processo de fabricação utilizado para dar forma em chapas planas e produzir itens com geometria de copo tais como para-lamas de automóveis e cápsulas.

A estampagem profunda é realizada colocando-se um blank de dimensões pré-definidas sobre uma matriz e comprimindo o blank com uma ferramenta (punção) para dentro desta matriz (Dieter, 1981).

O emprego de chapas para a fabricação de componentes ocios possibilita a produção de peças com uma relação de dimensão e massa ou dimensão e consumo de matéria-prima excelente. A utilização de chapas com superfícies acabadas permite a produção de peças acabadas em poucas etapas de fabricação (Schaeffer, 2004).

A Figura 3 ilustra uma representação esquemática de uma operação por estampagem profunda.

**Figura 3:** Estampagem profunda de um copo cilíndrico.



**Fonte:** Dieter, 1981.

*Nota: (a) antes da estampagem; (b) após a estampagem*

Geralmente é necessária a utilização de fixadores ou grampos para comprimir o blank contra a matriz, com o intuito de evitar a formação de rugas na chapa a ser conformada. Isto é realizado com o auxílio de um dispositivo especial (anti-rugas) ou anel de fixação em prensas de efeito duplo.

A força aplicada na estampagem profunda é transmitida por meio de um “sistema do elo mais fraco” até um ponto de falha inicial, o qual teve sua resistência pouco aumentada por efeito do encruamento. A capacidade de encruamento de um material não apresenta um papel apreciável (Dieter, 1981).

Todo processo de estampagem profunda apresenta inicialmente um estiramento biaxial, no qual o fundo da peça é formado. Durante essa primeira fase do processo, a região deformada é o fundo da peça e sua espessura é diminuída.

A estampagem profunda de fabricação de peças seriadas. Sabendo disso, é de extrema importância ter como objetivo economizar material pois mesmo pequenas economias na peça única podem gerar resultados econômicos apreciáveis observando a fabricação de um lote inteiro (Schaeffer, 2004)

### 2.3 Resistência dos Materiais

A resistência dos materiais é o segmento da mecânica que estuda as relações entre as cargas externas que são aplicadas em um corpo deformável e a intensidade das forças internas que agem no interior deste corpo. Esse ramo também compreende o cálculo das deformações que o corpo sofre e possibilita o estudo de sua estabilidade quando aplicado forças externas (Hibbeler, 2004).

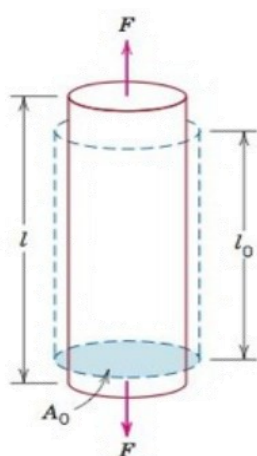
Tensão é definida de modo geral como a resistência interna de um corpo em relação a uma força aplicada sobre ele, por unidade de área. Deformação é definida como uma variação de uma dimensão qualquer de um corpo, por unidade da mesma dimensão quando é submetido a um esforço (Souza, 1982).

De modo geral, quando um corpo sofre deformação, esta não se mantém uniforme em todo seu volume, conseqüentemente, a mudança na geometria de cada segmento de reta no interior do corpo pode ter variações ao longo de seu comprimento (Hibbeler, 2010).

O comportamento mecânico pode ser verificado por meio de um ensaio tensão-deformação. Estes ensaios são comumente utilizados para metais em temperatura ambiente (Callister e Rethwisch, 2012).

A Figura 4 ilustra esquematicamente uma carga de tração produzindo um alongamento e uma deformação linear positiva.

**Figura 4:** Ilustração de uma carga de tração.



**Fonte:** Callister e Rethwisch 2012.

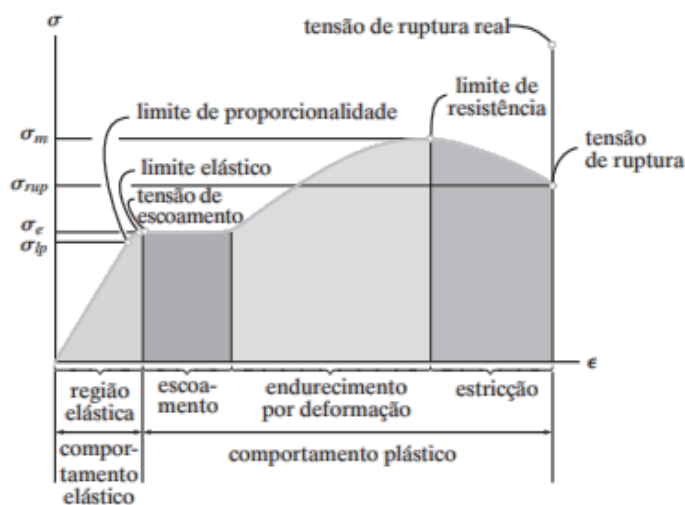
*Nota: (a) as linhas tracejadas representam a forma inicial do corpo antes da deformação; as linhas contínuas após a deformação.*

Um corpo de prova é deformado até sua ruptura, pela aplicação de uma carga de tração que é aumentada gradativamente e é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo da amostra (Callister e Rethwisch, 2012).

O levantamento do diagrama tensão-deformação é gerado pela deformação sofrida pelo corpo de prova e a carga externa aplicada de maneira gradativa. A aplicabilidade deste ensaio se deve ao fato de que este é de relativa facilidade e de simples execução (Garcia; Spim; Santos, 2012).

A figura 5 apresenta um diagrama tensão-deformação e suas regiões.

**Figura 5:** Diagrama tensão-deformação.



**Fonte:** Garcia; Spim; Santos, 2012.

- Região elástica: região correspondente a deformação inicial do corpo de prova, ao se cessar a aplicação das cargas o material retorna as suas dimensões iniciais sem deformação residual permanente (Garcia; Spim; Santos, 2012);
- Limite de proporcionalidade: tensão máxima de uma relação linear entre a tensão e a deformação. Define o limite da deformação elástica do corpo de prova (Garcia; Spim; Santos 2012);
- Tensão de escoamento: região de deslizamento de discordâncias, corresponde ao início da deformação plástica do corpo de prova, nesse ponto a tensão pode sofrer oscilações dependendo da acomodação de discordâncias na rede cristalina do material (Garcia; Spim; Santos, 2012);
- Limite de resistência: é definido como a tensão máxima que um material resiste sem apresentar nenhuma característica de fratura, seja ela interna ou externa. Após esse ponto o material começa a apresentar o processo de fratura (Garcia; Spim; Santos, 2012);
- Tensão de ruptura: é definida pela tensão que ocorrerá a fratura total do corpo de prova (Garcia; Spim; Santos, 2012).

Durante o processo de laminação de chapas metálicas são utilizadas altas temperaturas para facilitar sua conformação, essa condição gera uma microestrutura de comportamento anisotrópico: as propriedades mecânicas não são as mesmas em todas as direções.

A anisotropia faz com que, em um ensaio de tração, a redução relativa na espessura seja diferente na redução relativa na largura. A razão entre esses dois é chamada de parâmetro de Lankford (Emmens, 2011).

As propriedades mais afetadas pela anisotropia são o limite de escoamento e a resistência mecânica. O limite de escoamento na direção perpendicular à direção principal (sentido do fibramento mecânico) de deformação pode ser maior ou menor do que o limite de escoamento na direção longitudinal, dependendo da orientação preferencial formada.

O fibramento mecânico é oriundo do alinhamento preferencial de discontinuidades estruturais tais como inclusões, vazios, segregações e segundas fases no sentido do esforço mecânico. Essa anisotropia é de grande importância em peças forjadas ou placas de espessuras consideráveis. A direção principal de trabalho é definida como direção longitudinal, existem também duas outras direções transversais que devem ser consideradas. A direção transversal curta é a menor dimensão do produto, como por exemplo, a espessura de uma placa. A direção transversal longa é perpendicular à direção transversal curta assim como à direção do fibramento mecânico (Dieter, 1981).

Um material plástico se deforma por deslocamentos e movimentos. A velocidade com que as discordâncias se deslocam aumenta com a deformação, inicialmente muito rapidamente. Contudo, a velocidade é limitada pelo atrito da rede cristalina e por efeitos de arrasto de discordâncias.

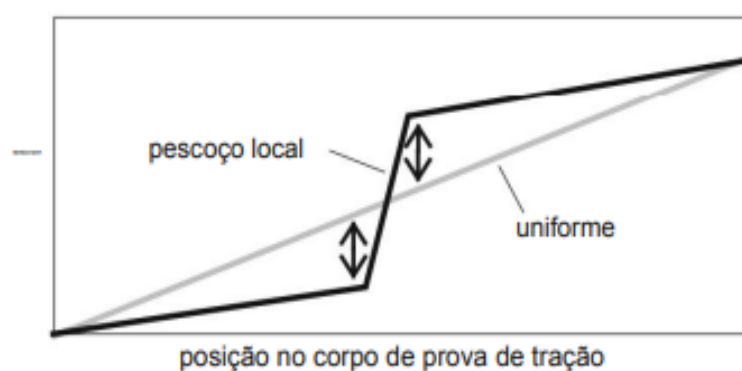
Todo processo de conformação tem dependência da velocidade de operação até determinado ponto, no entanto, altas velocidades de conformação podem aumentar de maneira considerável a conformabilidade do metal.

A velocidade de conformação afeta diretamente o processo de conformação por: efeitos de inércia, efeitos metalúrgicos e feitos tribológicos.

Efeitos de inércia são originados pela aceleração das peças e pela ferramenta de conformação, gerando tensões internas. Esses níveis de aceleração não são detectados em operações normais de estampagem, com isso, esses efeitos de inércia podem ser ignorados.

Se um material está sendo tracionado, cada parte desse material se deforma de uma velocidade diferente, quando se inicia a formação de um pescoço (estricção), a velocidade tende a mudar à medida que a tensão e a deformação se concentram no pescoço, como mostra a Figura 6 (Emmens, 2011).

**Figura 6:** Efeito da velocidade em um corpo de prova para tração.



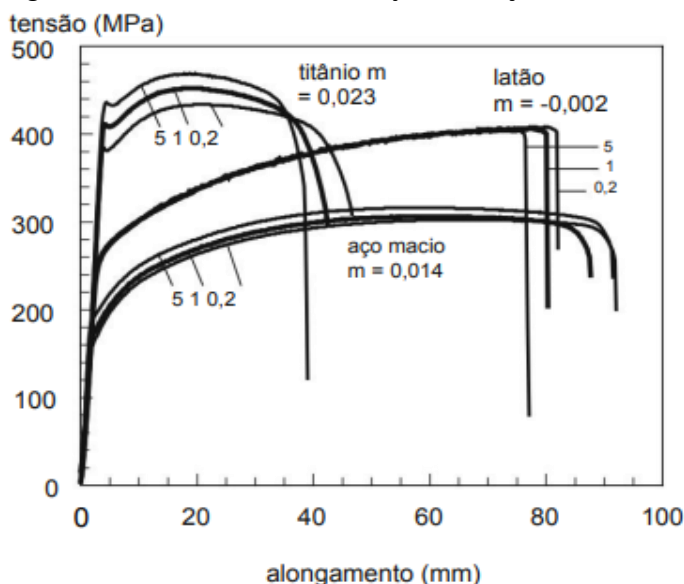
**Fonte:** Emmens, 2011.

*Nota: a linha cinza apresenta uma condição de deformação uniforme; a linha preta representa o desenvolvimento de um pescoço (estricção).*

Efeitos metalúrgicos tem como base o endurecimento pela taxa de deformação, com esse fenômeno é possível aumentar a resistência mecânica de um material. Esse efeito não é observado de forma permanente, reduzindo a velocidade de conformação, o efeito de endurecimento também diminui (Emmens, 2011).

A Figura 7 apresenta o efeito da taxa de deformação em teste de tração em diferentes materiais como, titânio, aço macio e latão, variando também sua velocidade de conformação entre 5, 10 e 2 mm/s.

**Figura 7:** Efeito da taxa de deformação em tração.ensaio de



**Fonte:** Emmens, 2011.

O endurecimento por taxa de deformação causa um efeito significativo nas curvas tensão-deformação. Um dos efeitos que pode ser notado inicialmente é que a altura da curva é influenciada pela velocidade de realização de ensaio. Esse efeito depende diretamente da natureza do endurecimento e da taxa de deformação.

O endurecimento por taxa de deformação causa um efeito significativo nas curvas tensão-deformação. Um dos efeitos que pode ser notado inicialmente é que a altura da curva é influenciada pela velocidade de realização de ensaio. Esse efeito depende diretamente da natureza do endurecimento e da taxa de deformação.

Com o avanço da tendência moderna, os engenheiros e projetistas estão considerando utilizar materiais cada vez mais leves, uma vez que as estruturas atualmente estão ficando cada vez maiores. Estas considerações não se limitam ao emprego de estruturas fixas como pontes ou edifícios, mas também na fabricação de peças e componentes automotivos, onde o maior interesse é reduzir o peso morto da estrutura (Chiaverini, 1965).

Um típico aço HSLA tem uma microestrutura de ferrita e perlita e é microligado com vanádio e/ou nióbio para reforço.

Microligado é um termo que descreve o processo de utilização de pequenas adições de elementos formadores de carbonitreto de titânio, vanádio, e nióbio para reforçar os aços por refinamento de grãos e endurecimento por precipitação (ASM Handbook, 2004).

É notável a evolução metalúrgica que vem ocorrendo nestes tipos de aço, visando atender os requisitos da correlação entre propriedades, estrutura e processamento (Silva; Mei 2021).

Em resumo, esses aços são de grande utilidade quando se objetiva o seguinte:

- Aumentar a resistência mecânica, possibilitando a aplicação de esforços maiores na estrutura ou tornar possível uma diminuição de seção (Chiaverini, 1965);
- Melhorar a resistência à corrosão, esse é um ator de alta importância a se considerar em um projeto, tendo em vista que seções mais finas podem apresentar uma vida útil menor (Chiaverini, 1965);
- Melhorar a resistência ao choque e o limite de fadiga (Chiaverini, 1965);
- Elevar a resistência do limite de escoamento para o limite de resistência à tração, sem que se tenha perda considerável da ductilidade (Chiaverini, 1965). (Silva; Mei 2021) ainda acrescentam como objetivo na aplicação destes aços:
- Melhoria da soldabilidade, pela redução do carbono equivalente e o controle do desenvolvimento da ZAC (zona afetada pelo calor) (Silva; Mei 2021);
- Melhoria da conformabilidade, e também a anisotropia da ductilidade. O controle da quantidade de inclusões não metálicas é de extrema importância nesses aços (Silva; Mei 2021);
- Aumento da tenacidade e do limite de escoamento, por mecanismos capazes de promover um maior refino de grão (Silva; Mei 2021).

O material de estudo dessa pesquisa foi o aço tipo LNE 380 produzido pela empresa Usiminas, e é fornecido em tiras de dimensões especificadas pela empresa, que é classificado conforme a norma ABNT NBR 6656. Esta norma estabelece os requisitos mínimos exigidos para encomenda, fabricação e fornecimento que devem contemplar as chapas laminadas a quente de 2,00 mm até 16 mm de espessura. São aços carbono de baixo teor de liga, que necessitem excelente conformabilidade, considerando que as propriedades de soldabilidade são fundamentais.

A Tabela 1 apresenta informações quanto às propriedades mecânicas do aço LNE 380.

**Tabela 1:** Propriedades mecânicas do aço LNE 380.

Fonte	Grau	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento Mín. (%)
NBR 6656	LNE 380	380 a 530	460 a 600	23

**Fonte:** ABNT NBR 6656:2016

O aço LNE 380 é um material de qualidade estrutural com tensão mínima de escoamento na ordem de 200 MPa, com excelente conformabilidade, resistência a fadiga e soldabilidade, com grande aplicação em peças automotivas em que necessitam dobramento moderado.

A Tabela 2 apresenta o comparativo das composições químicas do aço LNE 380 regulamentado conforme a norma 6656:2016.

**Tabela 2 .:** Composição química do aço LNE 380.

Fonte	Material	C Máx.	Mn Máx.	Si Máx.	P Máx.	S Máx.	Al Mín.	Nb Máx.	V Máx.	Ti Máx.
NBR 6656	LNE 380	0,12	1,2	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,2

Fonte: ABNT NBR 6656:2016

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Materiais

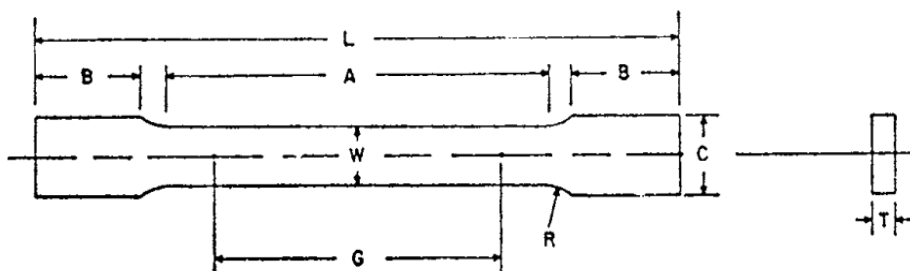
No desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) LNE 380 ou como descrito em inglês (High Strength Low Alloy).

A matéria-prima para confecção dos corpos de prova foi fornecida pela empresa. Esse tipo de aço vem ganhando cada vez mais aplicações no mercado automobilístico e em fabricações de longarinas, travessas, etc.

Os corpos de prova utilizados no ensaio foram fornecidos nas dimensões 100mm x 6,10mm x 6,10mm.

Os corpos de prova para ensaio de tração foram preparados conforme as dimensões contidas na norma ASTM E8–E8M – 13a. A Figura 8 ilustra a representação esquemática do corpo de prova.

**Figura 8:** Geometria dos corpos de prova de tração.



Fonte: ASTM E8–E8M – 13a.

A Tabela 3 mostra a relação das dimensões dos corpos de prova conforme a norma ASTM E8–E8M – 13a.

**Tabela 1:** Dimensões dos corpos de prova de tração.

Dimensões (mm)	
G- Área útil	25
W- Largura	6,0 ± 0,1
T- Espessura	N/A
R- Raio do filete	6
L- Comprimento total	100
A- Comprimento da seção reduzida	32
B- Comprimento da seção de aperto	30
C- Largura da seção de aperto	10

Fonte: ASTM E8–E8M – 13a.

Para realização do ensaio, utilizou-se uma máquina de ensaio universal Kratos, com capacidade de carga de 20 toneladas, aplicando a norma ABNT NBR ISO 6892-1 que é apresentada na Figura 9.

**Figura 9:** Máquina Kratos utilizada para ensaios.

Fonte: O Autor, 2023.

### 3.2 Análise metalográfica

Para o exame metalográfico foi utilizado um microscópio óptico com auxílio de software para captura de imagens e utilizando os critérios da norma ABNT NBR 15454: 2007, como apresentado na Figura 10.

**Figura 10:** Microscópio óptico.



**Fonte:** O Autor, 2023.

### 3.3 Análise química

O ensaio de análise química do material foi realizado via seca por espectrômetro óptico que é mostrado na Figura 11. Aplicando a norma ASTM E415-21.

**Figura 11:** Espectrômetro óptico.



**Fonte:** O Autor, 2023.

### 3.4 Processo de estampagem

A primeira etapa na operação de estampagem é o corte do blank utilizando uma prensa excêntrica de 500 toneladas que está apresentada na Figura 12.

**Figura 12:** Prensa excêntrica.



Fonte: O Autor, 2023.

A Figura 13 apresenta a segunda prensa excêntrica de 200 toneladas utilizada no processo de estampagem.

**Figura 13:** Prensa excêntrica 200 toneladas.



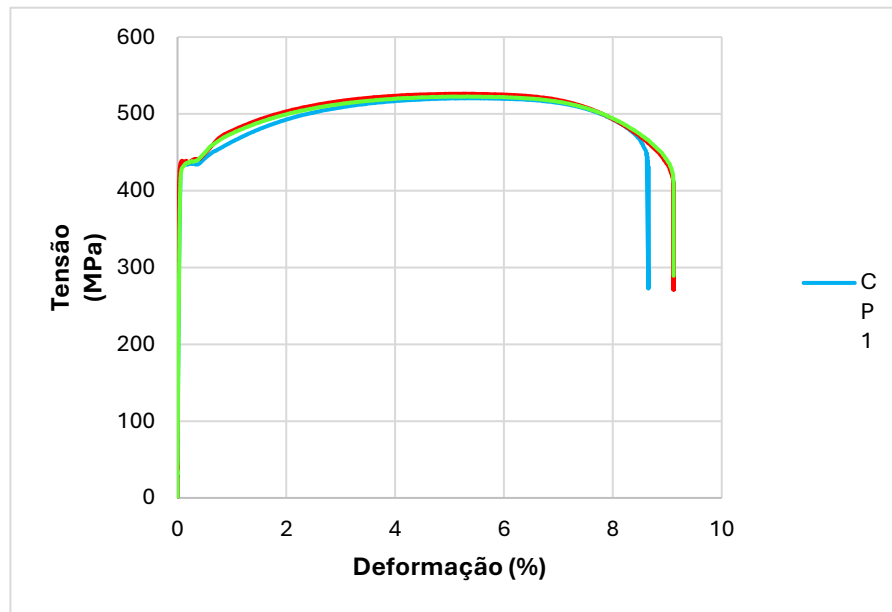
Fonte: O Autor, 2023.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Curva tensão x deformação

A figura 14 representa as curvas tensão x deformação ( $\sigma \times \epsilon$ ) obtidas a partir dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova para o aço LNE 380 e a Tabela 6 apresenta as informações adquiridas através do gráfico.

Figura 14: Gráfico tensão x deformação.



Fonte: O Autor, 2023.

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço LNE 380.

Identificação do CP	Tensão de Escoamento $\sigma_{esc}$ (MPa)	Tensão Máxima $\Sigma_{máx}$ (MPa)	Alongamento $\Delta l$ (%)
CP1	435,12	520,25	31,40
CP2	438,35	526,32	32,24
CP3	439,54	522,63	32,40
Média	437,67	523,06	32,01
Desvio padrão	$\pm 1,87$	$\pm 7,34$	$\pm 0,46$

Fonte: O Autor, 2023.

Para determinar o alongamento percentual do corpo de prova após o ensaio de tração foi aplicada a seguinte equação:

Onde:

$\Delta l$  = Variação do comprimento

$L_f$  = comprimento final

$L_0$  = comprimento inicial

$$\begin{aligned} \text{Para o CP1:} \quad \Delta l &= \frac{32,85 - 25}{25} \times 100 \\ \Delta l &= 31,40\% \end{aligned} \quad \text{Eq.(1)}$$

$$\begin{aligned} \text{Para o CP2:} \quad \Delta l &= \frac{33,06 - 25}{25} \times 100 \\ \Delta l &= 32,24\% \end{aligned} \quad \text{Eq.(2)}$$

$$\begin{aligned} \text{Para o CP3:} \quad \Delta l &= \frac{33,10 - 25}{25} \times 100 \\ \Delta l &= 32,40\% \end{aligned} \quad \text{Eq.(3)}$$

## 4.2 Análise metalográfica

### Macrografia da fratura

O exame macrográfico possibilitou uma melhor percepção da fratura que o material apresentou durante a conformação, um aspecto interessante foi que a fratura teve início na região de estouro e se propagou para a área cisalhada que é oriunda do corte por cisalhamento.

A Figura 15 mostra, por meio de um estereoscópio, o aspecto macrográfico da fratura dúctil que o material sofreu durante o esforço mecânico, utilizando ampliação de 10X.

**Figura 15:** Macrografia da fratura dúctil.



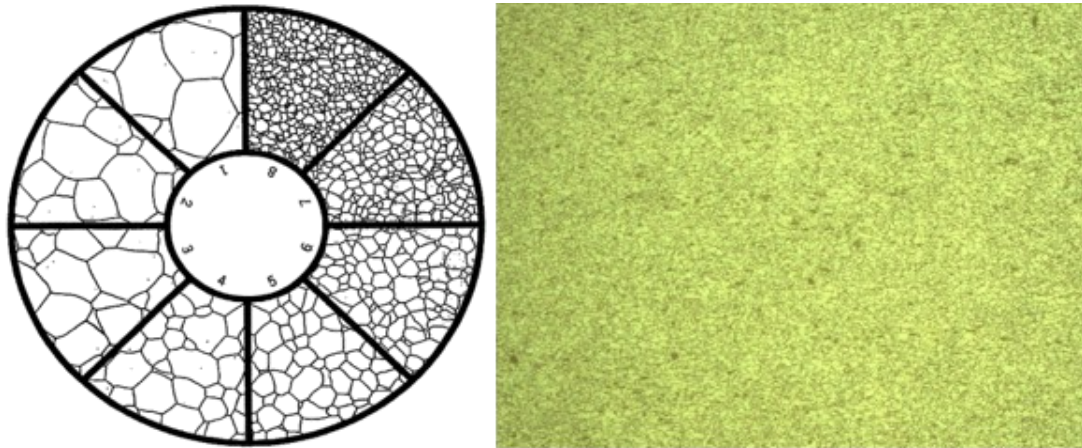
**Fonte:** O Autor, 2023.

## 4.3 Micrografia

As análises micrográficas permitiram identificar a direção de laminação para confeccionar corretamente os corpos de prova para ensaios de tração.

A Figura 16 apresenta (à esquerda) o retículo com tamanhos de grãos pré-definidos para comparação, utilizando ampliação de 100X. A Figura 16 (à direita) mostra a microestrutura do material com 100X de aumento.

**Figura 16:** Tamanho de grão ASTM.



**Fonte:** ASTM-E112, 2013 e O Autor, 2023.

*Nota: O retículo apresenta índices de grão que vão de 1 a 8, onde, quanto menor os valores, maior o tamanho de grão e vice-versa (ASTM-E112, 2013).*

Após avaliar o tamanho de grão por comparação, o tamanho de grão encontrado nas amostras foi de índice 8.

#### 4.4 Análise química

A Tabela 8 mostra a quantidade em porcentagem de em peso (%) de cada elemento de liga presente no aço LNE 380 por análise química, e estabelece um comparativo entre os resultados obtidos da norma regulamentadora (ABNT NBR 6656), do fornecedor e dos ensaios experimentais nas amostras.

**Tabela 3:** Comparação de composição química.

Fonte	C Máx.	Mn Máx.	Si Máx.	P Máx.	S Máx.	Al Mín.	Nb Máx.	V Máx.	Ti Máx.
NBR 6656	0,12	1,2	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,2
Certificado fornecedor	0,10	0,85	0,15	0,011	0,010	0,037	0,026	0,001	0,001
Experimento	0,07	0,80	0,032	0,020	0,009	0,039	0,038	0,001	0,001

**Fonte:** O Autor, 2023.

Verifica-se na Tabela 8 que todos os elementos químicos estão de acordo com as especificações conforme da norma.

#### 4.5 Análise do processo de estampagem

Durante a análise das ferramentas utilizadas no processo de estampagem, foi verificada a existência de trincas no extrator do blank na ferramenta de corte que está indicada na Figura 17.

**Figura 17:** Trincas na ferramenta de corte.



**Fonte:** O Autor, 2023.

#### 4.6 Avaliação da velocidade de conformação

A velocidade de deformação foi cronometrada durante as operações.

A prensa excêntrica realizou as etapas de dobramento em 0,6 segundos, um tempo relativamente curto se comparado com a prensa hidráulica que realizou a operação em 3,4 segundos.

Quando substituída pela prensa hidráulica, o dobramento foi concluído em 3,4 segundos, uma diferença de tempo apreciável em relação a prensa mecânica. Foi possível observar que o material não apresentava mais fraturas durante o processo de conformação com a troca do tipo de equipamento.

Realizando os cálculos para se determinar a taxa de deformação em  $\frac{Kgf}{cm^2/seg}$  obtiveram-se os seguintes resultados:

Taxa de deformação para prensa mecânica:  $\frac{120,03Kgf}{cm^2/seg}$

Taxa de deformação para prensa hidráulica:  $\frac{21,18Kgf}{cm^2/seg}$

## 5 CONCLUSÃO

Após todas as avaliações realizadas nesse trabalho, pode-se concluir que o objetivo principal de identificar a causa raiz de falhas em operação de estampagem com o aço LNE 380 foi alcançado.

Nos ensaios de tração, o material apresentou Tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) de 437,67 MPa, Tensão máxima de resistência ( $\sigma_{máx}$ ) de 523,06 MPa e Alongamento ( $\Delta l$ ) de 32,01%, o que vem a garantir as informações fornecidas pelo fornecedor e informadas na norma ABNT NBR 6656 que regulamenta o aço LNE 380.

Após os ensaios de tração dos corpos de prova, foram realizados os cálculos de

alongamento percentual conforme a norma ABNT NBR ISO 6892-1. Os valores de alongamento estavam de acordo com as exigências da norma, os CP's apresentaram alongamentos percentuais de 31,4%, 32,24% e 32,40. Comprovando que as propriedades mecânicas estavam dentro das especificações contidas em norma e pelo fornecedor.

Nos ensaios de dureza realizados, os resultados experimentais foram os mesmos dos informados pelo certificado do fornecedor de 84 HRB, o que confere uma maior confiabilidade na qualidade do material.

Os resultados da análise química por espectrômetro foram coniventes com o certificado do fornecedor da matéria-prima e a norma ABNT NBR 6656.

No exame macrográfico foi possível observar que, o início das fraturas nas peças estampadas teve como ponto de origem a região de estouro do blank, região essa que geralmente é susceptível a formação de microtrincas provenientes de afiação ineficiente ou desgaste da ferramenta de corte.

Observando a microestrutura, foi possível notar a presença de inclusões no aço, tendo como referência os valores obtidos dos ensaios mecânicos, essas inclusões não afetaram as propriedades mecânicas do material.

Com a alteração da prensa, foi alcançado um resultado satisfatório, objetivando reduzir a formação de trincas durante o processo de conformação. Pois a prensa hidráulica deforma a chapa mais lentamente, diminuindo o endurecimento por taxa de deformação. A taxa de deformação foi determinada através de cálculos para ambos os tipos de prensa.

A taxa de deformação utilizando a prensa excêntrica foi de 120,03Kg/(cm<sup>2</sup>/seg). A prensa hidráulica apresentou uma taxa de deformação consideravelmente menor se comparado com a prensa anterior, sendo de  $\frac{21,18Kg}{cm^2/seg}$

Pode-se concluir que a causa da falha foi a aplicação de altas velocidades de conformação, originando a fratura dúctil.

Alterando o tipo de equipamento, partindo de prensa excêntrica, que conforma o blank em um golpe de alta velocidade, para prensa hidráulica, que tem um tempo de deformação consideravelmente maior em relação ao equipamento mecânico, foi possível reduzir a velocidade de deformação do material, com isso, foi observado que o material não apresentou mais fraturas durante a conformação.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6656**: chapas de aço laminadas a quente: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1**: ensaio de tração – parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15454**: exame metalográfico de produtos metálicos – preparação e análise. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M-13a**: standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken: ASTM, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E415-21**: Standard test method for optical emission vacuum spectrometric analysis of carbon and low-alloy steel. West Conshohocken: ASTM, 2021.

ASM HANDBOOK. **Metallography and microstructures**. v. 9. Ohio: ASM International, 2004.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**: processos de conformação dos metais. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1965.

CHIAVERINI, V. **Fundamentos de metalurgia física**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1986.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

EMMENS, W. C. **Formability**: a review of parameters and processes that control, limit or enhance the formability of sheet Metal. Netherlands: Springer Science & Business Media, 2011.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaaios dos materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HIBBELER, R. C. **Estática**: mecânica para engenharia. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

KONINCK, J. de; GUTTER, D. **Manual do ferramenteiro**: corte, dobragem e embutição das laminas de metal. São Paulo : Mestre Jou, 1966.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo : Artliber, c2005.

SCHAEFFER, Lirio. **Conformação Mecânica**. 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 4. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2021.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo : E. Blucher, c1982.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida e por permitir que caminhos fossem trilhados até a chegada deste momento.

Aos Professores: Fernando Antonio Corrêa, M.Sc., Antenor Ferreira Silva, D.Sc., e Mateus Botani de Souza Dias, M.Sc., pela orientação.

Ao Prof. Odilon de Moraes Júnior, M.Sc. pela orientação e companheirismo.

À Conformetal Estamparia de Metais pelas amostras fornecidas.

Ao Prof. Rafael Fernandes pelo apoio com os ensaios mecânicos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e concretização deste estudo.

## Sobre os Autores:

---

### <sup>i</sup> Rodrigo Amâncio da Silva



Possui formação em Técnico em Metalurgia pela Escola e Faculdade SENAI Nadir Dias de Figueiredo (2018), cursando atualmente a Graduação em Tecnologia em Processos Metalúrgicos pela Escola e Faculdade SENAI Nadir Dias de Figueiredo. Tem experiência na área de Soldagem, com ênfase em Soldagens Robotizadas, Supervisão e Projetos de Melhoria Contínua em processos de soldagem. É Técnico em Metalurgia na empresa Conformetal Estamparia de Metais responsável pelo setor de Soldagem.

### <sup>ii</sup> Odilon de Moraes Júnior



Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pela Escola de Engenharia Mauá (1976) e Mestrado em Tecnologia Nuclear de Materiais pelo Instituto de Pesquisas Nucleares – IPEN – SP (2018). É Pós-Graduado com MBA em Gestão Empresarial pela FGV (2001). Atualmente é professor da Escola e Faculdade SENAI Nadir Dias de Figueiredo lecionando disciplinas nos Cursos Técnicos de Metalurgia, Tecnologia em Processos Metalúrgicos e Pós-Graduação em Engenharia de Fundição e Soldagem. <https://orcid.org/0009-0002-8755-6011>

### <sup>iii</sup> Fernando Antonio Corrêa



Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (PPGCEM), Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais e Engenheiro Mecânico. Pós-Graduado em Engenharia de Soldagem pela European Welding Federation/EWF, DVS-SLV Mannheim. Atualmente está como professor da Escola e Faculdade SENAI Nadir Dias de Figueiredo, lecionando disciplinas técnicas nos Cursos de Tecnologia em Processos Metalúrgicos e Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem e Fundição. <https://orcid.org/0009-0008-2963-9904>

**iv Antenor Ferreira Silva**

Doutor, mestre e engenheiro em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente, atua como docente do Curso Superior de Tecnologia de Processos Metalúrgicos na Faculdade SENAI de Tecnologia (Nadir Dias de Figueiredo) e sócio proprietário da empresa MAXIME FERRUM. Meus temas de pesquisa são ligados a área de conformação mecânica, de aços ao carbono e inoxidáveis em geral. <https://orcid.org/0009-0001-7826-8272>

**v Mateus Botani de Souza Dias**

Doutor, mestre e engenheiro em Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo. Atualmente, estou como Coordenador de Atividade Técnica e Pedagógica do Curso Superior de Tecnologia de Processos Metalúrgicos na Faculdade SENAI de Tecnologia (Nadir Dias de Figueiredo). Meus temas de pesquisa são os materiais magnéticos aplicados nas tecnologias de transição energética, como aços elétricos e ímãs de NdFeB. <https://orcid.org/0000-0001-6231-8880>