

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

ANA BEATRIZ RODRIGUES RIBEIRO

Estudo comparativo das propriedades de expansão de furo dos aços EN10149-2  
S355MC e NBR 6656 LNE 380

Lorena  
2020

ANA BEATRIZ RODRIGUES RIBEIRO

Estudo comparativo das propriedades de expansão de furo dos aços EN10149-2  
S355MC e NBR 6656 LNE 380

Monografia apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Msc. José Alberto de Oliveira

Versão corrigida

Lorena  
2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado  
da Escola de Engenharia de Lorena,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ribeiro, Ana Beatriz Rodrigues  
Estudo comparativo das propriedades de expansão  
de furo dos aços EN 10149-2 S355MC e NBR 6656 LNE380  
/ Ana Beatriz Rodrigues Ribeiro; orientador José  
Alberto de Oliveira. - Lorena, 2020.  
44 p.

Monografia apresentada como requisito parcial  
para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia  
de Materiais - Escola de Engenharia de Lorena da  
Universidade de São Paulo. 2020

1. Expansão de furos . 2. S355mc. 3. Lne 380. I.  
Título. II. de Oliveira, José Alberto, orient.

Dedico este trabalho, em primeiro lugar, a Deus e Nossa Senhora Aparecida por me darem força e saúde para superar os momentos difíceis. Aos meus pais Lucia e Francisco, meus irmãos Victor e Luiza e familiares por me apoiarem e incentivarem. Aos meus amigos que permitiram uma caminhada mais leve e feliz.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço todo o incentivo recebido pelos meus pais e familiares. Deixo minha gratidão a toda equipe da empresa, em especial ao colaborador do laboratório físico Bruno Pincelli Palácio e meu supervisor de estágio e orientador José Alberto de Oliveira. Sou grata a todo o corpo docente da Universidade de São Paulo.

Agradeço também aos colegas de curso por compartilharem conhecimento e experiência ao longo da graduação.

Mas é preciso ter manha  
E preciso ter graça  
É preciso ter sonho sempre  
Quem traz na pele essa marca  
Possui a estranha mania  
De ter fé na vida”

Maria Maria – Milton Nascimento e Fernando Brant

## **RESUMO**

RIBEIRO, Ana Beatriz Rodrigues. Estudo comparativo das propriedades de expansão de furo dos aços S355MC e LNE 380. 2020. 44p. Monografia (Trabalho de graduação em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

As propriedades de expansão de furo de chapas metálicas são de vital importância na indústria de produção de peças automobilísticas. Foram observados problemas em furos extrudados de peças fabricadas de chapas do aço EN 10149-2 S355MC, e por este motivo, a empresa manufatura teve a intenção de substituir a matéria prima pelo aço ABNT NBR 6656 LNE 380. Para caracterizar estes aços, foram realizadas análises de composição química, análise de inclusões, tamanho de grão e microdureza. As propriedades de expansão de furo foram avaliadas em ensaios planejados a partir de experimento fatorial completo, onde três variáveis foram analisadas: diâmetro do punção, velocidade de ensaio e acabamento de furo. Ambos os aços apresentaram boas propriedades de expansão de furo, sem observação de fratura em nenhuma condição de ensaio, abrindo espaço para estudos em condições mais severas. O aço S355MC demonstrou melhores propriedades de expansão de furos, e sua substituição pelo LNE 380 não é recomendada.

Palavras-chave: Expansão de furos. S355MC. LNE 380.

## **ABSTRACT**

RIBEIRO, Ana Beatriz Rodrigues. Comparative study of the hole expansion properties of S355MC and LNE 380 steels. 2020. 44 p. Monograph (Undergraduate thesis in Materials Engineering) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

The hole expansion properties of metallic sheets are of vital importance in the automotive parts industry. Issues in extruded holes were identified in parts fabricated from EN 10149-2 S355MC steel sheets, and for this reason, the manufacturing company intended to replace the raw material to the ABNT NBR 6656 LNE 380 steel. To characterize the metals, chemical composition analysis was performed, along with inclusion analysis, grain size and microhardness. The hole expansion properties were evaluated through tests based on a complete factorial experiment where three variables were analyzed: punch diameter, test speed and hole finishing. Both steels developed good hole expansion properties, with no observation of fractures under the studied conditions, allowing for further studies under more severe conditions. The S355MC steel presented better hole expansion properties, and its substitution for LNE 380 is not recommended.

Key-words: Hole expansion. S355MC. LNE 380.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquematização do ensaio de expansão de furos em chapa metálica. ....	15
Figura 2 – Diagrama de Ashby comparando as propriedades de tensão limite de conformação e alongamento percentual total para diferentes aços de engenharia. .	16
Figura 3 – Corpos de prova para ensaio de tração uniaxial obtido de chapas do aço LNE 380. ....	22
Figura 4 – Chapas para obtenção de corpos de prova para ensaio de expansão de furos (a) do aço LNE 380 e (b) do aço S355MC. Em (c) estão mostrados os corpos de prova furados com acabamento usinado e estampado e em (d) está exibido o punção para acabamento estampado.....	25
Figura 5 – Distribuição das indentações de microdureza Vickers realizada nos corpos de prova. ....	26
Figura 6 – Razões de expansão de furo para o aço LNE 380 e S355 MC. ....	30
Figura 7 – Alongamento percentual dos diâmetros no ensaio de expansão de furo.	31
Figura 8 – Micrografia sem ataque típica para o aço S355MC, mostrando a distribuição de inclusões óxidas globulares.....	33
Figura 9 – Micrografia atacada com Nital do aço S355MC, mostrando uma fina distribuição de grãos ferríticos.....	33
Figura 10 – Comparativo das regiões deformadas do aço S355MC sob diferentes condições de ensaio.....	34
Figura 11 – Micrografia sem ataque do aço LNE 380 onde é possível observar a presença de inclusões óxidas. ....	35
Figura 12 – Micrografia do aço LNE 380 após ataque com Nital, possibilitando identificação dos grãos ferríticos. ....	36
Figura 13. Micrografias das regiões deformadas do LNE 380 sob diferentes condições de ensaio.....	37

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Propriedades mecânicas e composição química do aço S355MC.....	18
Tabela 2 – Propriedades mecânicas e composição química do aço LNE 380.....	19
Tabela 3 – Planejamento fatorial (DOE) dos experimentos de expansão de furos. ..	23
Tabela 4 – Classificação das amostras em grupos de teste. ....	24
Tabela 5 – Resultados de análise química para os aços LNE 380 e S355MC, em conformidade com as normas ABNT NBR 6656 e EN 10149-2, respectivamente....	27
Tabela 6 – Resultados de ensaio de tração uniaxial obtidos por corpo de prova para chapas dos aços LNE 380 e S355MC.....	28
Tabela 7 – Razões de expansão de furo em função das diferentes variáveis de ensaio.	
.....	29
Tabela 8 – Alongamento percentual do diâmetro nos ensaios de expansão de furo.	
.....	31
Tabela 9 - Microdureza antes e após deformação por expansão de furo, com variação de tamanho de punção e velocidade de ensaio.....	38

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
2.1	Conformabilidade em chapas.....	13
2.2	Ensaio de expansão de furos .....	14
2.3	Aços de alta resistência e baixa liga (HSLA).....	15
2.3.1	Aços EN 10149-2 S355MC .....	18
2.3.2	Aços NBR 6656 classe LNE 380.....	18
2.4	Experimento fatorial completo .....	19
<b>3</b>	<b>PROBLEMÁTICA E OBJETIVOS .....</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
4.1	Ensaio de tração.....	22
4.2	Análise química .....	22
4.3	Planejamento de experimentos – Minitab.....	23
4.4	Preparo de corpos de prova .....	24
4.5	Ensaio de expansão de furos .....	25
4.7	Ensaios de microdureza .....	26
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>27</b>
5.1	Análise química .....	27
5.2	Ensaios de tração.....	27
5.3	Ensaio de expansão de furos .....	28
5.4	Microestrutura e desenvolvimento microestrutural na deformação.....	32
5.4.1	Análise de inclusões e tamanho de grão no aço S355MC.....	32
5.4.2	Análise de inclusões e tamanho de grão no aço LNE 380.....	35
5.5	Microdureza Vickers.....	37
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De forma geral na indústria, e em especial na indústria automobilística, chapas metálicas devem ser conformadas de diferentes maneiras para obtenção de peças. São diversas as operações de formação, que submetem estas chapas a diferentes estados de tensão, podendo ser estes simples ou complexos.

Dentre muitas destas operações, encontram-se aquelas que geram deformação localizada, como operações de flangeamento, punção de furos, e dobramentos em ângulo pequeno. Neste contexto, as propriedades de deformabilidade localizada são extremamente importantes, e para isto são utilizados ensaios de expansão de furos.

Ensaios de expansão de furo são realizados a partir da introdução de um punção através um furo de diâmetro definido, deformando-o até que ocorra uma fratura através de sua espessura. Tais ensaios podem ser realizados em máquinas universais de ensaio, e são definidos pela norma ISO 16630. Deste ensaio, a principal variável de importância é a Razão de Expansão de Furos (REF), que define a variação de diâmetro que se observa no furo até a falha. Como a deformação é localizada, o teste avalia o comportamento local, diferentemente de um teste que avalia propriedades de conformabilidade global, como é o caso das curvas de limite de conformação (CLC).

Amplamente utilizados na indústria automotiva, os aços de alta resistência e baixa liga consistem em uma classe de ampla variedade. São definidos como aços de baixo carbono, com a adição de pequenas quantidades de elementos microligantes, responsáveis pela melhoria de suas propriedades mecânicas através de diferentes mecanismos. As classificações para estes aços são diversas. Entre estes, pode-se citar aços da norma DIN EN 10149-2, dentre os quais encontramos o aço S355MC, utilizado pela empresa onde este trabalho foi realizado, para produção de peças automotivas para um cliente. Foram observados, nas peças em questão, alguns problemas para obtenção de furo extrudado, despertando na empresa o desejo de troca do aço utilizado.

Neste sentido, o presente trabalho avaliará a possibilidade de troca do aço S355MC por um aço LNE 380, também pertencente a classe de aços de alta resistência e baixa liga, que possui propriedades similares ao primeiro. Assim, ensaios de expansão de furo serão utilizados para avaliação das propriedades de conformabilidade local dos aços, e um estudo comparativo será realizado, comparando-se três variáveis de conformação: diâmetro de punção, velocidade de

avanço do punção e tipo de furo, estampado ou usinado. Os experimentos serão realizados seguindo uma dinâmica de experimentação fatorial, que permite estudar todas as diferentes combinações de fatores em um experimento de forma aleatorizada. Para definição completa das propriedades, também serão feitos estudos metalográficos que incluem análise de inclusões, determinação dos tamanhos de grão e microdureza, bem como ensaio de tração e análise química destes aços.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A expansibilidade de furos é uma propriedade de vital importância na indústria, em especial automotiva, uma vez que partes de automóveis são frequentemente submetidas a operações de conformação profunda. Neste espírito, o capítulo que segue aborda uma revisão literária na intenção de num primeiro momento apresentar o ensaio de expansão de furos e sua importância na indústria automotiva. Em um segundo momento, o capítulo irá fazer uma descrição de aços avançados de alta resistência, que ganharam importância na indústria automobilística e, em especial, os aços DIN EN 10149-2 S355MC e NBR 6656 LNE 380.

### 2.1 Conformabilidade em chapas

A conformabilidade pode ser definida de forma geral como a capacidade de sofrer deformações em sua forma sem que haja formação de defeitos devido a falta de ductilidade local (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Em linhas mais específicas, podemos classificar a conformabilidade de chapas entre “de volume” ou “de borda”. A conformabilidade de volume, também chamada de global, pode ser entendida com a capacidade da chapa de se deformar em seu interior, e difere a conformabilidade de borda uma vez que nesta segunda a quebra de continuidade da chapa gera um estado de tensões mais complexo, tendendo a ser uma região crítica para o projeto de peças (ALMEIDA et al., 2016).

Quando se fala na conformabilidade de volume, ou conformabilidade global, um fator chave em sua avaliação é uma distribuição uniforme da deformação plástica. Por esta razão, pode-se também definir a conformabilidade de volume como a resistência do material a um estrangulamento localizado. Entre alguns modos globais estão deformação por estiramento, trefilação, estampagem e tensionamento planar onde amplas regiões estão sujeitas a deformação simultânea. A distribuição da deformação é chave para a deformabilidade local, e indicadores convencionais incluem as curvas limite de conformação, o coeficiente de encruamento e os valores de deformação local e global (HANCE, 2016).

Em contraste, conformabilidade de borda, ou conformabilidade local, se caracteriza como a resposta a uma deformação concentrada a uma pequena região, e é importante em operações de flangeamento, punção de furos, e dobramento em

raio pequeno (conhecido em inglês como *tight-radius bending*). Como maneira de avaliar a deformabilidade concentrada, temos diversos testes de dobramento, teste Swift e o teste de expansão de furos (HANCE, 2016).

Tendo em vista a necessidade destes tipos de operação na indústria, uma boa avaliação das propriedades de expansão de furos é necessária. Em especial na indústria automobilística, um dos maiores objetivos no desenvolvimento de veículos é a redução do peso total do produto e, nos termos de peças metálicas, isso é realizado a partir do desenvolvimento de aços e outros metais que possuam excelentes propriedades de conformabilidade e alta resistência mecânica. Grande parte dessas peças é produzida a partir de chapas laminadas, conformadas de acordo a obter-se a forma desejada, e para tal, necessitam que suas propriedades de conformabilidade sejam adequadas (COMSTOCK; SCHERRER; ADAMCZYK, 2006).

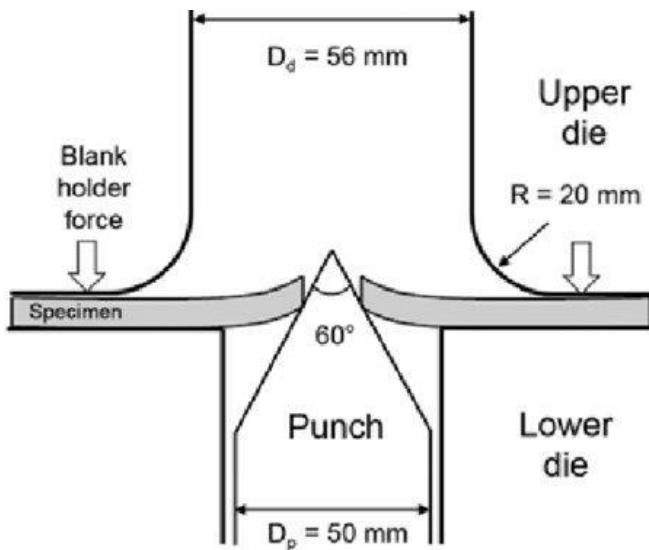
## 2.2 Ensaio de expansão de furos

O teste de expansão de furos é regulamentado pela norma ISO 16630, e consiste em avaliar a porcentagem que um furo pode ser aumentado até que ocorra o início da ruptura. O teste pode ser realizado em uma máquina de ensaios universal e consiste em submeter um furo de diâmetro inicial conhecido a uma carga aplicada por um punção côncico. A norma regula um punção côncico com ângulo de 60º. A magnitude das deformações de uma chapa sujeita ao teste de expansão de furos é medida a partir da razão de expansão de furos (REF%), definida como

$$REF\% = \frac{d_f - d_0}{d_0} \times 100\% \quad (1)$$

onde  $d_f$  é o diâmetro final de furo e  $d_0$  é o diâmetro inicial. O aparato para ensaio de expansão de furos está esquematizado na Figura 1 (YOON et al., 2016)

Figura 1 – Esquematização do ensaio de expansão de furos em chapa metálica.



Fonte: (YOON et al., 2016)

São diversos os fatores que afetam a expansibilidade de furos, entre eles (HASEGAWA et al., 2004):

- A geometria do punção;
- A velocidade de deslocamento do punção;
- O diâmetro relativo do furo;
- A espessura da chapa;
- As condições de atrito;
- A qualidade superficial do furo, entre outros.

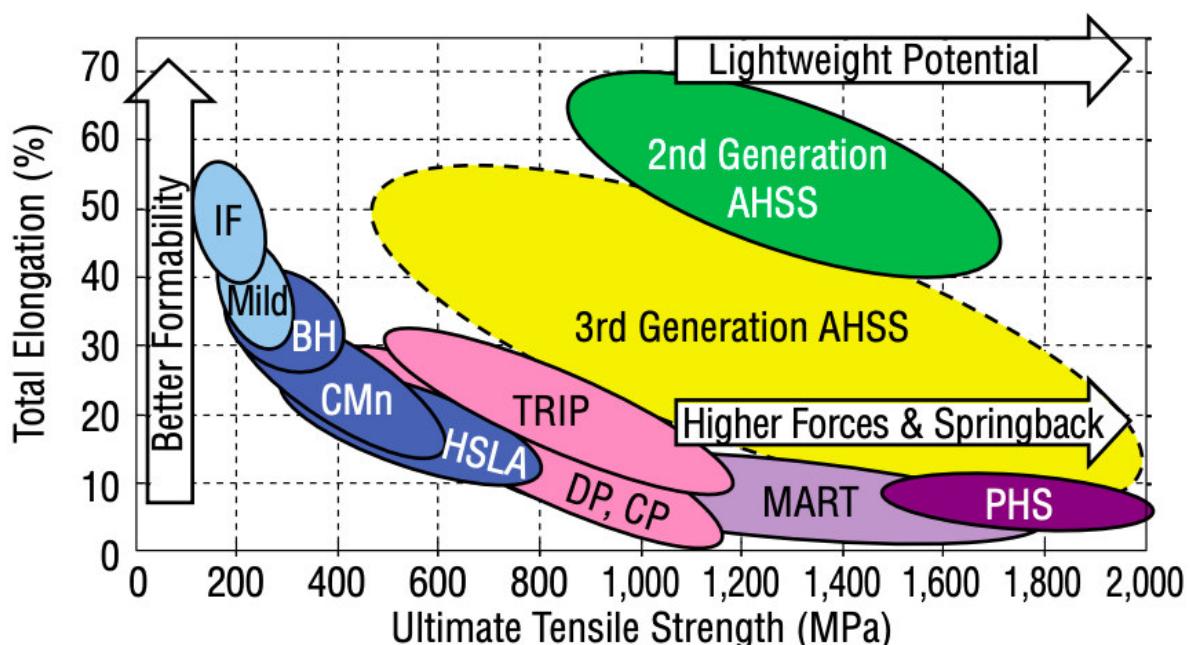
### 2.3 Aços de alta resistência e baixa liga (HSLA)

A classificação dos tipos de aço existentes no mercado é muito comumente feita com base nos elementos de liga presentes e propriedades mecânicas. Por exemplo, alguns aços de menor resistência mecânica são agrupados entre aços-carbono (referenciados comumente como *mild steel* em inglês), e aços IF (do inglês, *interstitial free*). Entre aços convencionais de alta resistência, por sua vez, encontram-se alguns aços carbono-manganês (C-Mn), aços endurecíveis por precipitação, e aços de alta resistência e baixa liga (referidos pelo acrônimo em inglês HSLA, *high-strength low-alloyed*). Surgem ainda, em especial nos últimos anos, aços avançados de alta resistência (AHSS, do inglês Advanced high-strength steel). Dentro desta classe de aços, há uma grande variedade de exemplos. Podemos citar, entre eles, aços *dual-*

*phase* (aços bifásicos), aços martensíticos e TRIP (*transformation-induced plasticity*, de plasticidade induzida por transformação de fase) (TISZA, 2020).

Na indústria automobilística, aços convencionais vêm sendo substituídos progressivamente por aços HSLA e, mais recentemente, por AHSS. Esta substituição vem justamente das melhores combinações entre plasticidade e resistência mecânica que essas classes possuem. Um bom comparativo pode ser obtido a partir da Figura 2, que contém um diagrama de Ashby de tensão limite de conformação versus alongamento percentual para as diferentes classes de aços (BILLUR; ALTAN, 2013).

Figura 2 – Diagrama de Ashby comparando as propriedades de tensão limite de conformação e alongamento percentual total para diferentes aços de engenharia.



Fonte: (BILLUR; ALTAN, 2013)

Em particular, a história dos aços da classe HSLA começa com uma descrição das propriedades de um aço de baixo carbono com pequenas quantidades de vanádio (CONE, 1934), ao passo que a primeira liga da classe a ser comercializada pela *National Steel Corporation* em 1958 continha adições de nióbio, e pertencia a uma classe denominada GLX-W. O interesse em utilizar essa classe na indústria automotiva surge com a crise do óleo em 1973, quando a indústria se viu desafiada a diminuir o peso dos veículos a fim de diminuir o consumo de combustível (PIERCE, 1975). De forma geral, os HSLA são uma classe especial de aços de baixo carbono com adição de alguns elementos microligantes, como vanádio, nióbio e titânio. Suas

tensões de escoamento podem ser tão altas quanto 690 MPa, mais que duas vezes a de aços carbonos usuais.

Estão incluídos na categoria de aços HSLA muitos exemplares de diferentes padrões e classes, desenvolvidos para atender necessidades específicas de propriedades mecânicas, químicas e físicas. Aços HSLA podem ser divididos em seis classes (DAVIS, 2001):

- a) Aços de envelhecimento: que contém pequenas quantidades de elementos como cobre e fósforo, incluídos na intenção de aumentar a resistência a corrosão e promover endurecimento por solução-sólida;
- b) Aços microligados ferrítico-perlíticos: que contêm pequenas adições de elementos formadores de carbeto e carbonitretos (Nb, V, Ti) na intenção de promover endurecimento por precipitação, refino de grão e controle das temperaturas de transformação;
- c) Aços perlíticos “Como-laminados”: que pode incluir aços carbono-manganês, e que também podem possuir pequenas quantidades de outros elementos de liga a fim de aumentar resistência, tenacidade, conformabilidade e soldabilidade;
- d) Aços de ferrita acicular (bainita de baixo-carbono): aços de baixo teor de carbono (menos de 0.05% C) com excelentes combinações de alta tensão de escoamento (tão altas quanto 690 MPa), soldabilidade, conformabilidade e boa tenacidade;
- e) Aços de duas fases: de microestrutura martensítica dispersa em matriz ferrítica e possuem uma boa combinação de ductilidade e alta resistência a tração;
- f) Aços com formato controlado de inclusões: que providenciam elevada ductilidade e tenacidade através de pequenas adições de Ca, Zr, Ti e, eventualmente, elementos de terra-rara, de forma a modificar o formato de inclusões de sulfetos de agulhas alongadas para pequenos glóbulos esféricos bem dispersos.

Essas categorias não formam, necessariamente, grupos distintos, uma vez que um aço HSLA pode possuir características de diferentes grupos. Por exemplo, todos os tipos supracitados podem ter formato de inclusões controlado, e elementos de liga adicionais podem ser incorporados de modo a aumentar a resistência a corrosão e promover endurecimento por solução sólida (DAVIS, 2001).

### 2.3.1 Aços EN 10149-2 S355MC

Dentro desta classe, cita-se como exemplo o aço S355MC, produzido sob a norma EN 10149-2. A norma EN 10149-2 rege os requisitos para a fabricação de produtos planos feitos de aços de alta soldabilidade e alta tensão de escoamento, laminados a quente, e produzidos para conformação à frio (EN 10149-2, 2013).

Neste contexto, o aço S355MC é um aço de baixo teor de carbono e pequena adição de elementos de liga, produzido por laminação à quente, e possui uma fina estrutura de grãos. Este é um aço de alta resistência e boas propriedades de impacto, com tensão de escoamento mínima esperada de cerca de 369 MPa, tensão limite de resistência de 457 MPa e alongamento percentual de 30% (BENASCIUTTI et al., 2014). Um resumo das propriedades e composição química do aço S355MC estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas e composição química do aço S355MC.

$\sigma_e$ (MPa)		$\sigma_r$ (MPa)		Alongamento (%)					
355		430-550		23					
<b>Composição química (balanço Fe)</b>									
C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Nb (%)	V (%)	Ti (%)	
max	max	max	max	max	min	max	max	max	
0,12	1,5	0,5	0,025	0,020	0,015	0,09	0,20	0,15	

Fonte: EN 10149-2, 2013.

### 2.3.2 Aços NBR 6656 classe LNE 380

Por sua vez, a norma NBR 6656 define a classe de aços LNE de alta resistência e baixa liga. Dentre estes, o aço LNE 380 é amplamente utilizado devido a suas boas propriedades de dobramento. São aços laminados a quente, e fabricados em espessuras que vão de 1,2 a 25 mm (FREES, 2017).

A norma define, para esta classe, que o limite de escoamento deverá se encontrar na faixa de 380 a 530 MPa, com limite de resistência que varia entre 460 e 600 MPa e alongamento mínimo de 23% (ABNT NBR 6656, 2008). Um resumo das

propriedades mecânicas e composição química do aço LNE 380 estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas e composição química do aço LNE 380.

$\sigma_e$ (MPa)		$\sigma_r$ (MPa)		Alongamento (%)					
380 – 530		460 – 600		23					
<b>Composição química (balanço Fe)</b>									
C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Nb (%)	V (%)	Ti (%)	
max	max	max	max	max	min	max	max	max	
0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	

Fonte: ABNT NBR 6656, 2008.

## 2.4 Experimento fatorial completo

Um experimento fatorial completo é um tipo de experimento que permite observar os efeitos que vários diferentes fatores podem ter sobre uma resposta através da variação dos níveis de diversos fatores ao mesmo tempo, em vez de um de cada vez, permitindo uma análise das interações entre fatores (MINITAB, 2019).

É essencial, para a realização de um experimento fatorial, a aleatorização dos fatores. A aleatorização é essencial uma vez que o experimentador pode não estar certo de todas as variáveis que influenciam o experimento. Dessa forma, certifica-se que um número de variáveis externas ao experimento irá influenciá-lo de maneira igual. Mesmo que estas variáveis possam ser identificadas e controladas, complicações não desejadas são comuns em experimentos. O experimento fatorial, por sua vez, oferece certa proteção contra vícios do experimento, embora não possa impedir complicações experimentais (BUSSAB; MORETTIN, 1987).

O experimento fatorial é realizado da seguinte forma: estabelece-se o número de fatores a serem estudados em dois níveis. Estes níveis serão definidos de acordo com a natureza do que será observado, entre alto e baixo, grande e pequeno. Podem ser, por exemplo, dois valores de temperatura ou características qualitativas de um determinado fator. Desta forma, estabelecem-se  $2^k$  experimentos, onde k é o número de fatores a serem variados. Em seguida, os experimentos devem ser aleatorizados, e o número de réplicas para cada condição deve ser definido. Desta forma está criado

o experimento, em que a influência conjunta dos fatores poderá ser analisada, com um número diminuto de ensaios.

### 3 PROBLEMÁTICA E OBJETIVOS

Observa-se, em peças fabricadas para um cliente da indústria automotiva, a ocorrência de problemas com furo extrudado. Atualmente, a peça é fabricada a partir de um aço EN 10149-2 S355 MC, e deseja-se estudar a possibilidade de substituição por um aço NBR 6656 LNE 380.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é o de realizar um estudo comparativo das propriedades destes dois aços. Para tal, serão estudadas as propriedades em tração, a composição química, análise de inclusões, microdureza, e serão realizados ensaios de expansão de furos sob diferentes condições, estudando-se o efeito do uso de diferentes tamanhos de punção, diferentes velocidades e acabamentos de furo.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Ensaio de tração

Os corpos de prova para os ensaios de tração foram obtidos a partir do corte das chapas na direção transversal ao sentido de laminação, usinados em fresadora conforme as dimensões da norma ASTM E8 (ASTM E8, 2010). Como exemplo, os corpos do aço LNE 380 são exibidos na Figura 3. O ensaio foi realizado com uma pré-carga de 500 kgf até a ruptura do corpo de prova na temperatura de 24 °C em uma máquina universal de ensaios Amsler 699/493 e foi efetuado em conformidade com a norma ABNT NBR 6673(ABNT NBR 6673, 1981).

Figura 3 – Corpos de prova para ensaio de tração uniaxial obtido de chapas do aço LNE 380.



Fonte: Elaborado pela autora.

### 4.2 Análise química

A análise química foi efetuada a partir de espectroscopia de emissão óptica por centelha, onde a passagem de corrente elétrica de um eletrodo para a amostra promove a excitação atômica necessária para a análise, que foi realizada em um espectrômetro SPECTROMAXx – LMF04 na temperatura de 24 °C de acordo com a norma ASTM A751 (ASTM A-751, 2011).

### 4.3 Planejamento de experimentos – Minitab

O planejamento dos experimentos de expansão de furos foi realizado utilizando software Minitab, utilizando uma sistemática de planejamento fatorial de experimentos. Foram selecionados três fatores para realização de experimentos em tréplica, totalizando 24 experimentos por liga. Os três fatores escolhidos são diâmetro de furo (dois diâmetros a serem experimentados), velocidade de expansão de furo (entre baixa e alta, caracterizado pela posição da válvula de controle da máquina de ensaios) e tipo de acabamento do furo (usinado ou estampado). A Tabela 3 sumariza os experimentos, conforme sorteados automaticamente pelo programa.

Tabela 3 – Planejamento fatorial (DOE) dos experimentos de expansão de furos.

Experimento	Diâmetro	Velocidade	Acabamento
9	-1	-1	-1
10	1	-1	-1
6	1	-1	1
15	-1	1	1
24	1	1	1
7	-1	1	1
19	-1	1	-1
11	-1	1	-1
2	1	-1	-1
17	-1	-1	-1
5	-1	-1	1
21	-1	-1	1
4	1	1	-1
13	-1	-1	1
23	-1	1	1
22	1	-1	1
3	-1	1	-1
16	1	1	1
20	1	1	-1
8	1	1	1
18	1	-1	-1
1	-1	-1	-1
12	1	1	-1
14	1	-1	1

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: o valor -1 representa menor diâmetro, velocidade baixa e furo estampado, em suas respectivas colunas. O valor +1 representa maior diâmetro, velocidade alta e furo usinado em suas respectivas colunas.

A partir dos experimentos em tréplica, estabelecem-se três grupos de amostras: Grupo I, Grupo II e Grupo de teste. Em cada um destes, as características testadas são as mesmas. A classificação por grupos de teste está listada na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação das amostras em grupos de teste.

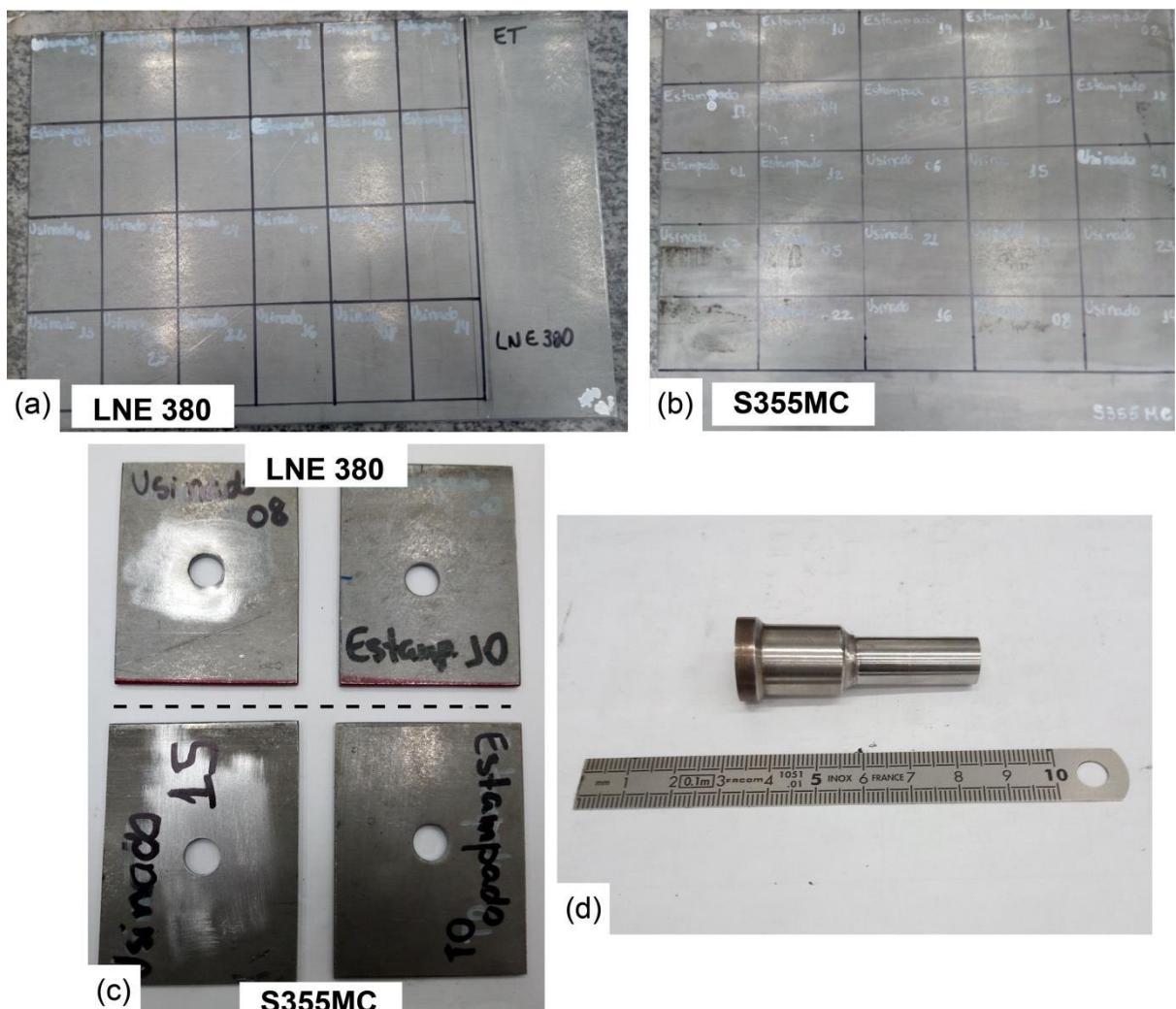
	<b>Grupos de amostras</b>							
<b>Teste</b>	20	9	10	19	6	15	24	5
<b>Grupo I</b>	12	17	2	11	22	7	16	21
<b>Grupo II</b>	4	1	18	3	14	23	8	13

Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.4 Preparo de corpos de prova

As chapas mostradas nas Figura 4 (a) e (b) foram utilizadas para obtenção dos corpos de prova para expansão de furo. Os corpos de prova foram cortados da chapa utilizando-se serra-fita, e passados na desbastadora para remoção de rebarbas. Os furos foram obtidos com acabamento usinado a partir de broca e furadeira, ou estampados com punção e aplicação de carga de 4,0 toneladas. Em média, foram obtidos diâmetros de furos de 10,93 e 10,96 mm nos aços LNE 380 e S355 MC, respectivamente. A Figura 4(c) contém os corpos de prova usinados e estampados com o punção, mostrado na Figura 4(d).

Figura 4 – Chapas para obtenção de corpos de prova para ensaio de expansão de furos (a) do aço LNE 380 e (b) do aço S355MC. Em (c) estão mostrados os corpos de prova furados com acabamento usinado e estampado e em (d) está exibido o punção para acabamento estampado.



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.5 Ensaio de expansão de furos

O ensaio de expansão de furos foi realizado na máquina universal de ensaios Amsler 699/493 em ambos os aços. As amostras presas foram submetidas a expansão de furos utilizando-se dois tipos de punção cônicos, cada qual gerando dois diâmetros finais de expansão. Os punções foram escolhidos de forma a proporcionar alongamentos máximos de 50 e 90% no diâmetro. Além disso, duas velocidades de avanço do punção foram avaliadas: a velocidade baixa corresponde a 5 mm/minuto (posição 4 da válvula de regulagem da máquina de ensaios) enquanto que a velocidade alta corresponde a 8 mm/minuto (posição 6). Além do mais, também foram avaliados os efeitos do acabamento do furo, entre estampado e usinado.

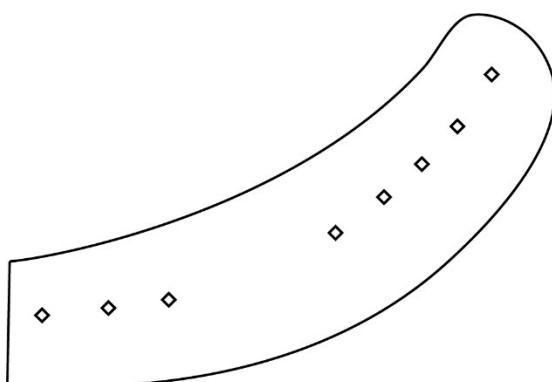
#### **4.6 Caracterização metalográfica**

Os corpos de prova foram cortados após realização do ensaio de expansão de furos, e a seção do corte foi analisada em amostras selecionadas. A superfície das chapas foram preparadas a partir de lixamento sucessivo com lixas de 220, 320, 600 e 1200, e o polimento foi realizado utilizando suspensão de alumina de 1 µm e pasta de diamante de 6, 3 e 1 µm. A superfície metalográfica foi revelada a partir de imersão em Nital. A análise metalográfica foi realizada por microscopia óptica em microscópio óptico Olympus modelo CK40M – F100. O teor de inclusões nos aços foi analisado de acordo com a norma ASTM E45 (ASTM E45-18A, 1999) e o tamanho médio de grão foi analisado de acordo com a norma ASTM E112 (ASTM E112, 2010).

#### **4.7 Ensaios de microdureza**

A microdureza das chapas de S355MC e LNE 380 foram obtidas a partir das amostras polidas para caracterização metalográfica. Foi utilizado microdurômetro da marca Shimatzu modelo HMV-2TE para realização de ensaio de microdureza Vickers, realizado à 24 °C, e seguindo a norma ABNT NBR NM ISO 6507-1 (ABNT NBR ISO 6507-1, 2019). Foram realizadas medidas em regiões não deformadas e em regiões deformadas, conforme indicado pela Figura 5, sendo obtidos três pontos na região não deformada, e cinco pontos na região deformada, em amostras selecionadas. O critério para seleção foi o de melhor centralização dos furos, tendo sido analisada a influência do diâmetro do punção e da velocidade do ensaio.

Figura 5 – Distribuição das indentações de microdureza Vickers realizada nos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pela autora.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise química

Os resultados de análise química estão sumarizados na Tabela 5, onde se apresentam os valores percentuais dos elementos regulados pelas normas. Foi identificada, ainda, a presença dos elementos Cr, Ni, Mo, Cu, Co, W, Pb, B, Sn, Zn, As, Bi, Ca, Ce, Zr e La. Observa-se um maior teor de carbono e manganês no S355MC. Os teores dos elementos estão todos de acordo com as respectivas normas que definem os aços.

Tabela 5 – Resultados de análise química para os aços LNE 380 e S355MC, em conformidade com as normas ABNT NBR 6656 e EN 10149-2, respectivamente.

LNE 380	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti
	0,093	0,420	<0,0020	0,0180	0,00980	0,0450	0,0380	<0,0010	0,00380
Especificação (max)	0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015 min	0,12	0,12	0,20
S355MC	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti
	0,102	0,560	<0,0020	0,0170	0,00640	0,0390	0,0400	<0,0010	0,00380
Especificação (max)	0,12	1,50	0,50	0,025	0,020	0,015 min	0,09	0,20	0,15

Fonte: Elaborado pela autora.

### 5.2 Ensaios de tração

Os resultados de tração para ambos os aços estão listados na Tabela 6, que resume os dados para os três corpos de prova de cada liga.

A partir dos valores tabelados, é notável que para ambos os aços os valores médios de limite de escoamento e limite de resistência estão dentro do previsto pela norma. Enquanto isso, o alongamento de ambos é superior ao mínimo previsto pela norma, com o LNE 380 possuindo maior ductilidade.

Tabela 6 – Resultados de ensaio de tração uniaxial obtidos por corpo de prova para chapas dos aços LNE 380 e S355MC.

<b>LNE 380</b>					
	<b>Especificação</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>Valor médio</b>
$\sigma_e$ (MPa)	380-530	389,9	388,6	388,0	<b><math>388,0 \pm 1,0</math></b>
$\sigma_r$ (MPa)	460-600	462,5	461,1	460,0	<b><math>461,2 \pm 1,3</math></b>
<b>Alongamento (%)</b>	23 (min)	30,1	30,3	30,6	<b><math>30,3 \pm 0,3</math></b>
<b>S355MC</b>					
	<b>Especificação</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>Valor médio</b>
$\sigma_e$ (MPa)	355 (min)	455,5	448,0	449,6	<b><math>451,0 \pm 4,0</math></b>
$\sigma_r$ (MPa)	430-550	505,5	497,5	511,6	<b><math>504,9 \pm 7,1</math></b>
<b>Alongamento (%)</b>	23 (min)	27,7	27,6	27,7	<b><math>27,7 \pm 0,1</math></b>

Fonte: Elaborado pela autora.

### 5.3 Ensaio de expansão de furos

A Tabela 7 apresenta os valores médios de razão de expansão de furos para cada uma das condições estudadas. Os valores foram plotados na Figura 6 para melhor comparação individual, permitindo estabelecer com facilidade relações entre as variáveis estudadas e as propriedades de expansão de furos. Sob as mesmas condições, o aço S355MC aparenta possuir valores de expansão de furos ligeiramente superiores, não havendo caso em que o aço LNE 380 exibisse REF superior.

Ao mesmo tempo, diâmetros de punção maiores resultaram em REF mais altas. É importante ressaltar, entretanto, que devido às dimensões de ambos os punções, os ensaios foram interrompidos antes de haver formação de falhas nos corpos de prova, mas sim quando os limites dimensionais eram atingidos.

Por sua vez, a velocidade de ensaio gerou efeitos diferentes nos metais em função do diâmetro do punção: com ambos os punções, a maior velocidade de aplicação da carga pareceu beneficiar a REF do S355MC, ao passo que a velocidade de aplicação da carga prejudicou o aço LNE 380 quando utilizado o punção menor, ou não provocou diferenças, quando do uso do punção maior.

Por sua vez, o acabamento do furo não gerou grandes diferenças de propriedades em nenhuma das condições estudadas, estando cada qual dentro de suas faixas de erro. Desta forma, conclui-se que as duas formas de acabamento não geram

diferenças na expansibilidade dos furos, ou seja, os efeitos microestruturais gerados pela estampagem e usinagem são similares.

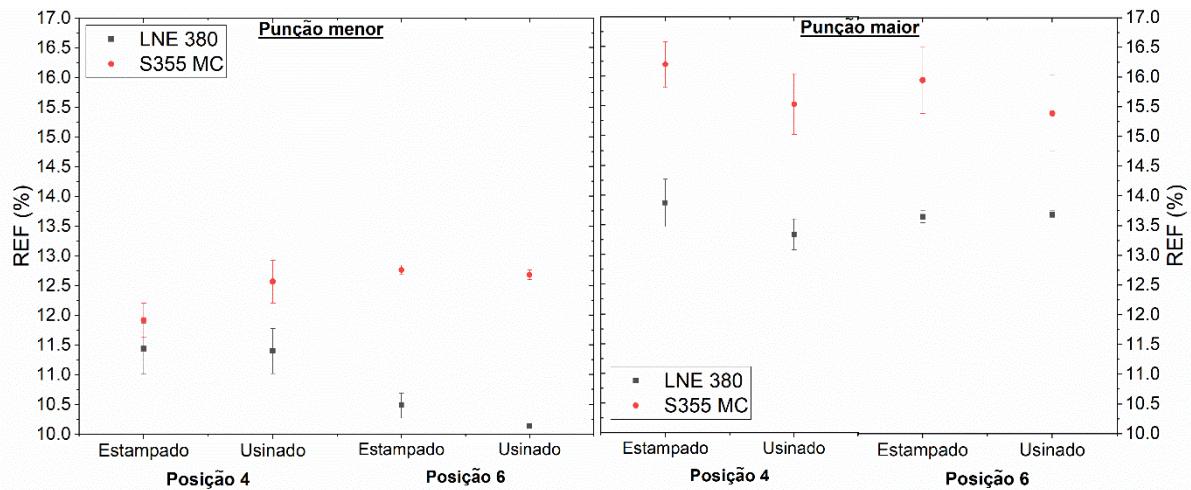
Tabela 7 – Razões de expansão de furo em função das diferentes variáveis de ensaio.

Aço	Diâmetro do punção	Posição da válvula (velocidade)	Acabamento de furo	REF (%)
LNE 380	Menor	Posição 4	Estampado	11,44 ± 0,43
			Usinado	11,40 ± 0,38
		Posição 6	Estampado	10,48 ± 0,21
			Usinado	10,13 ± 0,01
	Maior	Posição 4	Estampado	13,87 ± 0,40
			Usinado	13,34 ± 0,26
		Posição 6	Estampado	13,65 ± 0,10
			Usinado	13,68 ± 0,08
S355MC	Menor	Posição 4	Estampado	11,92 ± 0,29
			Usinado	12,57 ± 0,36
		Posição 6	Estampado	12,76 ± 0,08
			Usinado	12,68 ± 0,08
	Maior	Posição 4	Estampado	16,20 ± 0,38
			Usinado	15,53 ± 0,51
		Posição 6	Estampado	15,95 ± 0,56
			Usinado	15,39 ± 0,64

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos mostram que ambos os aços apresentam propriedades adequadas de expansão de furo nas condições analisadas, sendo que a velocidade de ensaio é a propriedade que gerou maior efeito na REF, sendo que o aço S355 MC aparenta sempre se beneficiar de maiores velocidades de aplicação da carga. Por sua vez, a REF por si só não permite estabelecer grandes diferenças entre os diferentes acabamentos de furo nas propriedades finais. É necessário, portanto, avaliar o alongamento relativo obtido a partir de cada ensaio, de forma a estabelecer alguma relação entre o acabamento de furo e a conformabilidade dos metais em questão.

Figura 6 – Razões de expansão de furo para o aço LNE 380 e S355 MC.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por sua vez, foi realizado cálculo do alongamento do diâmetro para as amostras. O cálculo foi realizado a partir da variação do diâmetro, de acordo com a equação

$$A_\phi A_T = \text{REF} \quad (2)$$

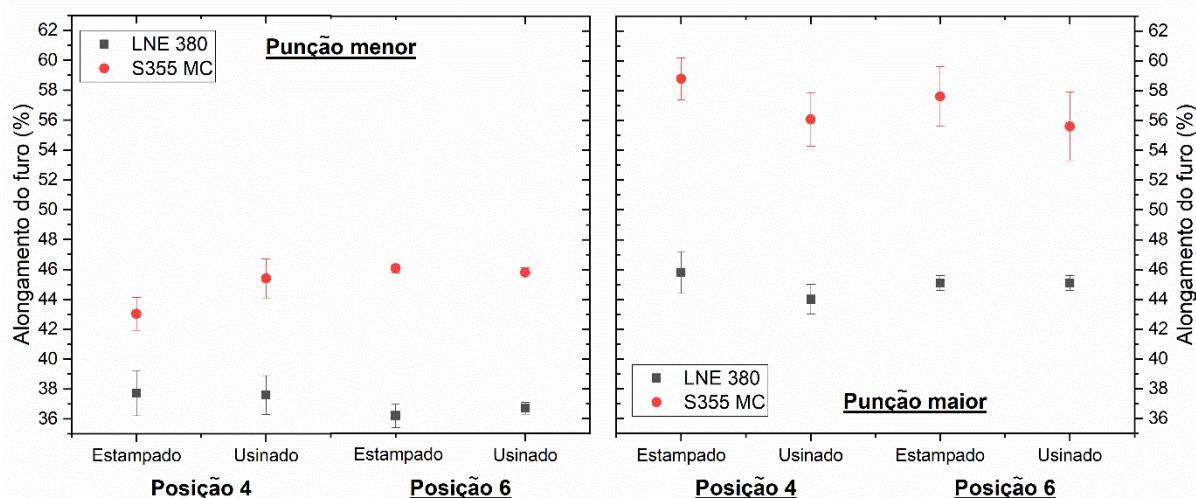
onde  $A_\phi$  é o alongamento diametral,  $A_T$  é o alongamento sob tração, e  $d_f$  e  $d_0$  são os diâmetros final e inicial. Os valores calculados, em porcentagem, estão listados na Tabela 8, e esquematizados na Figura 7.

Tabela 8 – Alongamento percentual do diâmetro nos ensaios de expansão de furo.

Aço	Diâmetro do punção	Posição da válvula (velocidade)	Acabamento de furo	Alongamento (%)
LNE 380	Menor	Posição 4	Estampado	37,7 ± 1,5
			Usinado	37,6 ± 1,3
		Posição 6	Estampado	36,2 ± 0,8
			Usinado	36,7 ± 0,4
	Maior	Posição 4	Estampado	45,8 ± 1,4
			Usinado	44,0 ± 1,0
		Posição 6	Estampado	45,1 ± 0,5
			Usinado	45,1 ± 0,5
S355MC	Menor	Posição 4	Estampado	43,0 ± 1,1
			Usinado	45,4 ± 1,3
		Posição 6	Estampado	46,1 ± 0,3
			Usinado	45,8 ± 0,3
	Maior	Posição 4	Estampado	58,5 ± 1,4
			Usinado	56,1 ± 1,8
		Posição 6	Estampado	57,6 ± 2,0
			Usinado	55,6 ± 2,3

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 7 – Alongamento percentual dos diâmetros no ensaio de expansão de furo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se, naturalmente, a repetição das tendências ora vistas para REF no alongamento, uma vez que o último é função do primeiro. Os valores de alongamento

encontram-se entre 36,2 e 45,8 % para o aço LNE 380 e entre 43,0 e 58,5 % para o S355MC. Aqui, entende-se a razão pela qual não ocorre trinca nos corpos de prova: o alongamento observado não corresponde ao alongamento esperado para cada punção, de 50 e 90%.

Não obstante, podemos dizer que os resultados são positivos, em especial para o aço S355MC, que demonstra ter maior capacidade de alongamento percentual. Isto se dá devido às propriedades mecânicas deste aço, uma vez que estas são superiores. Desta forma, sob as condições analisadas, o aço S355MC apresenta propriedades superiores de expansão de furo nas condições estudadas. Após o ensaio, ainda é importante compreender a evolução microestrutural destes aços durante a expansão de furo. Desta forma, a próxima sessão faz uma análise microestrutural dos corpos de prova, nas regiões não deformadas e deformadas, com uma análise de tamanho de grãos nas diferentes regiões, bem como análise das inclusões óxidas presentes.

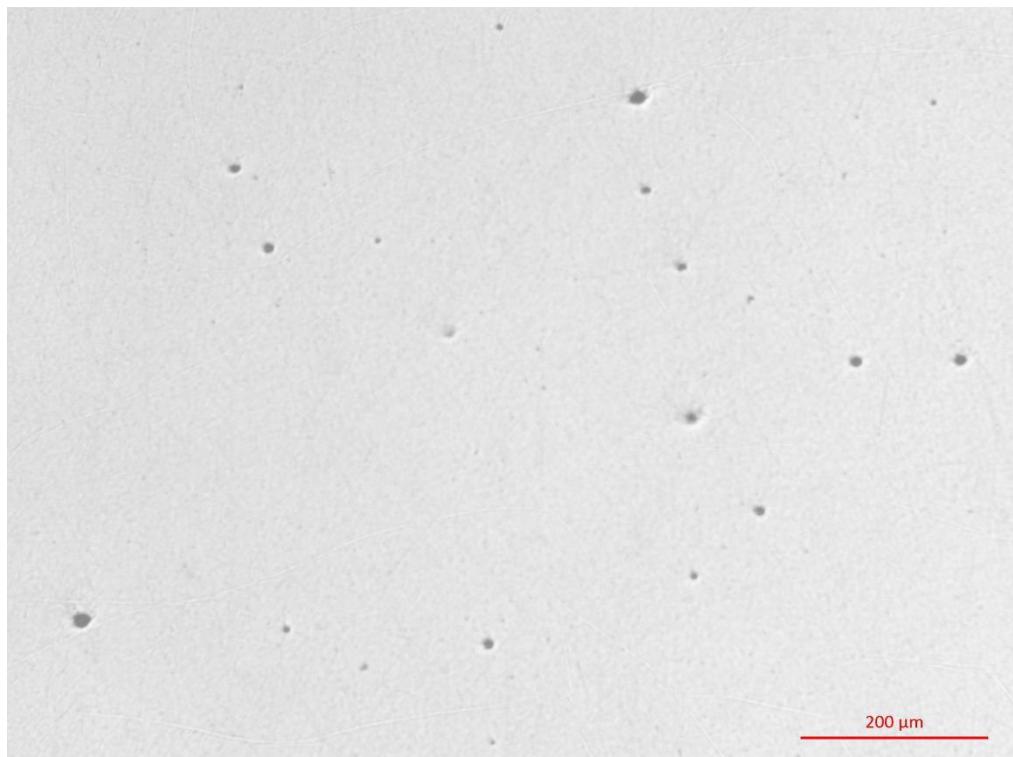
## **5.4 Microestrutura e desenvolvimento microestrutural na deformação**

### **5.4.1 Análise de inclusões e tamanho de grão no aço S355MC**

A Figura 8 mostra uma micrografia sem ataque do aço S355MC, onde se pode observar a presença de inclusões óxidas. Observa-se a ocorrência de inclusões globulares finamente dispersas ao longo da chapa. A classificação com base na norma permite classificar as inclusões como série fina nível 1 ½.

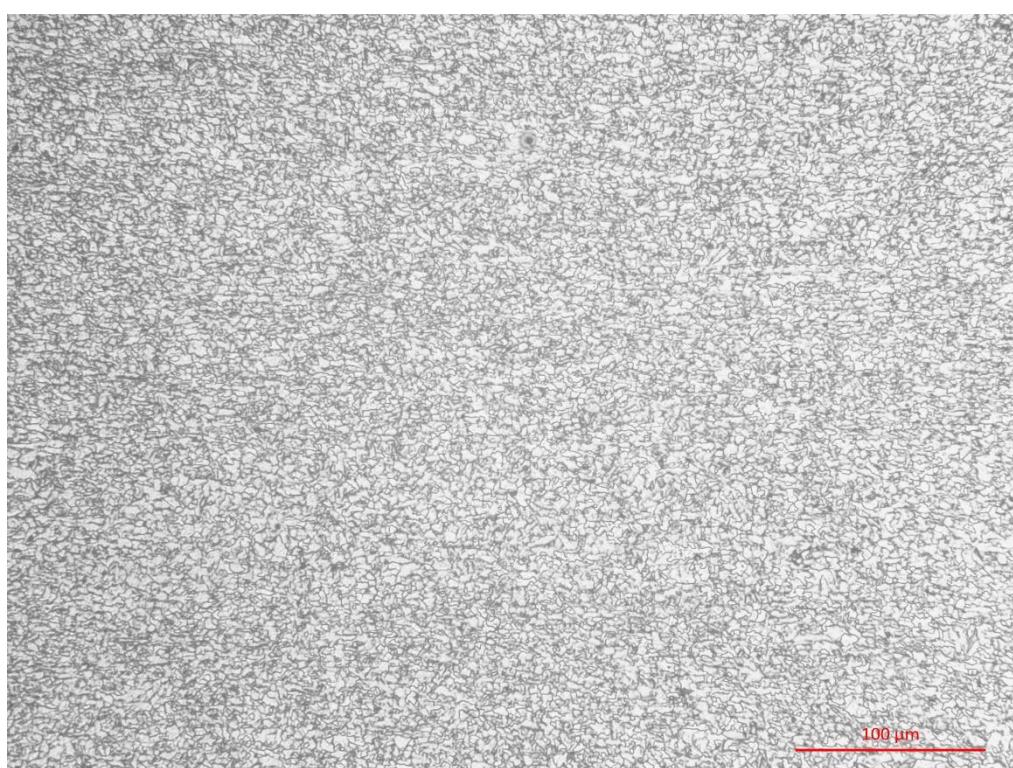
Por sua vez, a Figura 9 permite visualizar a distribuição de grãos na amostra atacada com nital. Observa-se uma fina distribuição de grãos ferríticos, de geometria regular, cujo tamanho foi classificado como ASTM 10.

Figura 8 – Micrografia sem ataque típica para o aço S355MC, mostrando a distribuição de inclusões óxidas globulares.



Fonte: Elaborado pela autora.

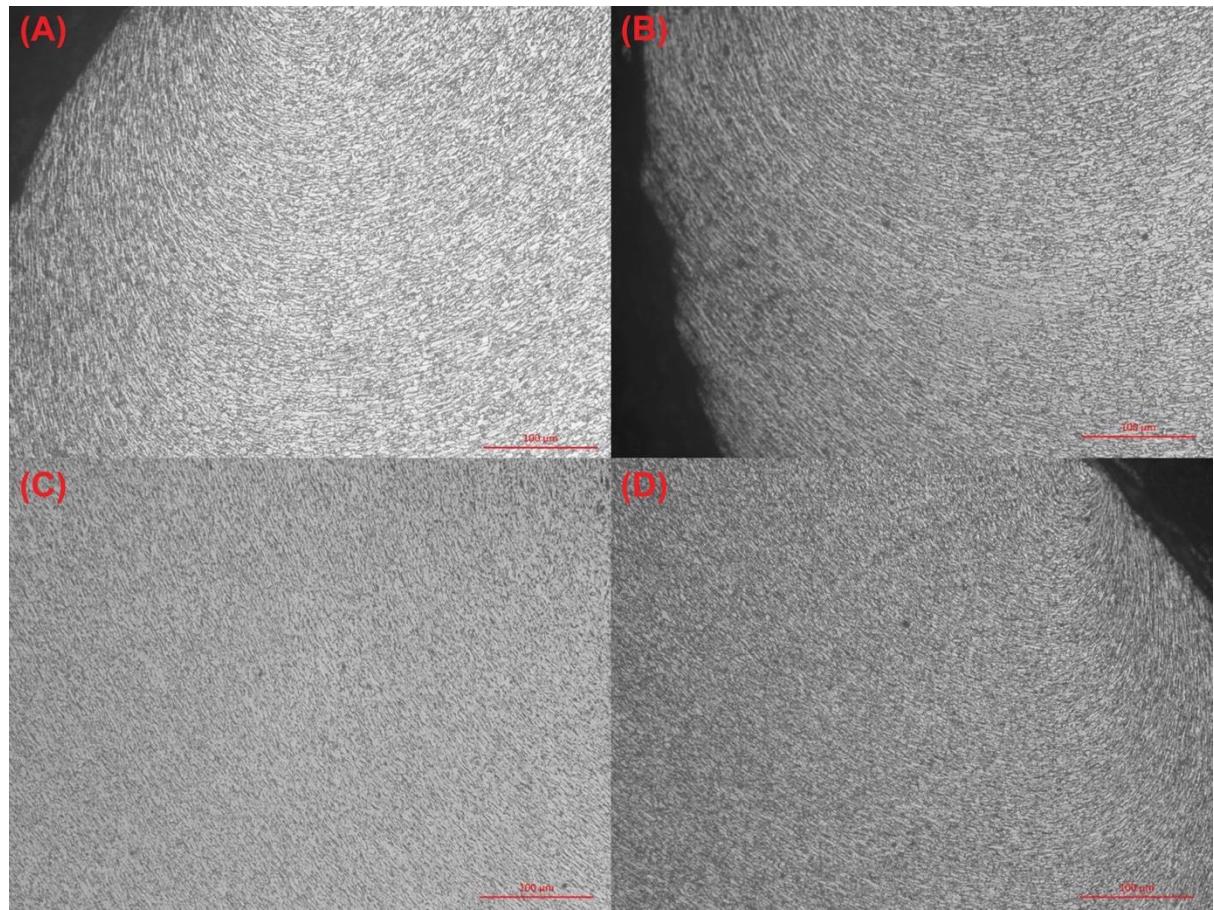
Figura 9 – Micrografia atacada com Nital do aço S355MC, mostrando uma fina distribuição de grãos ferríticos.



Fonte: Elaborado pela autora.

A deformação plástica gerada pela aplicação de força no punção ocasionou o estiramento dos grãos na direção de deformação, que se tornaram alongados. Não se observa grandes diferenças na morfologia de grão ao comparar a velocidade de avanço do punção, tipo de punção ou tipo de acabamento. Um comparativo das regiões deformadas é mostrado na Figura 10. Evidencia-se que as regiões deformadas possuem morfologias similares, sem grandes diferenças em termos de alongamento dos grãos e largura da região deformada. Os grãos foram classificados com tamanho ASTM 10.

Figura 10 – Comparativo das regiões deformadas do aço S355MC sob diferentes condições de ensaio.



Fonte: Elaborado pela autora.

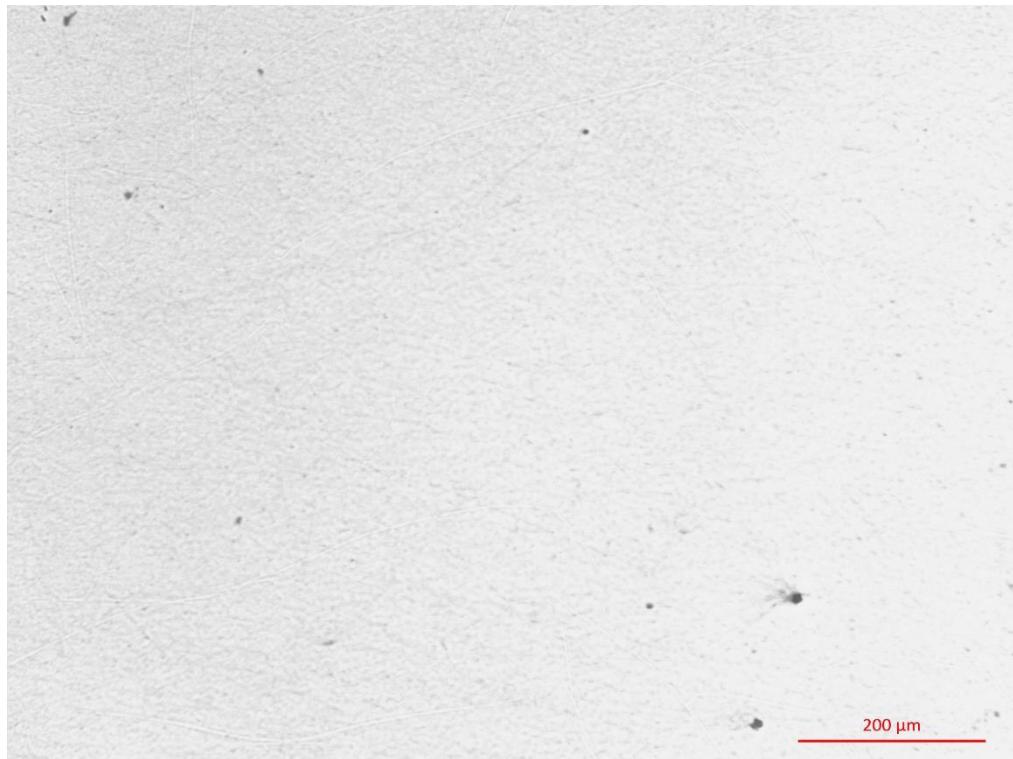
Nota: (a) Menor punção, posição 4, estampada;  
 (b) Menor punção, posição 6, estampada;  
 (c) Menor punção, posição 4, usinada;  
 (d) Maior punção, posição 4, estampada.

#### 5.4.2 Análise de inclusões e tamanho de grão no aço LNE 380

A Figura 11 apresenta micrografia antes do ataque para uma amostra de aço LNE 380. Observa-se mais uma vez a presença de inclusões óxidas de série fina, entretanto de nível 1, classificação que permite dizer que a densidade de inclusões neste aço é menor, quando comparada com o S355MC.

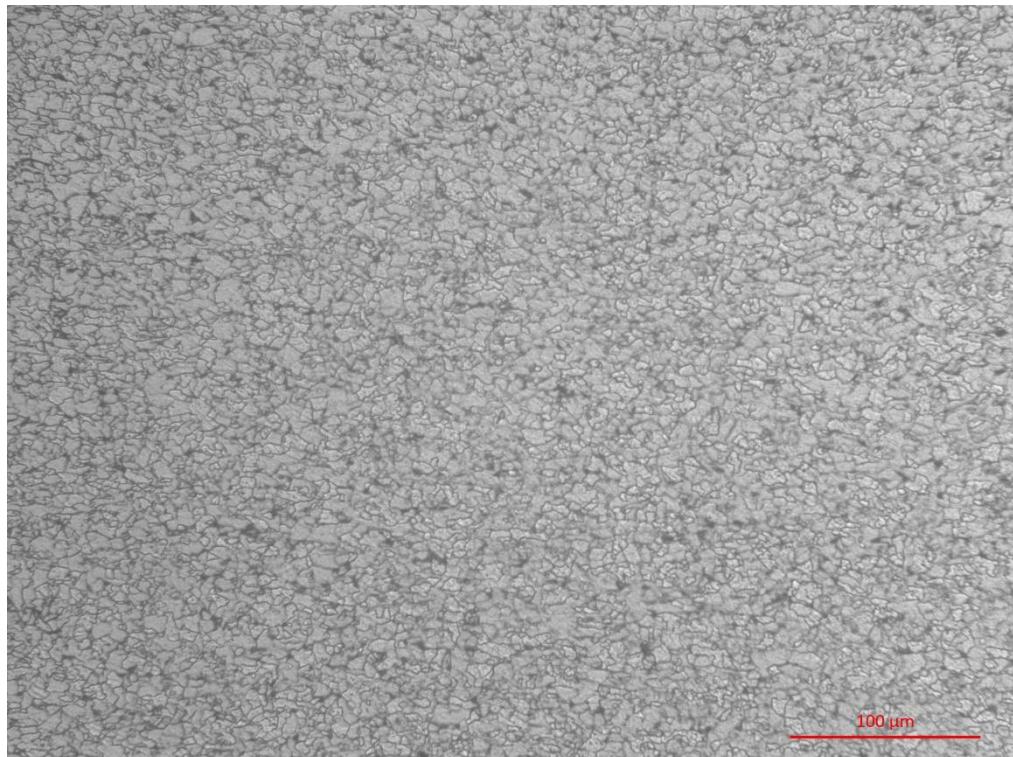
Já quando comparamos o tamanho de grão entre os aços, é possível inferir que o aço LNE 380 possui grãos um pouco maiores (Figura 12), embora ainda possam ser classificados como ASTM 10.

Figura 11 – Micrografia sem ataque do aço LNE 380 onde é possível observar a presença de inclusões óxidas.



Fonte: Elaborado pela autora.

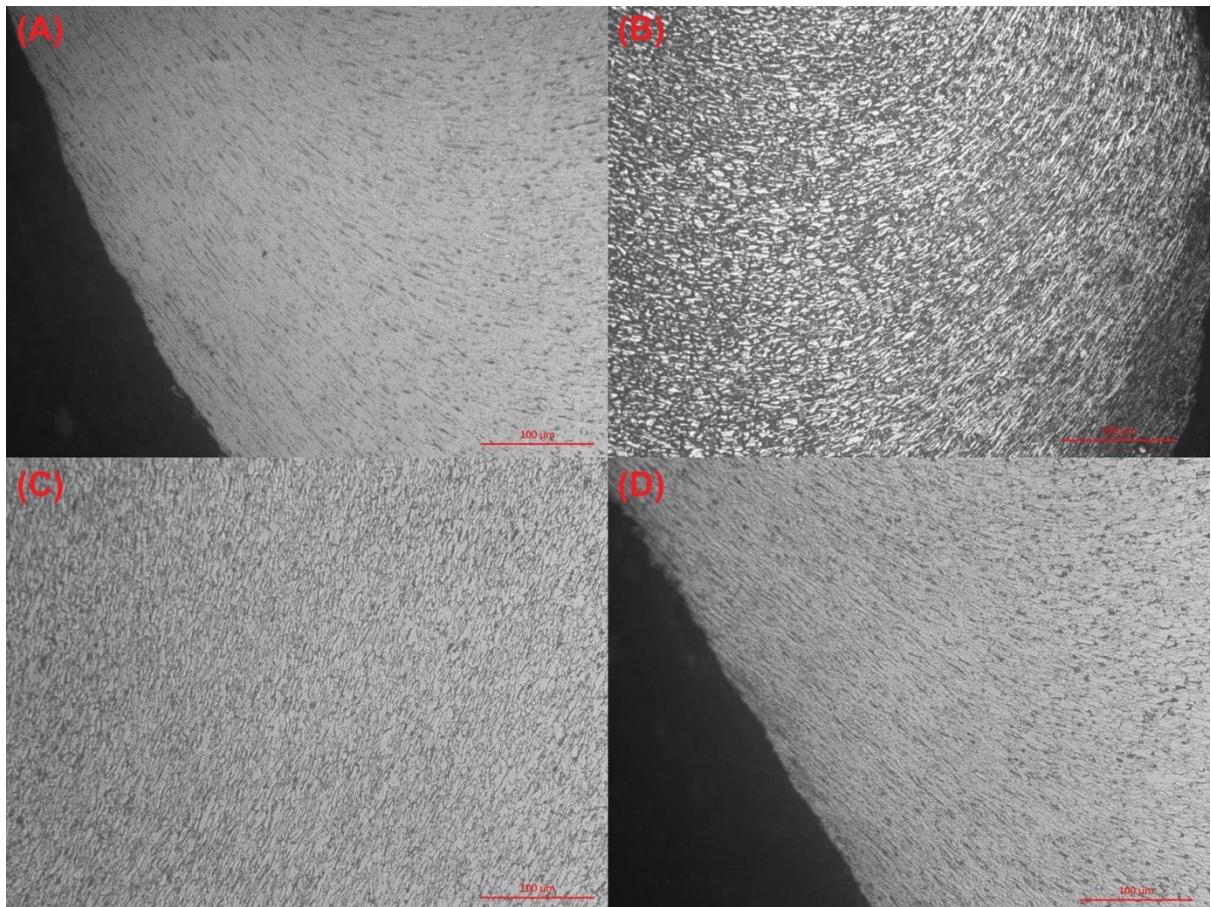
Figura 12 – Micrografia do aço LNE 380 após ataque com Nital, possibilitando identificação dos grãos ferríticos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Um comparativo das regiões deformadas sob diferentes condições para o aço LNE 380 é apresentado na Figura 13. Similar ao S355MC, observa-se o estiramento dos grãos na direção de deformação. Ao mesmo tempo, o estiramento gera microestruturas bastante similares sob as diferentes condições de ensaio. Os grãos deformados classificam-se como tamanho ASTM 10.

Figura 13. Micrografias das regiões deformadas do LNE 380 sob diferentes condições de ensaio.



Fonte: Elaborado pela autora.

- Nota:
- (a) Menor punção, posição 4, estampada;
  - (b) Menor punção, posição 6, estampada;
  - (c) Menor punção, posição 4, usinada;
  - (d) Maior punção, posição 4, estampada.

## 5.5 Microureza Vickers

As medidas de microureza Vickers foram realizadas em amostras selecionadas, sob o critério de melhor centralização do furo, com a obtenção de três pontos em regiões distantes das bordas e cinco pontos em regiões próximas às bordas do furo. A Tabela 9 sumariza os valores médios de microureza observados, onde termo HV foi utilizado por denominação para a empresa, pela equação de Vickers o valor é dado em kgf/mm<sup>2</sup>. Não houve aparente dependência da microureza em função da distância da borda nas proximidades das regiões mais deformadas, e por isto valores médios são dados.

Tabela 9 - Microdureza antes e após deformação por expansão de furo, com variação de tamanho de punção e velocidade de ensaio.

Aço	Diâmetro do punção	Posição da válvula (velocidade)	Dureza HV Distante da borda do furo	Dureza HV Região da borda do furo
LNE 380	Menor	Posição 4	179 ± 8	228 ± 11
		Posição 6	178 ± 3	235 ± 9
	Maior	Posição 4	186 ± 3	227 ± 4
		Posição 6	189 ± 2	240 ± 9
S355MC	Menor	Posição 4	191 ± 5	243 ± 9
		Posição 6	186 ± 3	245 ± 14
	Maior	Posição 4	188 ± 4	252 ± 11
		Posição 6	188 ± 2	262 ± 24

Fonte: Elaborado pela autora.

Aqui, observa-se que a microdureza na região distante da borda é muito similar no aço S355MC em todas as condições de ensaio. A diferença da microdureza nas regiões das bordas é pronunciada como função do diâmetro do punção, onde se observa uma maior dureza nas amostras em que o punção maior foi utilizado, o que é esperado devido a uma maior deformação. A velocidade de avanço, entretanto, não apresenta considerável variabilidade.

As mesmas considerações podem ser feitas com relação a região próxima as bordas no LNE 380, onde o maior punção gera maior dureza, sem observação de efeito da velocidade de ensaio. É interessante observar, entretanto, que a dureza na região distante do furo parece ser maior no caso de maior diâmetro do punção, o que é indicativo de que a região de interação é maior neste caso. Portanto, a deformação plástica gerada pela expansão de furo gera um encruamento de uma região mais ampla da chapa.

Ora, visto que o encruamento é um processo de aumento da resistência mecânica, a maior região de interação do aço LNE 380 é consistente com os menores valores de REF observados. Neste contexto, este aumento de resistência mecânica surge como força contrária à deformação plástica necessária para a expansão de furo. Ainda é importante mencionar, que para este aço, a diferença entre tensão de escoamento e tensão limite de resistência é de aproximadamente 73 MPa, em contraste com a diferença de aproximadamente 54 MPa para o aço S355MC. Isto é um indicativo de que o coeficiente de encruamento do LNE 380 é maior e, portanto, o aço S355MC é capaz de sofrer deformação plástica mais considerável sem que haja tanto aumento de resistência mecânica, o que reflete em maior razão de expansão de furos.

O conjunto de dados aqui estudado, portanto, permite estabelecer que o aço S355MC apresentou melhores propriedades de expansão de furos. Em contrapartida, os estudos com relação a expansão de furos deste precisam ser continuados; em especial considerando a necessidade de estudo do alongamento do diâmetro até as proximidades de 90%, uma vez que tais valores não puderam ser obtidos nas condições estudadas. Desta forma, não se recomenda a substituição do aço S355MC pelo aço LNE 380 para a fabricação das peças.

## 6 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado realizou um estudo comparativo das propriedades de expansão de furo de chapas dos aços S355MC e LNE 380. Tal estudo foi necessário diante da apresentação de problemas de furo extrudado em peças fabricadas para a indústria automobilística.

Análise química das chapas mostrou conformidade dos aços S355MC e LNE 380 de acordo com as normas EN 10149-2 e NBR 6656, respectivamente. Também estão de acordo os valores de propriedades mecânicas em tração, com ambos os aços apresentando alongamentos superiores ao mínimo requerido.

Por sua vez, as propriedades de expansão de furo foram estudadas em função de três variáveis: tamanho do punção, velocidade de avanço do punção e tipo de acabamento do furo. O aço LNE 380 apresentou propriedades inferiores de expansão de furos, com REF entre 10,13 % para punção menor, velocidade alta em furo usinado e 13,87 % para punção maior, velocidade baixa e furo estampado. O alongamento máximo observado foi de 45,8 % na condição de punção maior, velocidade baixa e furo estampado, sem que houvesse formação de trinca.

O aço S355MC demonstrou propriedades superiores, com REF mínima de 11,92 % para punção menor, velocidade baixa e furo estampado e máxima de 16,20 % para punção maior, velocidade baixa e furo estampado. O alongamento máximo observado foi de 58,5% na condição de punção maior, velocidade baixa e furo estampado, sem formação de trinca. A ausência de trincas em ambos os aços indica a necessidade de realizar os ensaios sob condições mais severas, na intenção de obter maiores alongamentos de diâmetro e estabelecimento completo das propriedades de expansão de furo para os aços.

As micrografias indicam a presença de inclusões óxidas tipo finas, de nível 1 ½ e 1 nos aços S355MC e LNE 380, indicando maior densidade de inclusões no S355MC. Ao mesmo tempo, análise de tamanho de grão indica que ambos os aços podem ser classificados como ASTM 10.

Análise de microdureza aponta endurecimento das regiões deformadas, com dureza um pouco maior para ensaios realizados em maior velocidade, em ambos os aços. Para o aço LNE 380, o maior punção parece ter provocado um certo endurecimento da região mais distante do furo.

Por fim, conclui-se que o aço S355MC apresentou propriedades superiores de expansão de furo, e a sua substituição pelo aço LNE 380 não é recomendada.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6656. Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade - Especificação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2008.
- ABNT NBR 6673. Produtos planos do aço - Determinação das propriedades mecânicas à tração. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 14, 1981.
- ABNT NBR ISO 6507-1. Materiais Metálicos - Ensaio de dureza Vickers Parte 1: Método de Ensaio. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 30, 2019.
- ALMEIDA, A. F.; THESING, L. A.; SCHAEFFER, L.; BOFF, U. Estudo testa a conformabilidade de aços avançados de alta resistência pelo método de expansão de furos. **Corte e Conformação de Metais**, v. 138, p. 14–21, 2016.
- ASTM E8. ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1. **Annual Book of ASTM Standards** 4, n. C, p. 1–27, 2010. DOI: 10.1520/E0008.
- ASTM A-751. Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products. **ASTM International**, v. ASTM A-751, p. 1–6, 2011. DOI: 10.1520/A0751-14A.
- ASTM E112-10. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. **Astm E112-10**, p. 1–27, 2010. DOI: 10.1520/E0112-13.1.4.
- ASTM E45-18A. Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. n. June 1997, p. 1–15, 1999. DOI: 10.1520/E0045-18A.1.7.
- BENASCIUTTI, D.; LANZUTTI, A.; RUPIL, G.; FRAENKEL HAEBERLE, E. Microstructural and mechanical characterisation of laser-welded lap joints with linear and circular beads in thin low carbon steel sheets. **Materials and Design**, v. 62, p. 205–216, 2014. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.05.005.
- BILLUR, E.; ALTAN, T. Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part I. **Stamping Journal**, p. 12–13, 2013.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 4. ed. São Paulo: Atual Editora, 1987.

- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 2012.
- COMSTOCK, R. J.; SCHERRER, D. K.; ADAMCZYK, R. D. Hole Expansion in a Variety of Sheet Steels. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 15, n. 6, p. 675–683, 2006. DOI: 10.1361/105994906X150830.
- CONE, E. F. Low-alloy high tensile steels. **Steel**, p. 41–44, 1934.
- DAVIS, J. R. **Alloying: Understanding the basics**. 1. ed. Novelty, OH: ASM International, 2001.
- EN 10149-2:2013. **Cold rolled low carbon steel flat products for cold forming - Part 2: technical delivery conditions for thermomechanically rolled steels**, CEN European Committee for Standardization, 2013.
- FREES, M. V. S. **Avaliações sobre o processo de dobramento do aço NBR 6656 LNE 380**. 2017. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.
- HANCE, B. Advanced high strength steel: deciphering local and global formability. In: INTERNATIONAL AUTOMOTIVE BODY CONGRESS 2016. Dearborn, Michigan, p. 10, 2016.
- HASEGAWA, Kohei; KAWAMURA, Kenji; URABE, Toshiaki; HOSOYA, Yoshihiro. Effects of Microstructure on Stretch-flange-formability of 980 MPa Grade Cold-rolled Ultra High Strength Steel Sheets. **ISIJ International**, v. 44, n. 3, p. 603–609, 2004. DOI: 10.2355/isijinternational.44.603.
- MINITAB. **Experimentos fatoriais e fatoriais fracionados**. 2019. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/factorial-and-fractional-factorial-designs/#what-is-a-full-factorial-and-fractional-factorial-design>. Acesso em: 14 out. 2020.
- NASCIMENTO, M.; BRANT, F. **Maria Maria**. Intérprete: Milton Nascimento. In: Clube de esquina 2. [S.I.]: EMI, 1988. (3 min 02 s).
- PIERCE, J. R. The fuel consumption of automobiles. **Scientific american**, v. 232, n. 1, p. 34–44, 1975.
- TISZA, Miklós. Development of Lightweight Steels for Automotive Applications. In:

**Engineering Steels and High Entropy-Alloys.** IntechOpen, 2020. v. 395p. 116–124.  
DOI: 10.5772/intechopen.91024.

YOON, Jae Ik; JUNG, Jaimyun; LEE, Hak Hyeon; KIM, Gyo-Sung; KIM, Hyoung Seop.  
Factors governing hole expansion ratio of steel sheets with smooth sheared edge.  
**Metals and Materials International**, v. 22, n. 6, p. 1009–1014, 2016. DOI:  
10.1007/s12540-016-6346-5.