

# COMPARATIVO DE ESTAMPABILIDADE ENTRE UM AÇO MICROLIGADO E UM AÇO CARBONO-MANGANÊS

*Data de aceite: 02/05/2024*

### **Daniel Augusto Ferro**

Engenheiro Mecânico pelo Instituto Mauá de Tecnologia, Mestre em Engenharia Metalúrgica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Engenheiro de Assistência Técnica e Desenvolvimento de Produto da Waelzholz Brasmetal

### **Fernando Generoso**

Engenheiro Metalurgista pela Universidade Federal de Ouro Preto, Mestre em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense, Especialista de Desenvolvimento de Produtos da Arcelor Mittal Tubarão

**RESUMO:** Visando atender uma demanda de maior capacidade de conformação mantendo elevados níveis de resistência mecânica almeja-se, neste estudo, realizar um comparativo entre composição química, microestrutura, propriedades mecânicas e estampabilidade de um aço Carbono-Manganês e um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) com limite de escoamento mínimo de 350 MPa, uma vez que inúmeras peças fabricadas com essa classe de aço apresentam elevado repuxo inclusive com expansão de furo, como é o caso da peça

objeto deste estudo. Mediante ajustes de composição química e tratamento termomecânico para melhor estabilidade de propriedades mecânicas e espessura, foi possível obter boa conformabilidade do aço microligado, cujas propriedades mecânicas encontradas foram (limite de resistência 472 MPa, limite de escoamento 404 MPa, alongamento base 50 de 35% e expoente de encruamento  $n$  de 0,16) e microestrutura com tamanho de grão 5, inclusões não metálicas globulizadas tipo D nível 1 e série fina além de carbonetos esferoidizados uniformemente distribuídos na matriz ferrítica ao passo que o aço Carbono-Manganês com limite de resistência e escoamento similares apresentou resultados comparativamente piores em relação a conformabilidade (limite de resistência 508 MPa, limite de escoamento 398 MPa, alongamento base 50 de 32% e expoente de encruamento  $n$  de 0,12), microestrutura com tamanho de grão 9, inclusões não metálicas alongadas tipo C nível 1 série fina e fração de perlita lamelar que, morfológicamente, não é a microestrutura mais indicada para processos de conformação. Face ao exposto, o desenvolvimento do trabalho possibilitou elevar a conformabilidade

do aço facilitando a estampagem da peça estudada e sem a presença de trincas, mesmo em trechos de elevada conformação/expansão de furo conforme foi possível observar nas fotos comparativas das peças estampadas com o aço Carbono-Manganês e o Microligado projetado para melhor conformabilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aços Estruturais; Aços Carbono-Manganês; Aços Microligados (ARBL); Estampabilidade; Expansão de Furo.

**ABSTRACT:** Aiming to reach higher stampability and maintaining high levels of mechanical properties, the intention of this paper is to make a comparison of stampability between Carbon-Manganese (C-Mn) and High Strength Low Alloyed (HSLA) steels with yield strength above 350 MPa, since many parts manufactured with this steel grade normally have high deformation mainly on hole expansion areas, as it is the case of the part studied. Through the use of chemical composition adjustments and thermomechanical treatment for better stability of mechanical properties and thickness variation it was possible to reach good stampability of microalloyed steel (HSLA) whose mechanical properties achieved were (Strength limit of 472 MPa, Yield limit of 404 MPa, Elongation on 50mm basis of 35% and Hardening Exponent of 0,16) and microstructure with grain size 5, thin series and globalized non metallic inclusions level 1 type D plus spheroidized carbides randomly spread on a ferritic basis in comparison to the Carbon-Manganese steel with similar mechanical properties that presented worse stampability results (Strength limit of 508 MPa, Yield limit of 398 MPa, Elongation on 50mm basis of 32% and Hardening Exponent of 0,12), microstructure with grain size 9, thin series and elongated non metallic inclusions level 1 type C and fraction of lamellar pearlite which morphology is not recommended to be deformed during stamping process. Having said that, the development of this article increased the steel stampability where it was possible to manufacture parts without any cracks even in hole expansion areas as it could be seen in the comparative photos taken from the parts manufactured with Carbon-Manganese and High Strength Low Alloy steels.

**KEYWORDS:** Carbon-Manganese Steels; High Strength Low Alloy Steels (HSLA); Stampability; Hole Expansion.

## INTRODUÇÃO

Com uma demanda cada vez maior por aços planos de elevada propriedade mecânica e boa estampabilidade, além de uma maior estabilidade dimensional da peça estampada, são necessários estudos e desenvolvimentos dos aços estruturais aliando esforços tanto no que tange o processo siderúrgico quanto o processo metalúrgico de forma a atender os requisitos de conformabilidade da peça com mínima variação possível na espessura e propriedades mecânicas destes aços, possibilitando em muitos casos a redução de espessura e peso das peças submetidas a esforços durante seu uso sem comprometer a segurança da aplicação final, além de redução de custo devido à redução de peso na peça estampada.

Uma forte motivação para a redução no peso das peças automotivas é a inerente redução do consumo de combustível com a diminuição do peso do carro como um todo.

Outra demanda necessária para o setor é a homogeneidade de propriedades mecânicas e espessura ao longo das bobinas e lotes fornecidos, uma vez que esse requisito permite uma melhor estabilidade do processo de conformação e do dimensional das peças com o mínimo de ajustes no ferramental usado na estampagem das mesmas.

Além das características técnicas demandadas pelo mercado, um custo competitivo no processo de produção do aço bem como de transformação do mesmo em peças com o mínimo de variação dimensional possível é primordial, dada a elevada exigência por qualidade e custo do mercado a que se destina as peças estampadas.

## **OBJETIVO**

O trabalho tem o objetivo de relatar o processo de desenvolvimento de um aço plano microligado com valores especificados de limite de resistência de 450 a 570 MPa, limite de escoamento de 350 a 450 MPa, alongamento na base 5 de 25% mínimo e dimensões de 2,5mm de espessura por 245mm de largura aplicado em uma peça usada no sistema de travamento da porta de veículos automotores. Este aço foi classificado como LNE355 conforme norma NBR 6656:2016, porém com propriedades mecânicas ligeiramente diferenciadas se comparado com a norma pública pois a produção era originalmente feita com aço Carbono-Manganês.

O projeto foi desenvolvido entre os grupos Arcelor Mittal e Waelzholz Brasmetal responsáveis pela produção e transformação do aço microligado sendo fornecido em bobinas laminadas a quente com processo de ajuste de espessura via laminação a frio para posterior transformação em peças através de estampagem com posterior revestimento de zinco com cromato como passivador, participaram do projeto de melhoria outros dois players da cadeia automotiva, um deles responsável pela conformação e revestimento da peça e outro pela montagem da mesma no sistema de travamento da porta.

## **PEÇA OBJETO DO ESTUDO**

De forma a exemplificar o produto e as condições de acabamento em trechos de expansão de furo e sobretudo mantendo a confidencialidade das cotas de desenho para o qual este desenvolvimento foi direcionado, segue abaixo uma foto da peça, que é usada no sistema de travamento da porta do veículo automotivo. Atenção especial deve ser dada a condição de acabamento na região de expansão de furo.

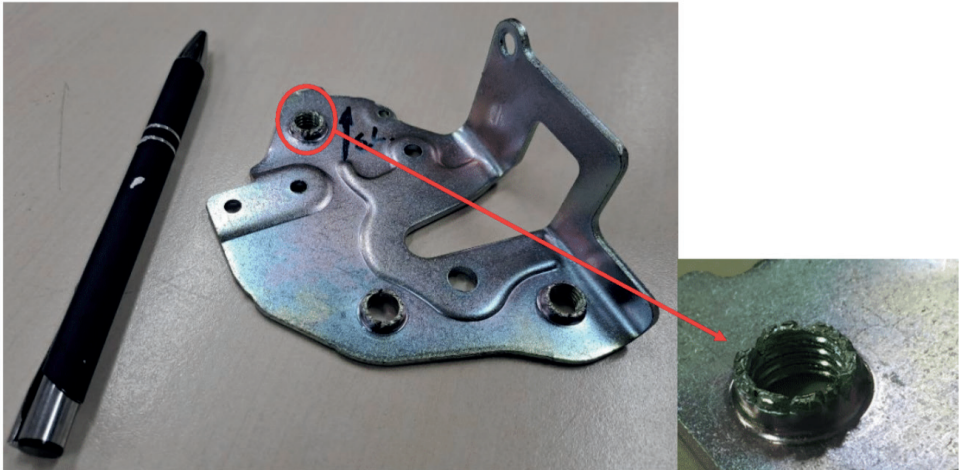


Figura 1: Foto da peça objeto do estudo com destaque as trincas presentes na região de expansão de furo.

Principal problema que ocorre durante a estampagem da peça em estudo é a presença de trincas em região de expansão de furo, inclusive comprometendo a fixação do parafuso usado durante montagem da peça no sistema de travamento da porta do veículo.

Tal anomalia também reduz a vida útil da broca usada para a usinagem da rosca, uma vez que a broca é integrada ao ferramental de estampagem onde a condição do repuxo influencia diretamente nos esforços da broca gerando quebra e desgaste prematuro com consequentes paradas da prensa para a troca da broca gerando maior tempo de setup durante processo de estampagem.

## **CORRELAÇÃO ENTRE EXPANSÃO DE FUROS, MICROESTRUTURA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA**

De acordo com Takahashi<sup>(1)</sup> as propriedades mecânicas desejadas são determinadas pela combinação da microestrutura dos aços.

O endurecimento por precipitação é amplamente usado para diversos tipos de aço de alta resistência sendo introduzidos precipitados finos que podem elevar a resistência mecânica dos aços em 200 a 300 MPa além de contribuir para a expansão de furo, uma vez que, durante o reaquecimento da placa antes da laminação a quente, os elementos microligantes são facilmente dissolvidos na matriz austenítica.

Os principais elementos de liga usados no endurecimento dos aços por precipitação são Nb, Ti, Mo e V.

Ainda de acordo com Takahashi<sup>(1)</sup> diversos fatores influenciam na capacidade de expansão de furos em chapas de aço, entre eles a diferença de dureza entre as fases, número de fases duras, conteúdo de C, inclusões alongadas, textura cristalina, valor

de índice de Lankford “Rmédio” e de expoente de encruamento “n”. Quanto maior a uniformidade da microestrutura, maior serão as propriedades de expansibilidade de furos no material.

É importante a redução de inclusões alongadas ao mínimo, adicionalmente também é necessário a redução de segregações e impurezas, uma vez que estas características interferem na expansibilidade de furos por estarem relacionados com pontos de nucleação de trincas durante processo de conformação.

## CARACTERÍSTICAS DA LIGA LNE355 CONFORME NORMA NBR 6656:2016<sup>(2)</sup>

As composições químicas especificadas em norma para as diferentes grades de material microligado são dadas pela tabela abaixo com destaque a grade de aço objeto deste estudo:

Grau	C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Al mín.	Nb máx.	V máx.	Ti máx.	Mo máx.	B máx.
LNE200 <sup>a</sup>	0,12	0,60	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE230 <sup>a</sup>	0,12	0,80	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE260 <sup>a</sup>	0,16	1,00	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE280 <sup>a</sup>	0,16	1,00	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE315 <sup>a</sup>	0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
<b>LNE355<sup>b</sup></b>	<b>0,12</b>	<b>1,10</b>	<b>0,35</b>	<b>0,025</b>	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,20</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
LNE380 <sup>b</sup>	0,12	1,20	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE400 <sup>b</sup>	0,15	1,40	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE420 <sup>b</sup>	0,12	1,60	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15	-	-
LNE460 <sup>b</sup>	0,12	1,60	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15	-	-
LNE500 <sup>b</sup>	0,12	1,70	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE550 <sup>b</sup>	0,12	1,90	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE600 <sup>b c</sup>	0,15	1,90	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	0,50	0,005
LNE650 <sup>b c</sup>	0,16	2,00	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	0,50	0,005
LNE700 <sup>b d</sup>	0,18	2,10	0,55	0,030	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	0,50	0,005

<sup>a</sup> Para os graus LNE200, LNE230, LNE260, LNE280 e LNE315, o somatório dos teores de Nb, Ti e V deve ser no máximo de 0,20.

<sup>b</sup> Para os graus LNE355, LNE380, LNE400, LNE420, LNE460, LNE500, LNE550, LNE600, LNE650 e LNE700, o somatório dos teores de Nb, Ti e V deve ser no mínimo de 0,010 e no máximo de 0,22.

<sup>c</sup> Para os graus LNE600 e o LNE650, o teor de Cr deve ser máximo 0,50 %.

<sup>d</sup> Para o grau LNE700, o teor de Cr deve ser no máximo 0,60 %.

Tabela 1: Composição química para diferentes grades de material microligado conforme norma NBR 6656:2016. Material objeto de estudo foi classificado com grau LNE355 com propriedades mecânicas diferenciadas.



As propriedades mecânicas especificadas em norma para as diferentes grades de material microligado são dadas pela tabela abaixo com destaque a grade de aço objeto deste estudo, salientando que as faixas de especificação de limites de resistência/escoamento e alongamento são ligeiramente diferentes da norma por se tratar de uma adequação a especificação, uma vez que o aço originalmente especificado é o aço Carbono-Manganês com propriedades mecânicas já mencionadas no item 2.

Grau	Limite de escoamento	Limite de resistência	Alongamento ( $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$ ) mínimo	Calço de dobramento a 180° em função da espessura nominal "e"
	MPa	MPa	%	mm
LNE200	200 a 330	280 a 410	35	Zero
LNE230	230 a 360	330 a 460	30	
LNE260	260 a 390	370 a 500	30	
LNE280	280 a 420	380 a 520	28	
LNE315	315 a 455	390 a 530	25	
LNE355	355 a 510	430 a 570	24	
LNE380	380 a 530	460 a 600	23	
LNE400	400 a 530	520 a 650	23	
LNE420	420 a 540	520 a 650	22	e ≤ 10,00 – Zero e > 10,00 – 0,5 e
LNE460	460 a 580	540 a 680	18	e ≤ 10,00 – 0,5 e e > 10,00 – 1,0 e
LNE500	500 a 620	560 a 700	18	
LNE550	550 a 670	600 a 760	15	1,5 e
LNE600	600 a 720	650 a 800	14	2,0 e
LNE650	650 a 790	690 a 850	12	
LNE700	700 a 850	750 a 950	12	2,0 e

Tabela 2: Propriedades mecânicas no sentido transversal ao sentido de laminação para diferentes grades de material microligado conforme norma NBR 6656:2016. Material objeto de estudo foi classificado com o grau LNE355 com propriedades mecânicas diferenciadas.

## MATERIAIS

Para o estudo realizado foram utilizados dois materiais distintos, um deles um aço Carbono Manganês (liga 1) e outro um aço Microligado com processo para estampabilidade melhorada (liga 2). Composição química, propriedades mecânicas, níveis de inclusões e microestrutura de ambas as ligas são informadas abaixo:

Liga	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	V (%)	Ti (%)	Nb (%)
1 (C-Mn)	0,155	0,76	0,0216	0,0193	0,0116	0,0321	0,0006	0,0001	0,0030
2 (Microligado)	0,060	0,55	0,0130	0,0200	0,0069	0,0400	0,0010	0,0010	0,0249

Tabela 3: Composição química das ligas 1 – Aço Carbono-Manganês e 2 – Aço microligado (LNE355 com propriedades diferenciadas).

Liga	LR (MPa)	LE (MPa)	AI L05 (%)	Expoente de encruamento “n”
1 (C-Mn)	508	398	32	0,12
2 (Microligado)	472	404	35	0,16
Especificado	450 a 570	350 a 450	25 mín.	---

Tabela 4: Propriedades mecânicas das ligas 1 – Aço Carbono-Manganês e 2 – Aço microligado (LNE355 com propriedades diferenciadas).



Figura 2: Foto da microestrutura da liga 1 (C-Mn) com aumento de 100x sem ataque representando nível de inclusões C1F conforme classificação da norma ASTM(3).



Figura 3: Foto da microestrutura da liga 2 (Microligado) com aumento de 100x sem ataque representando nível de inclusões D1F conforme classificação da ASTM(3).



Figura 4: Foto da microestrutura da liga 1 (C-Mn) com aumento de 500x e ataque nital 3% (estrutura composta por ferrita + perlita fina). Tamanho de grão 9 conforme norma ASTM<sup>(4)</sup>





Figura 5: Foto da microestrutura da liga 2 (Microligado) com aumento de 500x e ataque nital 3% (estrutura composta por ferrita + carbonetos esferoidizados). Tamanho de grão 5 conforme norma ASTM(4)

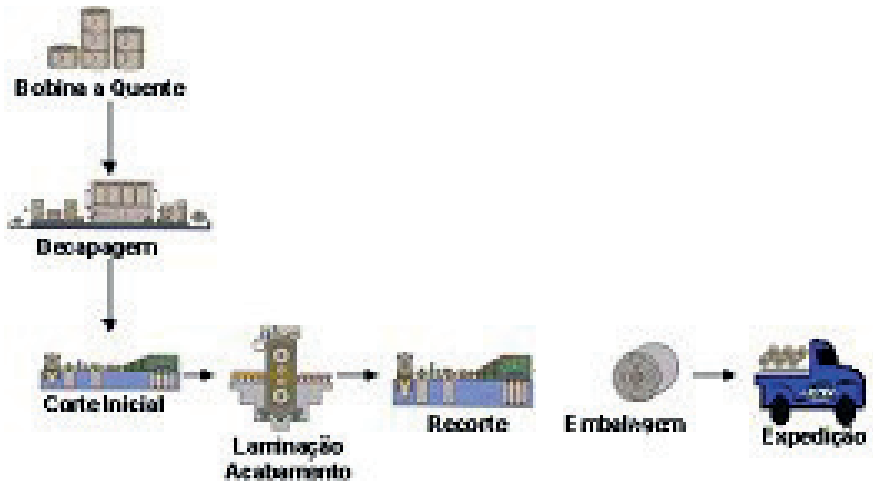
## PROCESSO SIDERÚRGICO

A elevação das propriedades mecânicas da liga 1 (C-Mn) se dá principalmente pela adição dos elementos químicos Carbono e Manganês sendo o Carbono agente formador da cementita (fase dura presente na perlita) além do endurecimento provocado por solução sólida juntamente com o Manganês e refino de grão.

O processo siderúrgico aplicado a liga 2 (Microligado) visou o aumento das propriedades mecânicas tanto por solução sólida através principalmente da adição dos elementos químicos Nióbio, Carbono e Manganês quanto por precipitação de carbonetos através do controle via processo termomecânico de forma a minimizar e distribuir uniformemente os precipitados que atuam como barreiras para a movimentação dos contornos de grão e discordâncias maximizando a estampabilidade da liga.

## PROCESSO DE RELAMINAÇÃO

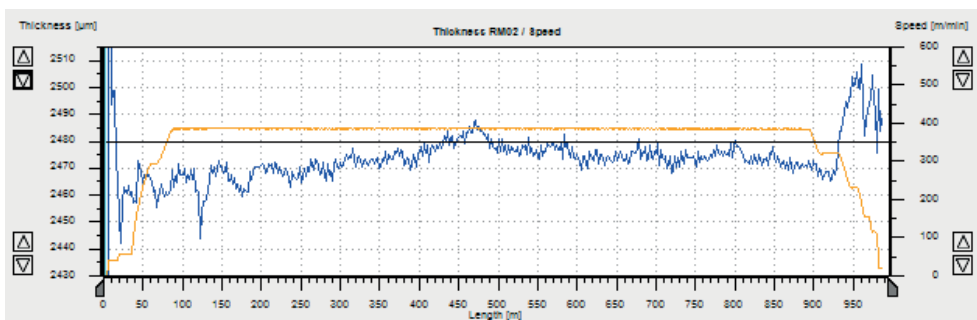
O material em estudo referente a liga 2 (Microligado) foi adquirido pelo grupo Waelzholz Brasmetal no estado laminado à quente com uma espessura de 2,60 +/-0,2mm e laminado visando atender uma faixa de espessura de 2,5 +/- 0,12mm.



**Figura 6:** Fluxo de processo de laminação a frio utilizado para o material em estudo.

O processo de laminação a frio aplicado visou a redução na variação de espessura na bobina sem elevar significativamente as propriedades mecânicas do material laminado. Este processo foi aplicado com o intuito de minimizar a variação de rebarbas no furo que será conformado posteriormente, uma vez que o nível de rebarbas está diretamente relacionado com a espessura, propriedades mecânicas, microestrutura e folga entre matriz/punção na etapa de corte.

A figura abaixo mostra a variação de espessura do material ao longo rolo laminado a frio, excluindo-se os trechos de ponta de rolo sujeitos a maior variação de espessura, é possível observar uma variação total entre 2,45 e 2,49mm.



**Figura 7:** Gráfico de espessura coletado após processo de laminação a frio.

## PROCESSO DE ESTAMPAGEM

O processo de estampagem empregado consiste na formação da peça através de uma prensa progressiva com usinagem da rosca integrada a ferramenta de estampagem.

Visando proteger o know-how da empresa que transforma o aço em peça não serão abertas informações no que tange o processo de conformação, desenho da peça tão pouco número de estágios de conformação.

## MÉTODO

### Composição química

A composição química foi realizada em Espectrofotômetro de Emissão Óptica conforme mostra a figura abaixo:



Figura 8: Espectrômetro de Emissão Óptica Spectrolab.

### Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram obtidas conforme norma NBR 6673:1981<sup>(6)</sup>. Foi retirado um corpo de prova de tração perpendicular ao sentido de laminação para cada amostra analisada.

Os ensaios foram realizados em máquina de tração Zwick modelo Z250 equipada com garras hidráulicas e extensômetro.



Figura 9: Máquina de Tração Zwick Z250.

## Microscopia Óptica (MO)

Análise de microestrutura foi realizada em uma amostra de cada liga. As amostras foram devidamente polidas e atacadas com reagente nital 3% para visualização da microestrutura, conforme ilustra a figura abaixo.

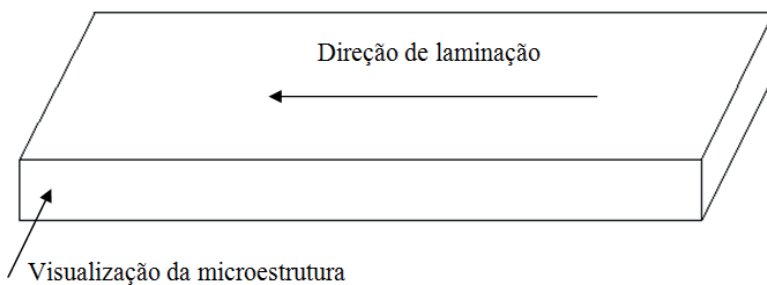


Figura 10: Ilustração da amostragem para avaliação da microestrutura.

A verificação da microestrutura foi feita com uso de microscópio do fabricante Leica conforme figura abaixo:



Figura 11: Microscópio Leica modelo DM2700M

## RESULTADOS DOS TESTES DE CONFORMAÇÃO

A figura abaixo mostra um comparativo entre os testes de conformação das ligas 1 (C-Mn) e 2 (Microligado) para as mesmas configurações de prensa e ferramenta de estampagem.



Figura 12: Condição do repuxo da liga 1 (C-Mn) foto à esquerda e liga 2 (Microligado) foto à direita.

## DISCUSSÃO

### Propriedades mecânicas

Comparando os resultados das propriedades mecânicas nas ligas 1 (C-Mn) e 2 (Microligado) foi possível notar uma melhor condição para conformação na liga 2, apesar de valores de limite de escoamento ligeiramente maiores se comparado com a liga 1, 404 MPa e 398 MPa respectivamente. A melhor conformabilidade da liga 2 se explica principalmente com base nos valores de alongamento e expoente de encruamento da liga 2 (35% e 0,16 respectivamente), sensivelmente melhores em relação a liga 1 (32% e 0,12 respectivamente).



Tais resultados explicam a melhor conformabilidade da liga 2 (Microligado) comparativamente a liga 1 (C-Mn).

## Microestrutura

Possível observar que a liga 2 (Microligado) apresenta nível de inclusões D1F (inclusão de óxido globular nível 1 série fina conforme quadro comparativo da norma ASTM<sup>(3)</sup>) e microestrutura composta por ferrita + carbonetos esferoidizados uniformemente distribuídos na matriz ferrítica com tamanho de grão 5 conforme norma ASTM<sup>(4)</sup>.

Já a liga 1 apresenta nível de inclusões C1F (inclusão de silicato alongada nível 1 série fina conforme quadro comparativo da norma ASTM<sup>(3)</sup>) e microestrutura composta por ferrita + perlita fina uniformemente distribuída com tamanho de grão 9 conforme norma ASTM<sup>(4)</sup>.

Realizando um comparativo tanto do nível de inclusões quanto da microestrutura das ligas, é possível confirmar a melhor conformabilidade da liga 2 (Microligado), uma vez que as inclusões globulizadas e estrutura com precipitados esferoidizados distribuídos uniformemente na matriz geram uma menor área de interface entre precipitados de elevada dureza (carbonetos e inclusões) e a matriz ferrítica de maior ductilidade, auxiliando a conformação e evitando a nucleação e conseqüente propagação de trincas. Ao passo que, na liga 1 (C-Mn), a presença de perlita e inclusões alongadas geram uma maior área de interface entre os precipitados duros e frágeis (placas de cementita presentes na perlita e inclusões alongadas) e a matriz ferrítica nucleando e propagando prematuramente as trincas durante processo de expansão de furo.

## Processo de estampagem

Para a estampagem das ligas 1 (C-Mn) e 2 (Microligado) foi usada a mesma ferramenta com os mesmos ajustes de folgas entre matriz/punção, velocidade de conformação, sistema de lubrificação, pressão do martelo e prensa chapas sendo as diferenças encontradas nos testes de conformação das ligas 1 (C-Mn) e 2 (Microligado) exclusivamente relacionadas as características de estampabilidade de cada liga conformada.

## CONCLUSÕES

Através dos testes conduzidos foi possível concluir que a liga 2 (Microligado) apresentou maior estampabilidade se comparada a liga 1 (C-Mn). Isso ocorre principalmente devido a um maior valor do expoente de encruamento “n” da liga 2 se comparada com a liga 1 (0,16 e 0,12 respectivamente), além de uma microestrutura mais favorável para conformação presente na liga 2 (inclusões globulares com carbonetos esferoidizados e tamanho de grão 5), em comparação com a liga 1 (inclusões alongadas com presença de perlita e tamanho de grão 9).

O processo de laminação a frio aplicado diminuiu a variação de espessura do material laminado a quente contribuindo para um melhor controle do nível de rebarbas nos furos expandidos ao longo da estampagem das peças, fator de extrema relevância para o sucesso do projeto, uma vez que o nível de rebarbas nos furos que posteriormente serão conformados tem influência significativa no avanço das trincas durante processo de expansão do furo.

A melhora na conformação das peças com o uso da liga 2 é nítida quando comparadas as fotos das peças estampadas com o material C-Mn e Microligado presentes na figura 12. Salientando que foram usados os mesmos parâmetros de conformação conforme descrito no item 9.3.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem as empresas Arcelor Mittal e Waelzholz Brasmetal, por terem cedido os equipamentos e mão de obra que tornaram possíveis o desenvolvimento e conclusão do projeto realizado.

Agradecimento especial aos Srs. Thomas Frank e Maurício Bomfim por incentivarem o desenvolvimento e difusão do trabalho desenvolvido.

## **REFERENCES**

1. TAKAHASHI, M. Sheet Steel Technology for the Last 100 Years : Progress in Sheet Steels in Hand with the Automotive Industry. v. 55, n. 1, p. 79–88, 2015.
2. NBR 6656:2016 - Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade – Requisitos. p. 2-3.
3. ASTM E-45:2018 – Standard test methods for determining the inclusion content of steel, p. 7-8
4. ASTM E-112:2010 – Standard test methods for determining average grain size, p. 1-27
5. NBR 6673:1981 – Produtos planos de aço – determinação das propriedades mecânicas a tração, p. 1-22.