

DESENVOLVIMENTO DE AÇO DE ULTRA-ALTA RESISTÊNCIA DA CLASSE DE 1180 MPa PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA*

Marcus Vinícius Pereira Arruda¹

João Francisco Batista Pereira²

Paulo José Duarte Rodrigues³

Resumo

A moderna construção automotiva vem adotando uma série de estratégias para tornar os carros cada vez mais seguros e ecológicos. Dentre elas, o uso intensivo de aços de alta resistência tem proporcionado grandes avanços nos automóveis, principalmente aqueles ligados à segurança veicular. A escolha de um determinado aço é hoje definida, não só pela resistência mecânica, mas também pelos atributos do material ligados a sua aplicação. Assim, a composição química, as variáveis de processo, e, conseqüentemente, a microestrutura do aço, devem ser reflexo desses atributos. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um aço multifásico da classe de resistência de 1180 MPa na Usiminas, assim como suas características mecânicas que influenciam a sua aplicação. São apresentados aspectos das simulações efetuadas em escala piloto, a consolidação das informações obtidas e o trabalho de engenharia de produto realizado para o desenvolvimento industrial.

Palavras-chave: Segurança veicular; Aço multifásico; Propriedades Mecânicas.

DEVELOPMENT OF ULTRA-HIGH STRENGTH STEEL OF 1180 MPa CLASS FOR APPLICATION IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Abstract

The modern automotive construction has been adopting a number of strategies to make the cars increasingly safe and environmentally friendly. Among them, the intensive use of high-strength steel has provided great advantages in automobiles, especially those related to vehicle safety. The choice of a particular steel is today, defined not only by the mechanical strength of the material but also by the attributes linked to its application. Thus, the chemistry, process variables, and consequently, the microstructure of the steel, must be reflect these attributes. The present work presents the development of ultra-high strength steel of 1180 MPa class at Usiminas, as well as their mechanical characteristics that influence their application. It is presented aspects of simulations performed on a pilot scale, the consolidation of information obtained and the product engineering work carried out for industrial development.

Keywords: Safety Vehicle; Multiphase Steel; Mechanical Properties.

¹ Engenheiro de Materiais, Pesquisador Pleno, Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Especialista de Produto Pleno, Atendimento ao Cliente, Garantia da Qualidade e Produto, Usiminas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Produto Pleno, Controle Integrado do Produto, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a moderna construção automotiva vem adotando uma série de estratégias para tornar os carros cada vez mais seguros e ecologicamente corretos. Dentre elas, o uso intensivo de aços de alta resistência tem proporcionado grandes avanços nos automóveis, principalmente aqueles ligados à segurança veicular. A escolha de um determinado aço é hoje definida, não só pela resistência mecânica, mas também pelos atributos do material ligados à sua aplicação, Figura 1.

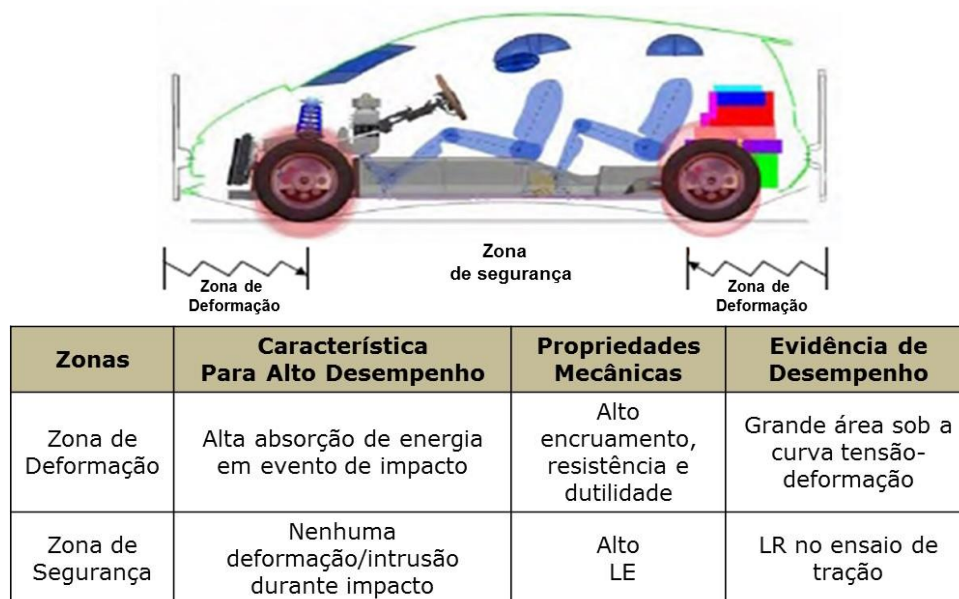


Figura 1. Zonas de deformação de um veículo e requisitos necessários aos materiais aplicados a elas. Figura adaptada de WAS – World Auto Steel – AHSS 5.0 Guidelines, 2015 [1].

Conforme pode ser observado na Figura 1, os atributos exigidos de um material podem ser completamente diferentes em função da sua utilização, ainda que a resistência mecânica exigida seja a mesma, Figura 2.

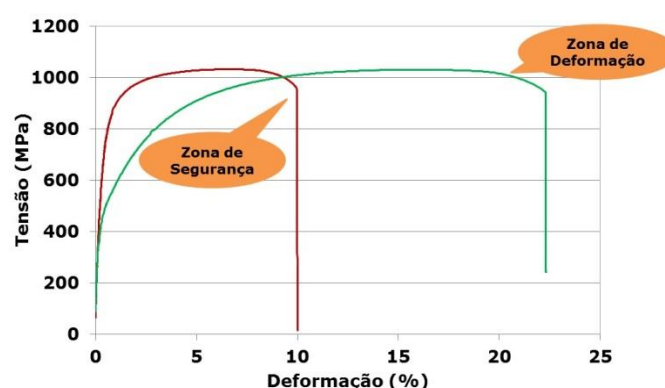


Figura 2. Curvas tensão deformação de aços da classe 1000 MPa de resistência mecânica com diferentes atributos relativos a aplicação.

Dessa forma, permanece como um dos grandes desafios para o setor siderúrgico desenvolver aços com resistência cada vez mais alta e, ao mesmo tempo, uma conformabilidade adequada aos processos de produção disponíveis nos fabricantes de autopeças. Diversos estudos de desenvolvimento de aços de ultra-alta

resistência estão sendo publicados com o intuito de demonstrar que o aumento dos níveis de resistência do aço deve ser acompanhado por um rigoroso controle da sua microestrutura [2]. Aços de ultra-alta resistência com valores de alongamento total elevados, tendem a ser favoráveis aos processos de deformação cujo estiramento é predominante. Entretanto, esta propriedade tende a deteriorar a conformabilidade de aços em operação onde prevalece a ductilidade local, como por exemplo, em operações de dobramento, flangeamento de bordas e expansão de furos (λ). Deste modo, faz-se necessário o controle da microestrutura a fim de melhorar estas duas propriedades de maneira simultânea, conforme mostrado esquematicamente na Figura 3. Quando se busca um elevado alongamento total, uma microestrutura composta por uma matriz ferrítica macia com ilhas duras de martensita é eficaz. Já quando são solicitadas as propriedades de dobramento e expansão de furo, deve-se buscar uma microestrutura mais homogênea e com baixa diferença de dureza entre os constituintes, de forma a prevenir a ocorrência prematura de vazios e microfissuras nas interfaces das fases macias e duras [3], tal como mostrados na Figura 4.

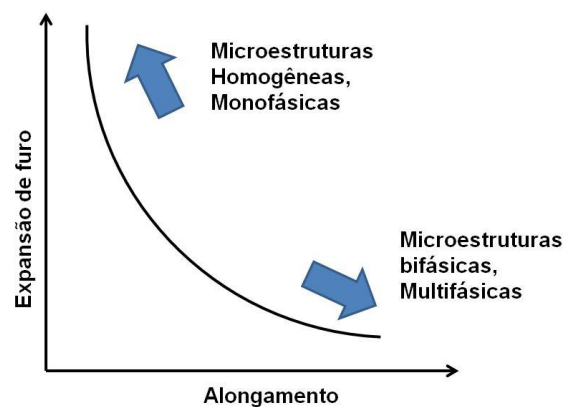
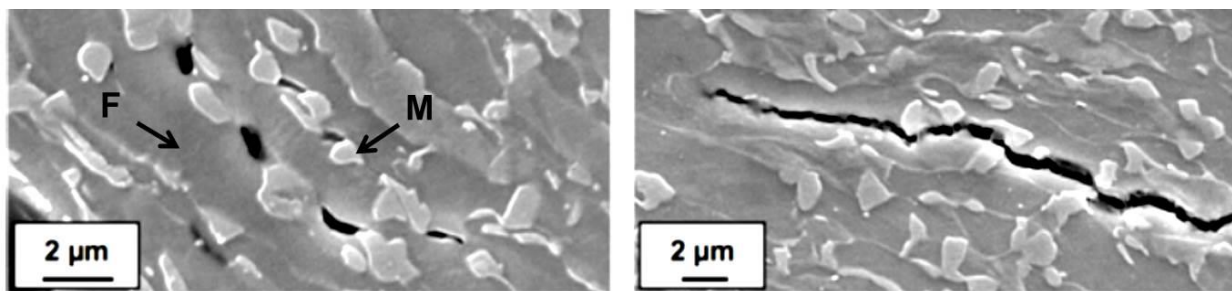


Figura 3. Desenho esquemático da relação entre o alongamento e a expansão de furos para aços de ultra-alta resistência [2].



Nucleação de microcavidades

Propagação de trincas

Figura 4. Mecanismos típicos de início e propagação de falhas em aço Dual Phase (F= ferrita, M= martensita) [3].

Considerando as demandas recentes da indústria automotiva, a Usiminas vem procurando desenvolver produtos que vão ao encontro dessas tendências. Um exemplo foi o desenvolvimento do aço laminado a frio com limite de resistência mínimo de 1180 MPa (DP1200). Foi elaborado um plano de desenvolvimento do novo aço com etapas envolvendo a análise mercadológica, viabilidade técnica, desenvolvimento piloto, industrial e homologação.

Neste trabalho são apresentados resultados obtidos no desenvolvimento do produto, suas principais características, bem como os resultados da sua homologação em montadoras de veículos estabelecidas no Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Experiências em Escala Piloto

2.1.1 Materiais

No desenvolvimento, nove diferentes composições químicas as quais podem ser vistas na Tabela 1, e condições distintas de processamento foram avaliadas com o intuito de se atingir as propriedades mecânicas especificadas para o aço DP1200. Seis delas (1 a 6) foram avaliadas a partir de amostras de produtos da Usiminas já padronizados, de classes de resistência similares à do DP1200. As outras três (7 a 9) foram produzidas em escala piloto utilizando forno de fusão a vácuo.

Tabela 1. Composições químicas dos aços avaliados no presente estudo (% em peso).

Aço	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Mo	Nb
1							<0,25	<0,15	-
2	<0,15	<2,30	<0,5				<0,35	<0,30	-
3							-	-	-
4						0,015	-	-	-
5	<0,20	<1,5	<2,0	<0,025	<0,0020	a	-	-	<0,030
6			<0,3			0,050	<0,25	-	<0,035
7							-	-	-
8	<0,25	<2,30	<0,5				<0,35	<0,35	-
9							-	-	<0,035

As ligas produzidas em escala piloto foram elaboradas a partir de uma composição química à base de C, Mn e Si (aço 7). Os teores desses elementos foram estimados com base em simulação computacional (*Thermo-Calc®*) e na composição química dos demais aços que, considerados o seu histórico de propriedades mecânicas, apresentaram potencial para a produção do DP1200. Os teores desses elementos foram mantidos para as outras ligas, sendo adicionados o cromo e molibdênio em uma delas (aço 8) e nióbio em outra (aço 9). As adições de Cr e Mo objetivaram conferir maior temperabilidade. Já com a adição de Nb buscou-se um acréscimo de resistência mecânica por refinamento de grão.

2.1.2 Simulação dos ciclos de recozimento

Utilizando uma máquina *Gleeble* 3500, foram realizadas simulações dos ciclos de recozimento em condições semelhantes àquelas adotadas numa linha contínua (CAPL), variando-se as temperaturas de encharque. Um esquema básico das etapas que compõem o ciclo de recozimento contínuo simulado está mostrado na Figura 5.

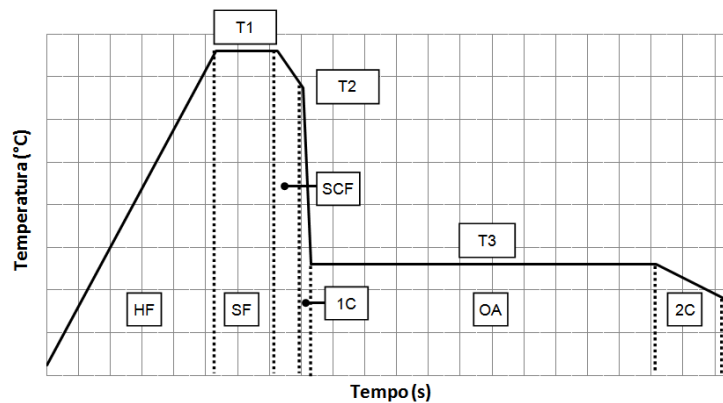


Figura 5. Desenho esquemático dos ciclos de recozimento utilizados nas simulações na Gleeble. HF: forno de aquecimento, SF: forno de encharque, SCF: forno de resfriamento lento, 1C: forno de resfriamento primário, OA: forno de superenvelhecimento (*overaging*), 2C: forno de resfriamento secundário e WQ: têmpera em água.

Foram empregados nas simulações quatro diferentes ciclos variando-se, basicamente, a temperatura de encharque (T1). As temperaturas adotadas foram de 780°C, 800°C, 820°C e 840°C, sendo os ciclos identificados como C1, C2, C3 e C4, respectivamente. As temperaturas de início de resfriamento rápido (T2) e *overaging* (T3) foram fixadas em valores tipicamente adotados para o processamento de aços da classe *Dual Phase*. Os tempos de permanência em cada etapa do ciclo foram calculados com base em uma velocidade da linha da ordem de 70 m/min.

As amostras utilizadas nessa etapa foram retiradas das chapas como laminadas a frio em direção transversal à de laminação.

2.1.3 Caracterização microestrutural

Após as simulações de recozimento, a microestrutura das amostras foi caracterizada por microscopias óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Para essas análises, foram preparadas seções tomadas em direção paralela à de laminação. O ataque com Nital 2% foi usado para a caracterização dos constituintes presentes e também para a determinação da fração de ferrita na microestrutura. A determinação das frações volumétricas foi feita usando o software *Axiovision®*, em imagens adquiridas através do microscópio óptico.

2.1.4 Propriedades mecânicas

Foram realizados ensaios de tração de acordo com a norma ASTM A370 [4], em corpos de prova do tipo *sub-size*, com base de medida de 25 mm, retirados das amostras recozidas na *Gleeble*, em direção transversal à de laminação. Os valores médios dos limites de escoamento (LE) e de resistência (LR) e do alongamento total (AI) foram calculados a partir dos resultados de três corpos de prova. Os ensaios de tração foram realizados em máquina universal eletromecânica, modelo Instron 5882, com capacidade de 10 t.

2.2 Experiências em Escala Industrial e Homologação

A partir dos resultados obtidos em escala piloto foi produzida uma corrida em escala industrial conforme o seguinte fluxo: Convertedor LD, RH, Forno Panela, Lingotamento Contínuo, Forno de Reaquecimento de Placas tipo Walking Beam, Laminadores desbatadores, Trem acabador, TCM (*Tandem Cold Mill*), CAPL (*Continuous Annealing and Processing Line*), inspeção e amostragem.

As espessuras visadas no produto laminado a frio foram 1,2 mm, 1,4 mm, 1,6 mm e 1,8 mm, sendo os produtos eletro galvanizados.

Foram realizados ensaios de caracterização mecânica e microestrutural, contemplando testes de tração, dobramento, expansão cônica de furo, tamanho de grão, inclusões não metálicas, textura superficial e soldabilidade. A Tabela 2 mostra os tipos de ensaios realizados e as respectivas normas adotadas nessas avaliações. Os testes para homologação do produto foram conduzidos seguindo os requisitos estabelecidos em normas de montadoras situadas no Brasil.

Tabela 2. Relação de ensaios e normas realizados na avaliação do DP1200 produzido industrialmente.

Ensaio	Norma
Tração	ASTM A370 [4]
Dobramento	ISO 7438 [5]
Expansão cônica de furo	ISO TS 16630 [6]
Tamanho de Grão	ASTM E112 [7]
Inclusões não metálicas	ASTM E45 [8]
Soldabilidade	SEP 1220-2 [9]

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Simulações em Escala Piloto

A Figura 6 mostra os resultados de propriedades mecânicas obtidos em escala piloto. São mostrados os valores médios do limite de resistência (LR) em função do limite de escoamento (LE), e do alongamento em tração (Figuras 5a e 5b, respectivamente). A área hachurada nos gráficos representa a janela de propriedades mecânicas especificadas para o aço DP1200. Os resultados das condições simuladas que estão compreendidos dentro dessa janela foram considerados compatíveis com as faixas de propriedades mecânicas especificadas para o aço DP1200. Dessa forma, os aços 3, 6, 7, 8 e 9 foram classificados como potenciais para a produção do aço DP1200 pela Usiminas. Os resultados de LE obtidos, estão contidos em toda a extensão da faixa especificada para essa propriedade. Esses resultados, associados à microestrutura do material, sugerem que diferentes produtos podem ser desenvolvidos considerando-se o tipo de deformação principal exigido na aplicação.

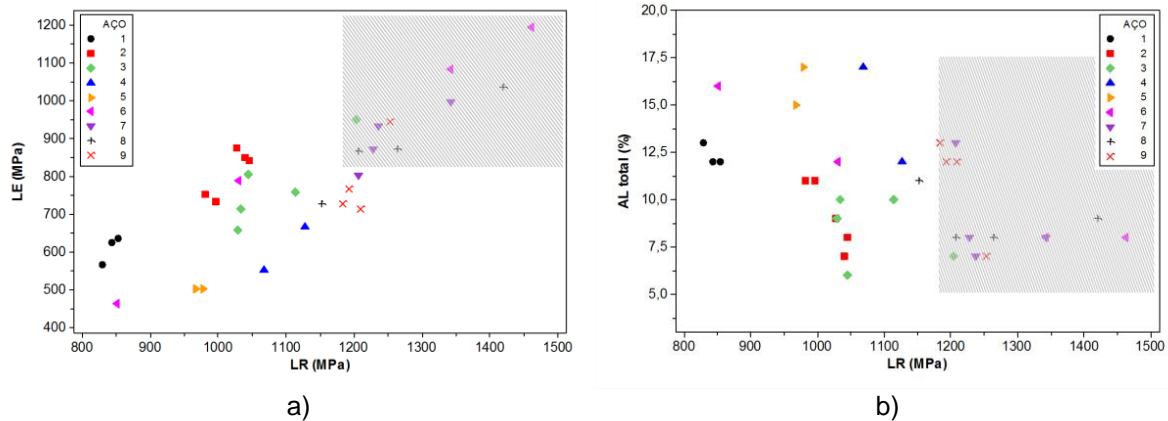


Figura 6. Valores médios de LE em função de LR (a), e do alongamento em função de LR (b), das ligas avaliadas. A área hachurada no interior dos gráficos representa a janela de propriedade mecânica especificada para o aço DP1200.

As Figuras 7 e 8 mostram, respectivamente, os resultados do limite de escoamento e do alongamento total em função do limite de resistência em tração, separados para cada ciclo de recozimento contínuo simulado. A partir desses resultados pode ser verificado que as propriedades mecânicas especificadas para o aço DP1200 foram obtidas para um maior número de ligas quando adotados os ciclos de recozimento com maior temperatura de encharque.

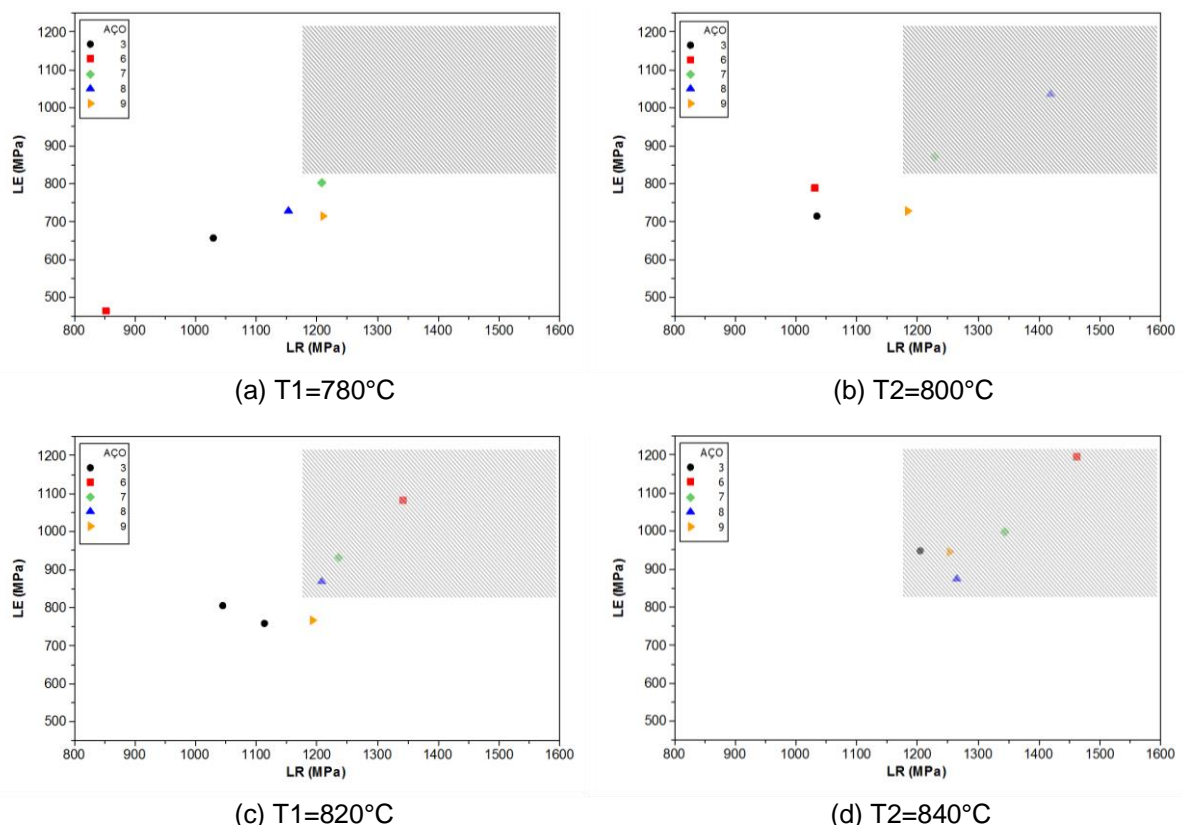


Figura 7. Valores médios de LE em função de LR para os diferentes ciclos de recozimento simulados. A área hachurada no interior dos gráficos representa a janela de propriedade mecânica especificada para o aço DP1200.

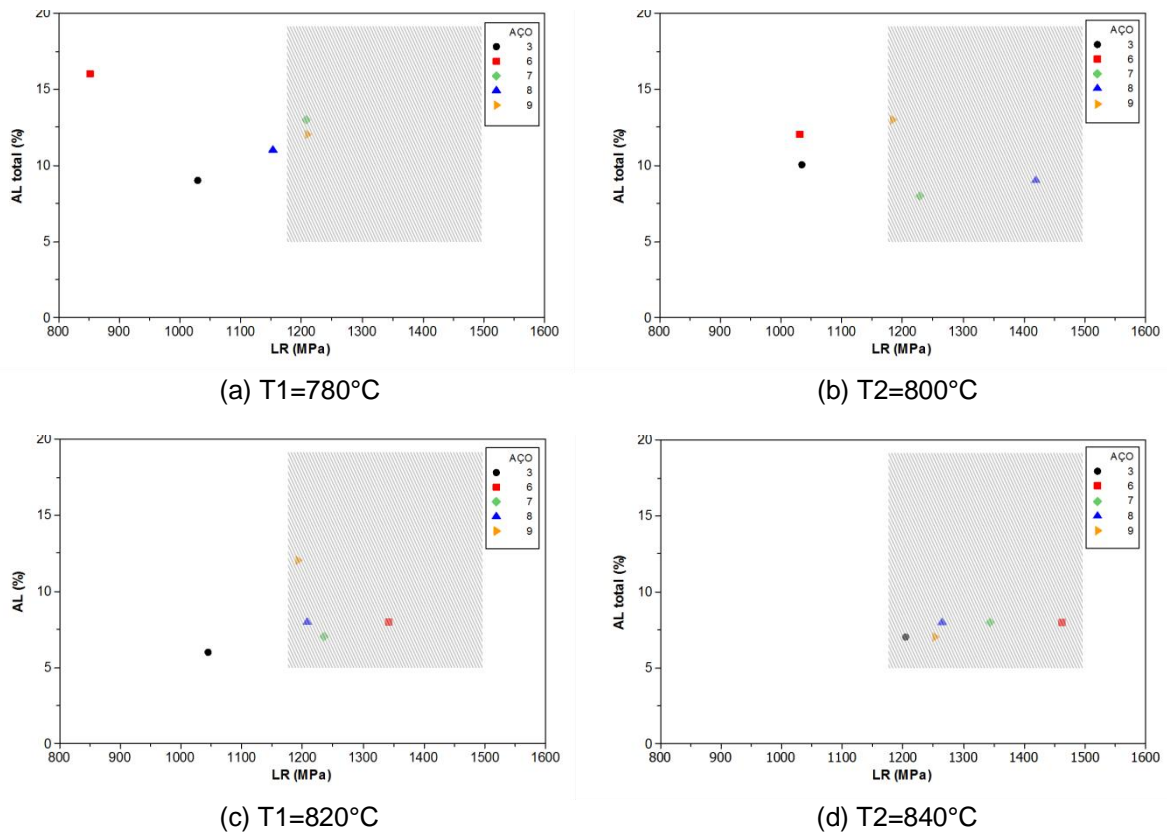


Figura 8. Valores médios do alongamento total (AL%) em função do LR para os diferentes ciclos de recozimento simulados. A área hachurada no interior dos gráficos representa a janela de propriedade mecânica especificada para o aço DP1200.

A Tabela 3 mostra os resultados da quantificação de fases realizada para cada condição de recozimento simulada.

Tabela 3. Quantificação de fases após as simulações com diferentes temperaturas de encharque para os aços com potencial de produção do DP1200 (F= ferrita, B= bainita e M= martensita).

Aço	Temperatura (°C)	Ferrita	2ª fase (B+M)
3	780	17	83
	800	9	91
	820	0	100
	840	0	100
6	780	31	79
	800	9	91
	820	0	100
	840	0	100
7	780	13	87
	800	4	96
	820	2	98
	840	0	100
8	780	13	87
	800	0	100
	820	3	97
	840	2	98
9	780	16	84
	800	9	91
	820	6	94
	840	2	98

Nessa avaliação, não foi possível identificar separadamente as frações de bainita e martensita por microscopia óptica. Deste modo, a fração de segunda fase foi definida como sendo o somatório das frações desses dois constituintes.

De forma qualitativa, a avaliação dessas microestruturas por microscopia eletrônica de varredura indicou que a fração de segunda fase, especialmente de bainita, aumentou com a elevação da temperatura de encharque. Para as temperaturas de encharque mais elevadas, de 820°C e 840°C, os aços apresentaram microestrutura constituída predominantemente por bainita, com presença de algumas ilhas de martensita e quase nenhuma ferrita, vistas somente quando avaliadas em maior ampliação via microscopia eletrônica.

A presença de uma microestrutura predominantemente bainítica confere atributos especiais ao produto desenvolvido. Segundo informações descritas na literatura [10], a capacidade de expansão de furo ou dobramento dos aços Dual Phase é fortemente influenciada pela homogeneidade da microestrutura e pela diferença de dureza entre a matriz ferrítica e o segundo constituinte. Com relação à morfologia, a homogeneização e o refinamento da microestrutura melhoram o desempenho desses aços. Já a redução do gradiente de dureza entre a ferrita e a segunda fase provoca a diminuição das tensões residuais durante a deformação, o que retarda a ocorrência da fratura. No caso dos aços que obtiveram resultados satisfatórios no presente estudo a redução do gradiente de dureza foi obtida pelo aumento da bainita em detrimento da martensita no segundo constituinte. Em uma microestrutura com estas características, os ganhos em capacidade de flangeamento de borda são obtidos com perdas inerentes no alongamento em tração, limitando assim, a capacidade de estiramento.

O aspecto típico da microestrutura do aço 7, que apresentou o melhor conjunto de propriedades na etapa piloto, está mostrado na Figura 9.

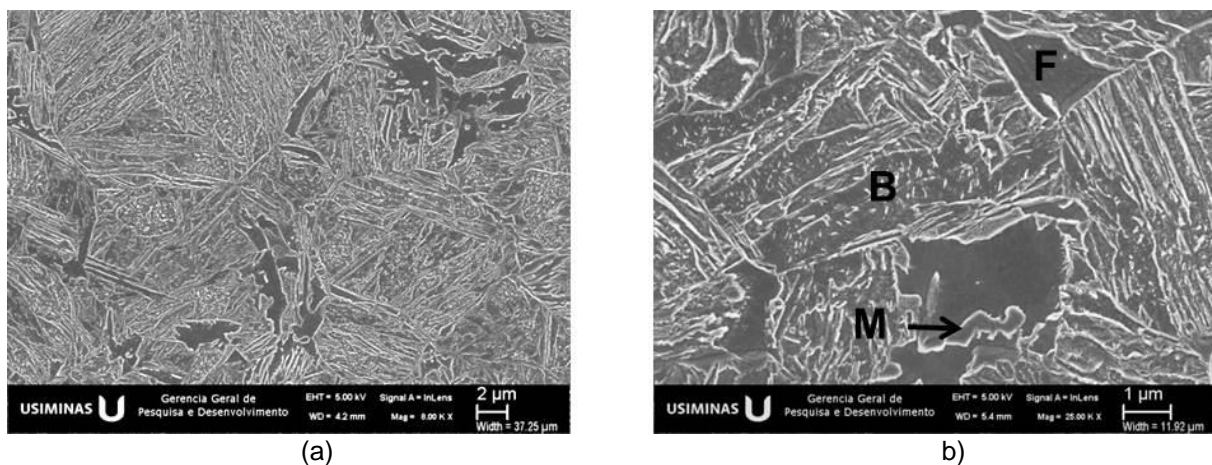


Figura 9. Aspecto típico da microestrutura do material que apresentou o melhor conjunto de propriedades em escala piloto, obtido por microscopia eletrônica de varredura em ampliações originais de 8.000X (a) e 25.000X (b). Ataque com reagente nital 2%. F: ferrita; B: bainita; M: martensita.

3.2 Produção em Escala Industrial

A produção em escala industrial adotou a composição química e as variáveis de processo que melhor desempenho apresentaram durante a etapa piloto.

Na tabela 4 são apresentadas as faixas de valores das propriedades mecânicas obtidas para os materiais das diversas espessuras produzidos em escala industrial. Já na Figura 10 é mostrada a curva tensão deformação do novo aço DP1200

(espessura 1,8 mm) em comparação com dois aços da classe de 1000 MPa mostrados anteriormente na Figura 2. A curva evidencia um produto de ultra alta resistência com capacidade de conferir elevada rigidez estrutural na aplicação.

Tabela 4. Propriedades mecânicas em tração do aço DP1200. Resultados da escala piloto para a espessura de 1,2mm e industrial para a média de todas as espessuras processadas.

Aço	LE (MPa)	LR (MPa)	AI (%)	λ (%)	Dobramento 90°
Visado	820~110	>1180	>3	-	3,5T
Escala Piloto	962	1247	7*	-	-
Escala Industrial	900~1000	1230~1250	>10**	>25	3,0T

Utilizada bases de medida de *25 mm e **80 mm.

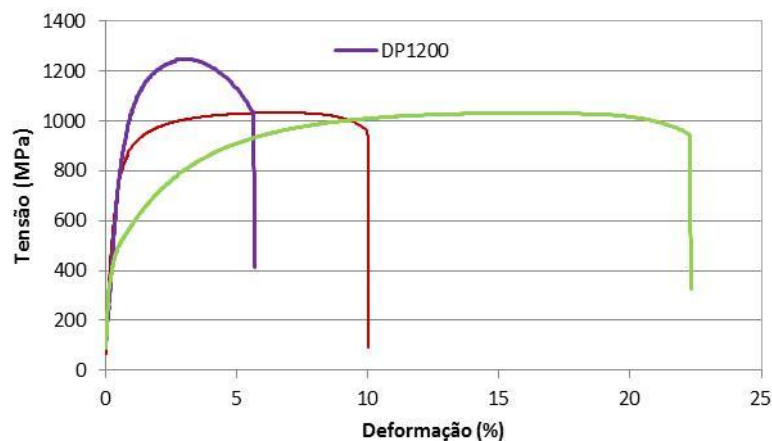


Figura 10. Curva tensão deformação do aço DP1200 comparada as de dois diferentes aços de 1000 MPa de resistência mecânica.

O aspecto da microestrutura obtida para o aço DP1200 produzido em escala industrial para a espessura de 1,8 mm está mostrado na Figura 11. Tal microestrutura é constituída por fração elevada de bainita inferior com pequenas quantidades de martensita (MA) e ferrita. Essa última com fração da ordem de 6%.

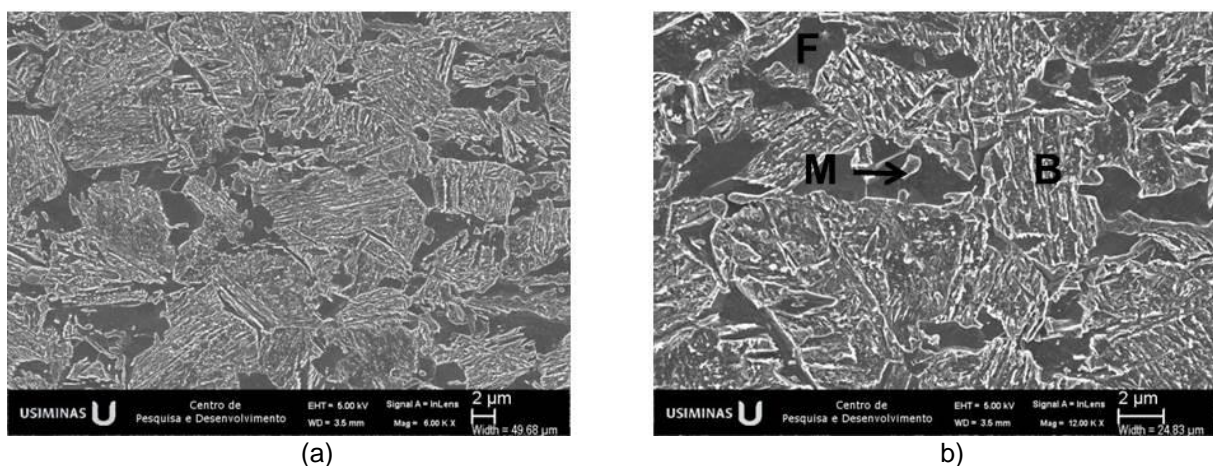


Figura 11. Aspecto típico da microestrutura do material produzido escala industrial para a espessura de 1,8 mm, obtido por microscopia eletrônica de varredura em ampliações originais de 6.000X (a) e 12.000X (b). Ataque com reagente nital 2%. F: ferrita; B: bainita; M: martensita.

Os resultados dos ensaios de homologação foram aprovados segundo as normas estabelecidas pelas montadoras nacionais. Após o desenvolvimento industrial, amostras do produto foram enviadas para diferentes montadoras brasileiras e, até o momento, duas delas já homologaram o produto para a aplicação em lâminas de reforço do para-choques.

4 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de novos aços de alta e ultra alta resistência para o setor automobilístico é hoje orientado não só pela resistência mecânica, mas também pelos atributos do material ligados à sua aplicação. O novo produto da Usiminas, o aço DP1200, foi desenvolvido para aplicações onde é exigida alta rigidez estrutural, isto é, onde, em um evento de impacto, a estrutura não deve se deformar, de forma a preservar a integridade dos passageiros. O aço desenvolvido atendeu aos requisitos de propriedades mecânicas especificados em norma de diferentes montadoras. O sucesso desse desenvolvimento foi resultado de um método correto de trabalho e da perfeita integração das diferentes equipes envolvidas no projeto.

REFERÊNCIAS

1. "WAS – World Auto Steel – AHSS 5.0 Guidelines, 2015"
2. FUJITA, N.; et. al.; Present Situation and Future Trend of Ultra-High Strength Steel Sheets for Auto-Body, Nippon Steel Technical Report, Nº103, Maio 2013.
3. MOHRBACHER, H.; Advanced Metallurgical Concepts for DP Steels With Improved Formability and Damage Resistance, Symposium on New Developments in AHSS, 2013.
4. NORMA ASTM A370 – Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM - American Society For Testing and Materials, 47p, 2011.
5. NORMA ISO 7438 – Metallic materials - Bend test, BS - British Standard, 18p, 2016.
6. NORMA ISO TS 16630 – Metallic materials - Method of hole expanding test, ISO - International Organization for Standardization, 12p, 2003.
7. NORMA ASTM E112 – Standard Test for Determining Average Grain Size, ASTM - American Society For Testing and Materials, 19p, 2005.
8. NORMA ASTM E45 – Standard Test for Determining the Inclusion Content of Steel, ASTM - American Society For Testing and Materials, 26p, 2004.
9. NORMA SEP 1220-2. Testing And Documentation Guideline For The Joinability Of Thin Sheet Of Steel - Part 2: Resistance Spot Welding, 2011.
10. LEE, S. B.; CHO, Y. R.; CHIN, K. G.; Analysis of Stretch-Flangeability Using a Ductile Fracture Model, Posco Technical Report. Vol. 10, Nº 1, 2007.