

DESENVOLVIMENTO DE AÇOS PARA ESTAMPAGEM A QUENTE (USIBOR®1500) NA ARCELORMITTAL VEGA*

Ana Paula Domingos Cardoso¹
Fabiano José Fabri Miranda²
Tiago da Silva Fernandes³
Fabrício Cerqueira⁴
Fernanda Jaqueline Reitz⁵

Resumo

Este trabalho descreve o desenvolvimento, as características técnicas para a produção do produto Usibor® 1500 pela ArcelorMittal. A viabilidade de produção destes materiais é decorrente do processo de otimização de operação e infraestrutura da sua linha de galvanização (*Continuous Galvanizing Line*). O trabalho engloba também características técnicas gerais do produto, microestruturais e mecânicas, assegurando conformidade com normas internacionais de qualidade do mesmo. Afim de conhecer a microestrutura e propriedades mecânicas do material Usibor®1500, antes e após conformação a quente será apresentados resultados de aplicação do material estampado industrialmente no setor automobilístico.

Palavras-chave: Desenvolvimento; Usibor®1500; Conformação a quente.

DEVELOPMENT OF HOT FORMING STEEL GALVANIZED STEELS (USIBOR®1500) AT ARCELORMITTAL VEGA

Abstract

This paper describes the development, the technical characteristics to the Usibor®1500 produced by ArcelorMittal. This material production feasibility due to the galvanizing line production process optimization (*Continuous Galvanizing Line*). In addition comprises the main products technical characteristics, besides the microstructure and mechanical characteristics, ensuring the compliance with the international quality standards. Besides the microstructure knowledge and mechanical properties before and after the hot forming will be presented the material practical results application industrially stamped

Keywords: Development; Usibor®1500, Hot forming.

- ¹ *Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais, Especialista de Pesquisa e Desenvolvimento, Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento, Arcelormittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.*
- ² *Doutor em Engenharia Metalúrgica, Especialista de Pesquisa e Desenvolvimento, Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.*
- ³ *Engenheiro de Produção Mecânica, Especialista em Processos de Produção, Gerência de Produção de Galvanização, Arcelormittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil*
- ⁴ *Engenheiro de Metalurgia, Especialista de Pesquisa e Desenvolvimento, Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento, Arcelormittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.*
- ⁵ *Engenheira Química, Técnica de Laboratório, Gerência de Metalurgia, Arcelormittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Projeto de Expansão da ArcelorMittal Vega

A Linha de Galvanização 2 teve seu start-up em 2011, com capacidade de produção de 350 kton/ano de aço galvanizado e Galvalume com foco em mercado indústria e construção civil. O projeto original da linha ilustrado na figura 1, contempla em linhas gerais, forno de recozimento horizontal, dois potes de metal líquido, pote de pre-fusão, laminador de encruamento superficial e *tension leveller* além de roll-coater para aplicação de produtos de pós tratamento químico, cabine de inspeção vertical e horizontal e oleadeira eletrostática.

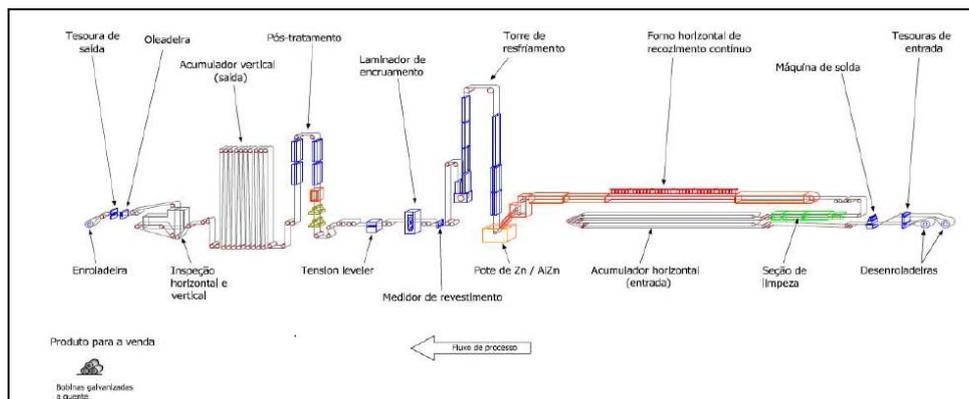


Figura 01. Desenho esquemático de projeto original da Linha de Galvanização 2 da ArcelorMittal Vega. (Observar o sentido do fluxo de processo, da direita para esquerda).⁷

Um projeto de expansão de alta tecnologia visou equipar a linha para fornecimento ao mercado automobilístico passando a produzir aços para estampagem a quente com revestimentos base 10% AlSi, fornecidos pela ArcelorMittal como Usibor[®] 1500, mantendo a capacidade produtiva de 350.000 ton /ano acoplando ao lay out descrito na figura 1 a inclusão de um novo pote de metal líquido. Com o objetivo de produzir 3 revestimentos simultaneamente, o novo projeto da linha englobou a característica “*Triple Purpose*”, através da instalação de um terceiro pote de metal líquido para a produção de revestimentos 10% AlSi, em adição aos já existentes para a produção de zinco puro e 55% AlZn1,6 % Si. Estes três sofrem rearranjo na movimentação para produção e armazenamento conforme figura 2 que mostra a distribuição dos potes de zinco antes e após a implementação do projeto Usibor enquanto a tabela 1 apresenta a capacidade em toneladas dos 3 potes da linha.

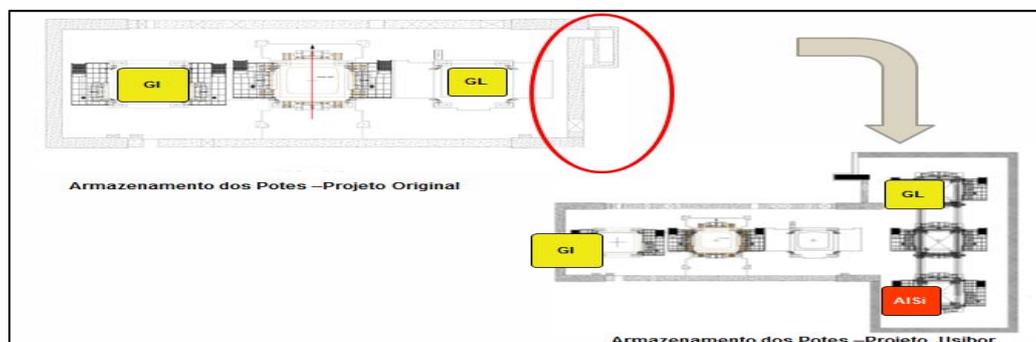


Figura 02. Desenho esquemático do modelo de rearranjo e movimentação dos potes de zinco na linha de galvanização 2 da ArcelorMittal Vega.

Tabela 1 – Capacidade dos Potes da Galvanização de Produção do Usibor

Potes Gal#2	Capacidade (tons)
Pote Zinco Puro	364
Pote Galvallume	245
Pote AISi	272

Na Tabela 2 são mostradas as principais características de especificação de produção da Linha de Galvanização de produção do Usibor® 1500, onde destaca-se a capacidade de galvanizar de materiais com amplo range de espessura (0,25-2,0 mm).

Tabela 2 - Características técnicas da Linha de Galvanização 2 da Arcelormittal Vega com implementação do Usibor®1500**Característica Técnica Especificação de Projeto da Linha**

	Original
Capacidade Anual de Produção	350.000 t
Faixa de Espessura	0,25 até 2,00 mm
Faixa de Largura	700 até 1600 mm
Revestimento Galvanizado	30 - 200 g/m ² /face
Revestimento Galvalume	30 - 100 g/m ² /face
Revestimento Usibor	70- 90 g/m ² /face

1.2 – Aços para Estampagem a quente USIBOR® (10%AISI)

O processo convencional de estampagem a frio de aços de alta resistência é geralmente limitado à produção de peças com geometrias relativamente simples devido à limitada estampabilidade e dificuldades no controle geométrico associado ao retorno elástico. Elevadas forças de estampagem, grandes distorções geométricas e excessivo desgaste de ferramentas são consequências da elevada resistência à deformação do material.

Para estas aplicações desenvolveu-se um aço ligado ao boro, baseado no 22MnB5, com revestimento composto de alumínio e silício (Al-Si), comercializado com a marca registrada Usibor® 1500. Este aço foi concebido para ser tratado termicamente seguido de uma operação de têmpera durante a operação de estampagem¹. O processo simultâneo de estampagem e têmpera é frequentemente utilizado em peças que exigem elevada resistência mecânica e um grande potencial de redução de peso. Este processo é comumente chamado de estampagem a quente (*hot stamping*) ou endurecimento na prensa (*press hardening*). As características mecânicas finais permitem uma redução de peso significativa por peça (até 50% com relação a um aço padrão de elevada resistência). O elevado limite elástico, obtido após tratamento térmico, é adequado para componentes com função anti-intrusão, como barras de para-choque frontal e traseiro, reforços de porta, assoalho, teto e coluna B, conforme ilustração da fig. 3².

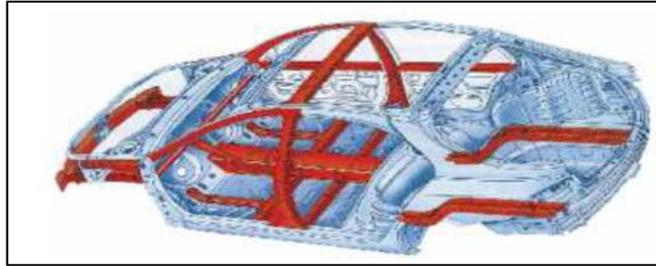


Figura 3: Exemplos de emprego do aço Usibor® 1500P em peças de segurança ³

As principais vantagens do Usibor® 1500:

- Habilidade em conformar peças de geometria complexas relacionadas aos ganhos conformação associados à presença austenítica em sua microestrutura e resistência mecânicos associados ao processo de tempera pós-conformação com a transformação microestrutural martensítica;
- Sua boa formabilidade a quente permite adequar o aço para aplicações com funcionalidades integradas (eliminando conjunto de peças de reforço);
- Total ausência de retorno elástico após estampagem (*springback*);
- Possibilita a obtenção de peças com uniformidade de propriedades mecânicas;
- Excepcional resistência a fadiga e boa resistência ao impacto, permitindo redução de peso substancial;

Além dos benefícios já citados as vantagens na aplicação do Usibor® 1500 com revestimento AISi perante os demais aços com composição 22MnB5, são:

- Simplificação dos processos e redução de custos: eliminação da etapa de jateamento (sem geração de névoa não necessitando de atmosferas protetivas em fornos de austenitização);
- Excelente corrosão temporária após estampagem, não necessitando de oleamento nas peças;
- Excelente Resistência à corrosão por pitting;

As mais variadas aplicações para o Usibor® 1500 AISi são voltadas geralmente para peças estruturais e que necessitem de bons resultados de resistência ao *crash test* como coluna B, Reforço de Para-Choques, Reforço de portas, longarinas, pilares, entre outras conforme ilustrado na figura 4.



Figura 4: Exemplos de peças conformadas em materiais Usibor® 1500 para indústria automobilística

1.3– Estampagem á quente

O princípio de estampagem a quente está diretamente relacionado com as oportunidades oferecidas pela composição química dos aços ligados ao boro (*boron-alloyed steel*) devido à robustez da janela de processo para a operação de têmpera.

O Usibor pertence ao grupo de aços martensíticos com elevada temperabilidade, ou seja, a transformação martensítica ocorre mesmo em baixas taxas de resfriamento. O material base de composição semelhante ao 22MnB5, apresenta uma microestrutura composta de ferrita-perlita com limite de resistência de aproximadamente 600 MPa. Depois de a peça ser estampada a quente, a microestrutura obtida é predominantemente martensítica e com um aumento de até 250% no limite de resistência, conforme ilustrado na Figura 5.

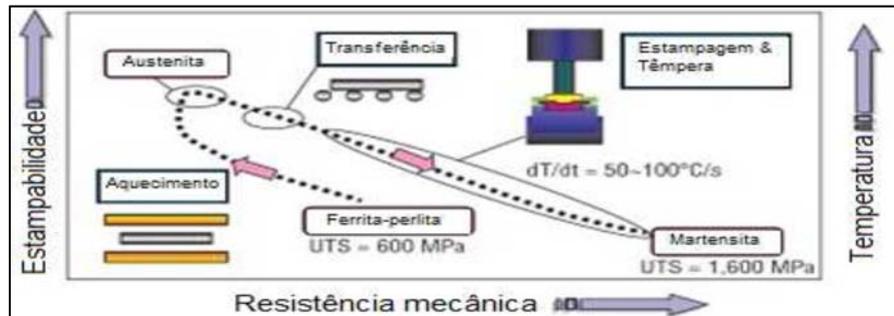


Figura 5. Exemplos de peças conformadas em materiais Usibor® 1500 para indústria automobilística

O processo de estampagem a quente inicia com a austenitização do blank (ou com a peça pré-deformada no caso de uma operação indireta), usualmente em um forno de aquecimento contínuo durante 4 a 10 minutos em temperaturas entre 880-930°C. Este procedimento cria uma microestrutura austenítica homogênea. O blank é então rapidamente transferido para uma prensa, com sistemas de resfriamento integrados à ferramenta de estampagem, através de um sistema de transferência automático, conforme ilustrado na Figura 6.

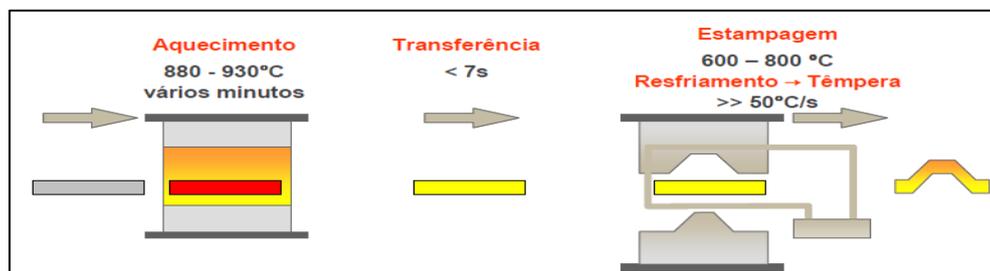


Figura 6. Representação esquemática das etapas envolvidas no processo de estampagem a quente

Parâmetros como tempo de transferência entre o forno e a prensa devem ser minuciosamente controlados afim de evitar possíveis reduções da capacidade de estampagem do material, associada a ocorrência localizada de transformação de fase durante estampagem, conduzindo a descontinuidades no comportamento do material, potencial localização da deformação e elevado atrito nas regiões de dobramento gerando desgaste da ferramenta⁴.

Em elevadas temperaturas, entre 650 a 850°C, o material apresenta excelente conformabilidade e a peça pode ser estampada em geometrias complexas em somente uma operação. A têmpera ocorre preferencialmente após estampagem, com a ferramenta fechada, evitando assim a localização da deformação pelo endurecimento localizado devido à presença de martensita.

Como resultado da mudança microestrutural, é possível obter peças com limite de resistência superior a 1500 MPa. O revestimento Al-Si, que durante o tratamento térmico de austenitização se transforma em fases Fe-Al-Si, previne a oxidação e

descarbonetação do metal⁵. Pelo fato da peça ser estampada a elevadas temperaturas e permanecer aprisionada no interior da ferramenta durante a etapa de resfriamento, o efeito *springback* é minimizado³.

1.4-Definição das condições de estampagem a quente

A operação de estampagem é realizada na fase austenítica devido à maior ductilidade do aço. Para compreender as condições nas quais esta etapa ocorre, o diagrama TRC será dividido em três zonas distintas conforme destaque na Fig. 7.

Zona 1: corresponde à austenita estável. Nesta zona não ocorre transformação de fase em função do tempo.

Zona 2: corresponde à austenita instável. É nesta zona que a peça é estampada e, por consequência, de grande interesse na sua caracterização nesta região, para se evitar a transformação bainítica, a velocidade de resfriamento deve ser no mínimo de 27°C/s. Esta velocidade crítica de resfriamento permite obter uma microestrutura final inteiramente martensítica.

Zona 3: corresponde a uma microestrutura martensítica obtida durante a fase de têmpera dentro da ferramenta de estampagem⁶.

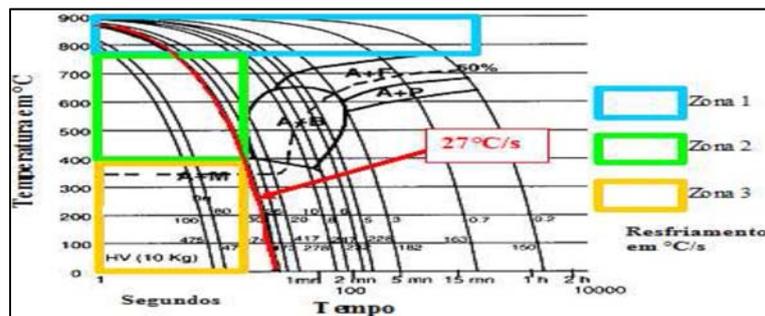


Figura 7. Condições de estampagem a quente⁶.

2. METODOLOGIA

Com relação a viabilidade dimensional as homologações iniciais seguem conforme especificação abaixo ilustrada na figura 8. As tolerâncias de espessura para o material laminado a frio segue os requisitos da norma DIN EN 10143:2006 e para a após laminação a quente segundo a norma 2/3 EN10051 cat B.

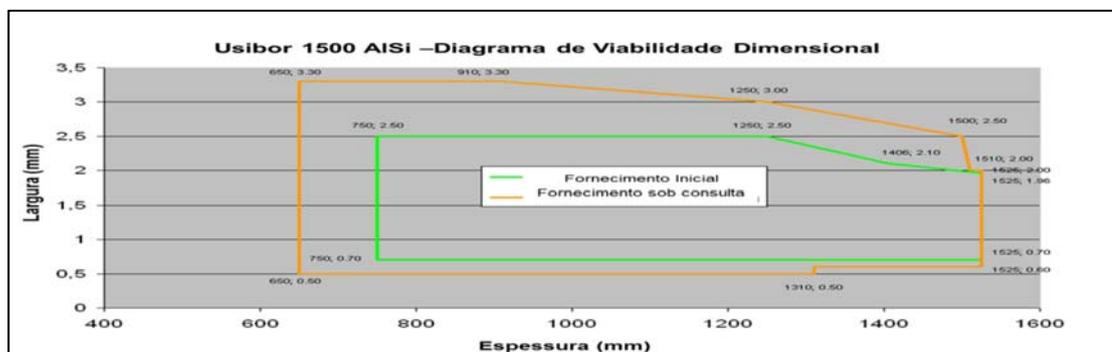


Figura 8. Viabilidade Dimensional dos primeiros fornecimentos Usibor® 1500 na linha de galvanização 2.

Como substrato adotou-se como padrão um aço com composição semelhante ao aço 22Mn5B conforme descrito na tabela 3:

Tabela 3. Composição Química dos aços processados Usibor® 1500 na ArcelorMittal Vega

C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Ti	Al	B
<0,27	0,15 – 0,40	1,10 – 1,70	≤ 0,5	≤ 0,35	≤ 0,03	≤ 0,01	<0,1	<0,1	0,001 – 0,005

Para o material em forma de *blank* ou bobina galvanizada a microestrutura visada deve ser ferrita-perlita com propriedades mecânicas e especificação de pesos de revestimento antes de estampagem a quente conforme tabelas 4 e 5 respectivamente .

Tabela 4. Especificação de propriedades mecânicas dos aços Usibor® 1500 produzidos no Brasil

LE (MPa)	LR (MPa)	AI%
350 - 550	500 - 700	≥ 10

Tabela 5. Especificação de pesos de camada de revestimento de AlSi dos aços Usibor® 1500 antes da estampagem a quente .

Nomenclatura Comercial	Revestimento (g/m ²) por face				Revestimento (µm)
	3 Pontos		1 ponto		
	Min	Max	Min	Max	
AS80	35	60	30	65	10 a 20
AS150	70	90	60	100	19 a 33

2.1. Processo de Estampagem a Quente durante período de Homologação do Material Usibor

O processo de homologação de material Usibor® 1500 na estamparia automotiva passa por uma avaliação de propriedades mecânicas e microestruturais para o antes e após a estampagem a quente. Para a peça de reforço do para-choque , ilustrado na figura 9,selecionou-se 8 pontos de amostragem para avaliação de propriedades mecânicas , sendo 4 pontos para realização de ensaios de tração, dois pontos para verificação de dureza Vickers e Rockwell e caracterização microestrutural e mais dois pontos para duplicidade de ensaios de dureza Rockwell, conforme esquematizado na figura 10, seguindo requisitos de ensaio descritos da tabela 6 conforme norma do cliente .



Figura 9. Peça estampada a quente durante homologação do material Usibor® 1500 (Reforço do para-choque)

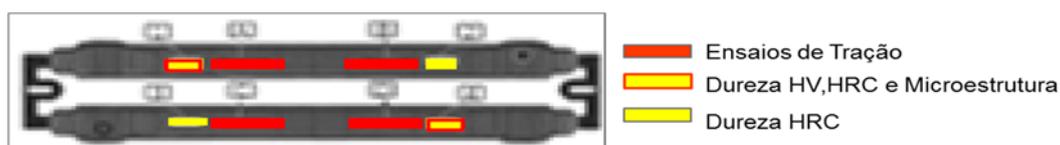
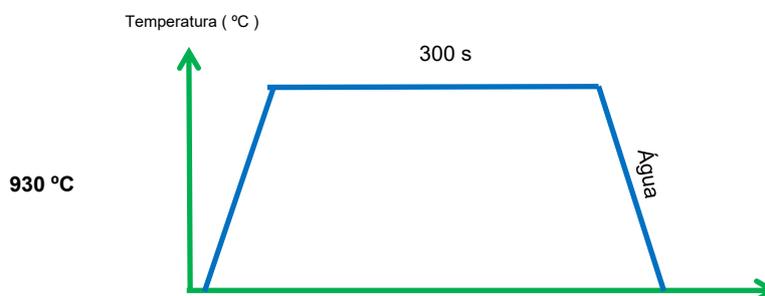


Figura 10. Esquema de amostragem para avaliação de propriedades da peça estampada a quente (Reforço do para-choque)

Tabela 6. Requisitos de Ensaios para Homologação do material Usibor® 1500 (Reforço do para-choque)

Avaliação	Método de Ensaio	Requisito
Resistência Mecânica (MPa)	Ensaio de Tração	1300 - 1650
Escoamento (MPa)		950-1250
Alongamento%(Lo=50mm)		≥ 5%
Espessura	Controlados em 4 zonas ,análise em 1 ponto em cada zona	Tolerância 20% menor que a espessura Nominal
Dureza Vickers	3 pontos em cada posição, medir ao longo da espessura	400 a 520 HV10
Dureza Rockwell	3 pontos em cada posição, medir ao longa da superfície da amostra (removendo revestimento AISi);	40,8 a 50,5 HRC
Microestrutura	Micrografia Ótica 500x, ataque químico Nital 4%.	Deve apresentar estrutura 100% martensítica temperada
Espessura de Camada de Revestimento	Micrografia Ótica 500x	
	Espessura de Revestimento Total	30-50µm
	Espessura de Camada de Difusão	≤16 µm

O processo de estampagem a quente ao qual a peça foi conformada no cliente segue esquematizado na figura 11, através de uma etapa de aquecimento a 930°C por 300 segundos e posterior tempera em água a temperatura ambiente com taxa de resfriamento de resfriamento de 30°C/s.

**Figura 11.** Ciclo de simulação de processo de estampagem a quente realizado na montadora.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados de caracterização mecânica e microestrutural obtido em bobinas de material Usibor® 1500. Os resultados foram baseados em uma produção de 90 ton de aço 22MnB5, onde foram visadas as garantias de propriedades mecânicas segundo requisitos da tabela 6 .Para realização dos resultados de propriedade mecânica considerou-se retirada de amostras perpendiculares ao sentido de laminação, atendendo a norma DIN EN 10002-1.

A figura 12 apresenta os resultados de limite de resistência para as bobinas processadas na primeira campanha de material Usibor® 1500 antes da estampagem a quente, observa-se que todos os valores medidos encontraram-se dentro dos limites especificados para estes materiais (350 -550 Mpa), antes do processo de conformação por estampagem a quente.

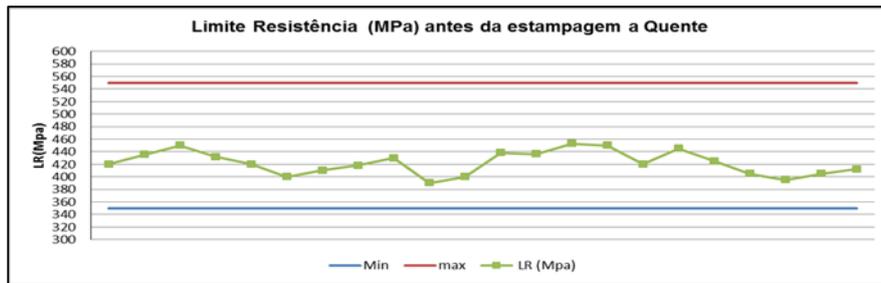


Figura 12 Resultados de Limite de Resistencia das bobinas produzidas na primeira campanha de material Usibor® 1500 na Arcelormittal Vega.

A figura 13 apresenta os resultados de alongamento total para todas as bobinas processadas na primeira campanha de material Usibor® 1500 todos os valores medidos encontraram-se muito acima do limite de especificação mínimo de 10%.

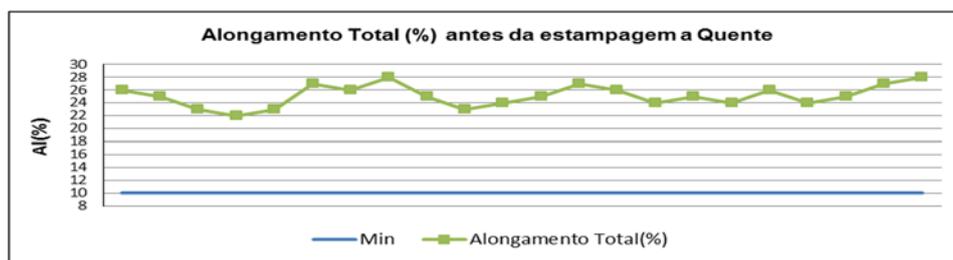


Figura 13. Resultados de alongamento total de bobinas produzidas na primeira campanha de material Usibor® 1500 na Arcelormittal Vega.

3.1 – Microestrutura típica do material Usibor ®1500 produzido na Vega antes da estampagem a quente

A figura 14 apresenta a microestrutura do revestimento Usibor ®1500 antes do processo de estampagem com aumento de 1000 x em microscópio óptico, onde observa-se regiões ricas em Al e Si , a presença de uma camada intermetálica entre o substrato e o revestimento formada sem discontinuidades e a presença de ligas Fe-Al-Si também na região do revestimento propriamente dito.



Figura 14. Microestrutura típica de revestimento Usibor®1500 antes da estampagem a quente.

A figura 15 e tabela 7 apresenta a análise de seção transversal das amostras via MEV-EDS antes da estampagem. Os pontos 1 e 2 representam a composição das camadas intermetálicas compostas por $\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_3$ ricas em Al e Fe mas contendo a presença de Si em menores proporções. Os pontos 3 e 4 representam as fases de transição entre o revestimento de zinco e a camada intermetálica compostas por $\text{Fe}_2\text{SiAl}_7(\theta_5)$, também ricas em alumínio e ferro mas com maiores proporções de Si quando comparado aos valores identificados na interface substrato

revestimento. Os pontos 5,6 7 e 8 representam a camada de revestimento propriamente dito com fases ricas em Al e Si respectivamente.

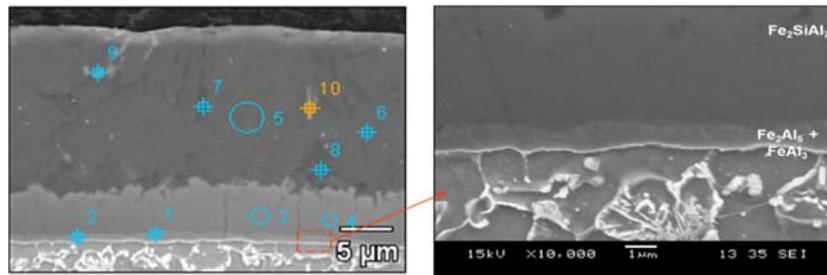


Figura 15. Análise de Seção transversal de amostras de material Usibor®1500 produzido na Arcelormittal Vega antes da estampagem a quente.

Tabela 7. Análise EDS da seção transversal amostra de Usibor® 1500 antes da estampagem a quente

	Fases	Análise Química via EDS			Espessura das Fases (µm)	Espessura Total Coating (µm)
		Al (%)	Si (%)	Fe (%)		
1 e 2	Fe ₂ Al ₅ + FeAl ₃	45,85	3,68	50,47	0,82	23,00
		42,07	4,25	53,68		
3 e 4	Fe ₂ SiAl ₇ (θ ₅)	50,64	9,57	39,79	5	
		50,28	9,42	40,30		
5 e 6	Al-Rich Phase	98,47	1,53	-	Não Aplicável	
		98,56	1,44	-		
7 e 8	Si-Rich Particles	48,23	51,77	-		
		75,80	24,20	-		
9 e 10	Fe ₂ SiAl ₇ (θ ₆)	72,20	7,15	20,65		
		87,72	2,23	10,05		

As análises microestruturais no material após a estampagem foram realizadas no material conformado a quente conforme ciclo descrito na etapa de metodologia. Para estas caracterizações foram realizados ensaios de superfície afim de avaliar a presença de microestrutura 100 % martensítica, conforme requisitos do cliente e presença de camada de interdifusão, figura 16.

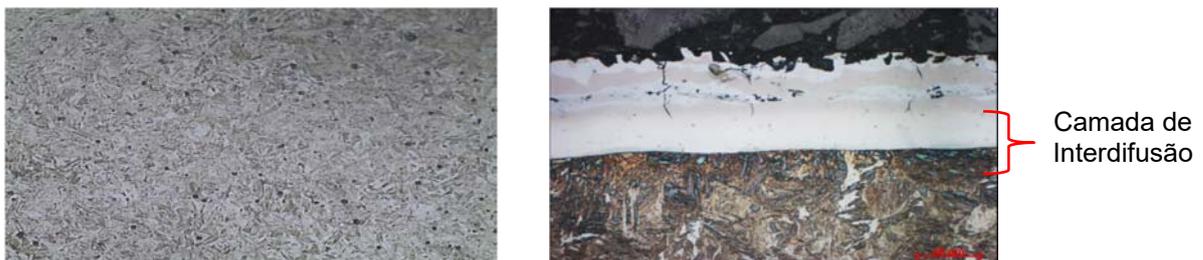


Figura 16. Microestrutura típica de revestimento Usibor®1500 após estampagem a quente durante homologação da peça reforço de para choque FOX.

Após estampagem evidenciou-se presença de microestrutura martensítica temperada e a figura 17 e tabela 8 apresentam os resultados de composição química via MEV-EDS para a peça conformada industrialmente além da espessura do revestimento total e camada de interdifusão. Os pontos 1 a 4 representam a composição da camada de interdifusão mais rica em Fe devido a difusão deste elemento do substrato para o revestimento durante fase de austenitização e pobre em Al, enquanto a camada intermetálica representada pelos pontos de 5 a 11, evidencia-se a presença de uma alta concentração de Al e Si e Fe mas em

proporções menores do que na fase descrita anteriormente. As espessuras de revestimento total e camada de interdifusão atenderam os limites de especificação requeridos com valores na faixa de 6,17 a 7,86 μm e 45,3 – 47,7 respectivamente.

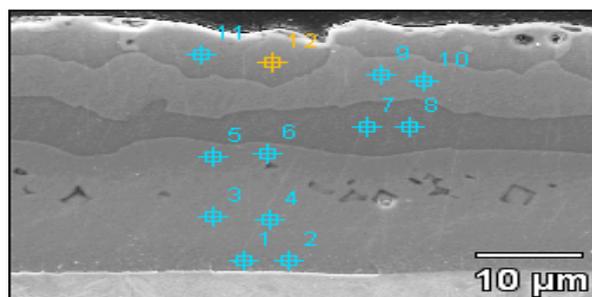


Figura 17. Análise de Seção transversal de amostras de material Usibor®1500 produzido na Arcelormittal Vega após estampagem a quente.

Tabela 8. Análise EDS da seção transversal homologação amostra de Usibor® 1500 após estampagem a quente.

Pontos	Fases	Composição Química via EDS				Espessura Fases (μm)	Espessura Total do Revestimento (μm)
		Al (%)	Si (%)	Mn (%)	Fe (%)		
1 a 4	Camada de Interdifusão	2,51	1,26	1,67	94,25	6,17-7,86	45,3 - 47,7
		2,37	1,19	1,60	94,64		
		6,94	2,24	1,13	89,69		
		6,81	2,50	1,43	89,26		
5 a 11	Camada Intermetálica	24,72	4,74	1,08	69,46	-	
		25,33	4,71	1,61	68,35		
		46,39	0,67	0,29	52,65		
		46,24	0,93	0,72	52,11		
		25,30	6,14	1,06	67,50		
		25,70	5,95	1,70	66,65		
		46,78	1,28	0,41	51,53		
		47,49	1,55	0,78	50,18		

3.2 – Resultados de Final da Homologação peça Reforço para-choque

A Tabela 9 apresenta os resultados de propriedades mecânicas verificados durante estampagem industrial da peça reforço para-choque, com material Usibor®1500. Os resultados são apresentados de acordo com o número de amostras e medições por ponto descrito na tabela 8, Todos os resultados atenderam os requerimentos especificados apresentando bons resultados para a aplicação proposta.

Tabela 8: Resultados Homologação Usibor®1500

Avaliação Característica durante Homologação Usibor®1500			
Propriedades		Resultados	
Resistência Mecânica (Mpa)	1300 - 1650	1474	
Escoamento (Mpa)	950-1250	1177	
Alongamento% (Lo=50 mm)	≥ 5%	8%	
Espessura	Tolerância 20% menor que a espessura Nomina	Nominal	1,88
		Mínimo	1,80
		Máximo	1,82
Dureza Vickers	400 a 520HV	Posição 1: 494,0	494,0
		Posição 2	486,4
		Posição 3	497,0
Dureza Rockwell	40,8 a 50,5 HRC	Posição 1	47,0
		Posição 2	46,5
		Posição 3	46,0

4 CONCLUSÃO

Baseado no trabalho realizado para desenvolvimento do aço Usibor® 1500 produzido na Arcelormittal Vega, verifica-se que:

- A Linha de Galvanização 02 está apta a produzir o revestimento Usibor atendendo aos padrões internacionais de condições de processamento e qualidade;
- É possível atender aos requisitos de propriedades mecânicas solicitados pelas normas internacionais e de montadoras automotivas, além de identificar similaridade com as propriedades mecânicas dos materiais já fornecidos por usinas siderúrgicas europeias do grupo Arcelormittal;
- O resultado de peso de revestimento atende aos requisitos das normas solicitadas pelos clientes, sendo com isso indicado para as mais diversas aplicações no segmento de peças estruturais na indústria automobilística.

Além da produção da aplicação do USIBOR® 1500, a Arcelormittal Vega tem como próximos passos a produção dos materiais Usibor® 2000 também com base AlSi, aumentando as opções para utilização dos aços de estampagem a quente, oferecendo ao mercado brasileiro um produto inovador e alinhado com as necessidades globais de mercado de possibilitar conformação de peças de alta criticidade de conformação com ganhos de segurança e redução de peso para os veículos.

REFERÊNCIAS

- 1 Steel for Hot Stamping Usibor®. Catálogo Arcelormittal, 2014.
- 2 Study of phase transformations in the Al-Si coating during the austenitization step. ArcelorMittal, 2011.
- 3 Garcia-Aranda, L.. Etude thermo-mécanique et modélisation numérique de L'emboutissage à chaud de L'USIBOR 1500P®. Tese de doutorado. École des Mines de Paris.2004; Paris, 191.
- 4 SOUZA, F. B. P.; SANTOS, D. B.. Simulação Numérica do Processo de Estampagem a Quente.50º Seminário de Laminação AMB, 2013, Ouro Preto.p.3.
- 5 SOUZA, F. B. P.; SANTOS, D. B.. Modelagem da Cinética de Transformação de Fases na Estampagem a Quente do Aço USIBOR 1500P. In: 67º ABM International Annual Congress, 2012, p.3

- 6 Bardelcik, A., Salisbury, C. P., Winkler, S., Wells, M. A., Worswick, M. J. Effect of Cooling Rate on the High Strain Rate Properties of Boron Steel International Journal of Impact Engineering 37 (6) 2010: pp. 694 – 702.
- 7 Kolleck, R., Veit, R., Merklein, M., Lechler, J., Geiger, M. Investigation on Induction Heating for Hot Stamping of Boron Alloyed Steels CIRP Annals – Manufacturing Technology 58 (1) 2009: pp. 275 – 278.
- 8 Especificação Técnica - CGL02 – ArcelorMittal Vega. 2008