

# Estudo da estampagem a quente do aço 22MnB5 com revestimento Al-Si

Bruno César Cordeiro <sup>1\*</sup> André Rosiak <sup>1</sup> Thais Morato <sup>1</sup> Lirio Schaeffer <sup>1</sup> 

## Resumo

A estampagem a quente dos aços ao boro gera uma melhoria no processamento desses materiais, entretanto a ocorrência da oxidação é acentuada no contato da peça aquecida com a atmosfera. A utilização de revestimentos protetores é uma solução para redução da severidade do processo corrosivo. Neste estudo é caracterizada a influência da adição do revestimento de alumínio-silício no substrato 22MnB5. Deste modo são avaliadas amostras de mesmo material base com e sem recobrimento. As peças são estampadas em diferentes temperaturas e analisadas quanto à integridade superficial, microdureza e corrosão cíclica. Os resultados mostram um aumento de microdureza, diminuição da rugosidade média (Ra) e melhoria na avaliação de corrosão cíclica, medida pela redução de massa, quando o revestimento aluminizado é utilizado no substrato 22MnB5.

**Palavras-chave:** Estampagem a quente; 22MnB5; Revestimento; Corrosão.

## Study of the hot stamping of 22MnB5 steel with Al-Si coating

## Abstract

The hot stamping of boron steels provides an improvement in the processing of these materials. The occurrence of oxidation, however, is accentuated in the contact of the heated part with the atmosphere. The use of protective coatings is a solution for reducing the severity of the corrosive process. In this study, the influence of the addition of the aluminum-silicon coating on the 22MnB5 substrate is characterized. Hence, samples of the same substrate with and without coating are evaluated. The parts are stamped at different temperatures and analyzed for surface integrity, microhardness and cyclic corrosion. Results show an increase in microhardness, a decrease in the average roughness (Ra) and an improvement in the cyclic corrosion performance, measured via mass reduction, when the aluminized coating is used on the 22MnB5.

**Keywords:** Hot stamping; 22MnB5; Coating; Corrosion.

## 1 Introdução

O interesse crescente do setor automotivo em atenuar a emissão de poluentes e ampliar a eficiência energética dos veículos potencializou, nas últimas décadas, a utilização dos Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS). Uma das famílias que pode alcançar resistência mecânica de até 1500 MPa após a têmpera, permitindo a redução do peso dos veículos, devido a redução da espessura dos componentes é a dos aços martensíticos [1]. O processamento a frio desses materiais apresenta algumas limitações como estampabilidade reduzida, grande retorno elástico e a necessidade de altas forças de estampagem. A solução encontrada pela indústria para evitar os referidos problemas foi o emprego da

estampagem a quente [2]. Neste processo as geratrizes são austenitizadas e, posteriormente, estampadas e temperadas, simultaneamente [3].

Os aços baixo carbono ao boro são a única classe de AHSS capaz de gerar uma microestrutura totalmente martensítica após a conformação a quente, desde que a taxa de resfriamento seja superior ou igual a 27°C/s durante o processamento. Isto se deve à adição de elementos de liga que aumentam a temperabilidade do aço ao retardarem as transformações da austenita em bainita e ferrita [4]. O aço 22MnB5 é o mais utilizado desta classe e por isso é o substrato

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

\*Autor correspondente: [bcc.ordeiro@hotmail.com](mailto:bcc.ordeiro@hotmail.com)



utilizado neste estudo. A Tabela 1 apresenta a composição química característica deste material.

Um inconveniente da estampagem a quente é a susceptibilidade das amostras à oxidação em altas temperaturas de aquecimento. Objetivando inibir tal fenômeno, a indústria passou a utilizar revestimentos protetores. Os revestimentos de alumínio-silício ligados ao substrato através de imersão a quente são bastante utilizados. A liga com aproximadamente 10% de silício forma camadas intermediárias que protegem o substrato através do mecanismo de barreira [4]. O aço 22MnB5 revestido com Al-Si tem aumento da concentração de ferro no revestimento quando estampado a quente devido à elevada difusão às altas temperaturas de processamento [5]. A alteração na composição química do revestimento protege o substrato contra a oxidação e corrosão através da formação de camadas intermetálicas como mostra a Figura 1.

Existem diversos testes para avaliação da susceptibilidade à corrosão. Os ensaios de câmara úmida e névoa salina são bastante utilizados na indústria. Esses ensaios consistem em manter a peça sob aplicação, sucessivamente, de uma porcentagem de umidade e de uma solução salina. Outros testes foram desenvolvidos na indústria automotiva. Para os testes de corrosão cíclicos (CCT, *cyclic corrosion tests*), que permitem simular maior número de ambientes, não existe um padrão internacional tendo em vista que os ciclos foram desenvolvidos nas plantas industriais das próprias fabricantes de veículos. De forma geral, estes ensaios possuem os seguintes estágios: pulverização salina, secagem ao ar,

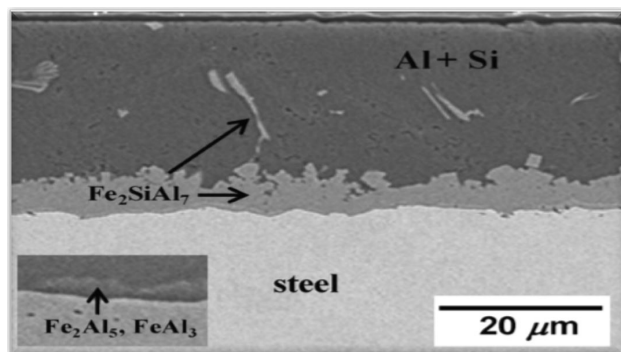


Figura 1. Seção transversal de um revestimento de alumínio, evidenciando os compostos intermetálicos entre substrato e revestimento [5].

exposição a umidade por condensação, ciclos de diferentes níveis de umidade [6].

Este estudo buscou analisar a influência da adição do revestimento de Al-Si no substrato de 22MnB5 no processo de estampagem a quente em matriz refrigerada. As amostras estampadas com e sem revestimento foram submetidas a testes de integridade superficial, microdureza e susceptibilidade a corrosão por meio do ensaio cíclico.

## 2 Materiais e métodos

A caracterização inicial do material foi realizada a partir da análise química do percentual de massa utilizando um espectrômetro de emissão Q2ION, marca BRUKER. A Figura 2 apresenta as etapas de realização da estampagem. Foram cortadas tiras do aço 22MnB5 revestido com Al-Si, bem como tiras sem revestimento com 1,5 mm de espessura nas dimensões de 240x40 mm. Posteriormente, os dois materiais foram austenitizados em três diferentes temperaturas: 850°C, 950°C e 1050°C por 7 minutos e estampados em uma prensa de duplo efeito marca Dan Presse de 20 ton. As matrizes de estampagem foram refrigeradas com água a 10°C, aferida com utilização de termopares tipo K e conectados ao sistema de aquisição de dados. A Figura 3 mostra o ferramental montado para realização dos ensaios. Após a conclusão da estampagem foram realizadas as seguintes análises: (I) teste de rugosidade (Ra); (II) perfil de microdureza; (III) teste de corrosão cíclica; (IV) análise visual.

Após a estampagem, as amostras foram limpas e a camada de óxido não completamente aderida foi retirada. A análise de integridade superficial foi realizada com um rugosímetro da marca Mitutoyo modelo SJ-210. Para a construção do perfil de microdureza na seção transversal das amostras foi utilizado um microdurômetro Insize Hardness Tester ISH-TDC1000 com carga de 0,5 kgf. A Figura 4 mostra esquematicamente as regiões nas quais foram realizadas as análises pontuais de rugosidade e microdureza. Para ambos os casos foram executadas três medições em cada região e calculadas as médias, o método foi repetido para três peças em cada condição, com e sem revestimento, bem como em cada temperatura de aquecimento (850°C, 950°C e 1050°C).

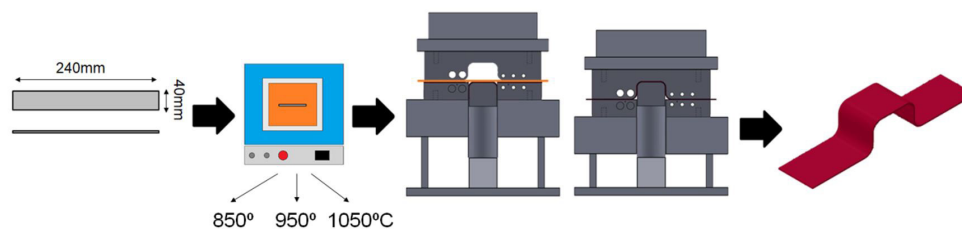


Figura 2. Representação esquemática do processo de estampagem realizado.

Tabela 1. Valores de composição química característica do aço 22MnB5 em % de massa [3]

Elemento	C	Mn	B	Al	Cr	N	Ni	Si	Ti
% em massa	0,23	1,18	0,002	0,03	0,16	0,005	0,12	0,22	0,04



Figura 3. Ferramental utilizado na estampagem das amostras.

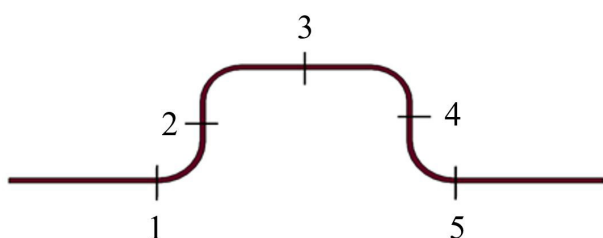


Figura 4. Regiões onde a rugosidade (Ra) foi avaliada nas amostras.

O teste de corrosão cíclica foi realizado em uma câmara da marca Equilam modelo SS e CCT. O ciclo escolhido foi baseado na norma D17-2028 utilizada pela montadora francesa Renault, o qual é apresentado na Figura 5. Nesta investigação foram realizados dois ciclos completos de 1440 minutos cada. Os corpos-de-prova foram pesados em balança semi-analítica de precisão, com resolução de 0,001 g, da marca Ohaus, nas três condições: matéria-prima, estampado e submetido ao ensaio de corrosão.

### 3 Resultados e discussões

A composição química medida do aço é apresentada na Tabela 2. Os valores estão de acordo com os limites estabelecidos pela norma DIN EN 10083-3.

#### 3.1 Integridade superficial

A Figura 6 mostra os resultados da rugosidade média (Ra) dos corpos-de-prova dos dois materiais. O aço 22MnB5 sem revestimento apresentou os maiores valores, os quais foram 1,67  $\mu\text{m}$  e 1,82  $\mu\text{m}$  nas temperaturas de 850°C e 950°C, respectivamente. Os valores para o 22MnB5 com

Tabela 2. Valores em % de massa dos componentes químicos encontrados na análise química do substrato 22MnB5

C	Si	Mn	Cr	Ti	B	Al
0,23	0,21	1,24	0,19	0,05	0,004	0,04

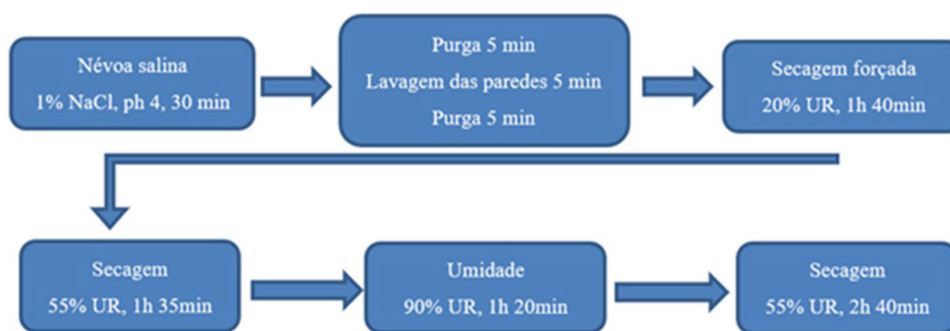


Figura 5. Etapas do ciclo de corrosão Renault D17-2028.

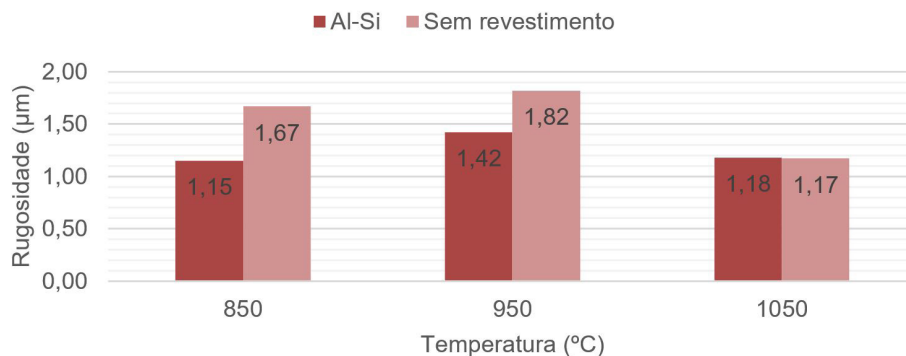


Figura 6. Comparação das médias nas três regiões obtidas em cada temperatura de aquecimento.

camada de Al-Si foram 1,15  $\mu\text{m}$  e 1,42  $\mu\text{m}$ . Ao aquecer as amostras a 1050°C os valores ficam praticamente idênticos, inclusive dentro do desvio padrão das medições, que foi de 0,20  $\mu\text{m}$ . Todas as medições estiveram dentro do patamar que a literatura [7] referência como ideal para o processo de pintura, 1  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$ , sem que haja necessidade da etapa anterior de jateamento.

Os valores obtidos para análise de integridade superficial na literatura variam consideravelmente. Uda et al. [8], que ao buscar desenvolver um novo lubrificante para estampagem a quente, encontrou 2,81  $\mu\text{m}$  de rugosidade (Ra) para o 22MnB5 revestido. Gracia-Escosa [9] concluiu que o revestimento de Al-Si reduz a rugosidade quando as amostras são aquecidas e teve valor médio de 1,1  $\mu\text{m}$  com a amostra sendo aquecida a 900°C, basicamente o mesmo encontrado quando o aquecimento foi de 850°C.

### 3.2 Microdureza

As Tabelas 3 e 4 revelam os valores médios obtidos em cada um dos pontos do perfil de microdureza, respectivamente, para as amostras apenas estampadas e após exposição aos ciclos de corrosão. As médias para o material aluminizado foram: 543 HV, 518 HV e 468 HV para as três temperas de aquecimento do forno, respectivamente. Já para o 22MnB5 sem revestimento, esses valores foram: 488 HV, 476 HV e 451 HV.

Percebe-se aumento de microdureza nas amostras revestidas com Al-Si independente da temperatura de aquecimento dos corpos-de-prova, todavia a diferença cresceu com o aumento da temperatura, passando de 17 HV com aquecimento de 850°C para 54 HV. Entretanto, todas as medições foram superiores a 400 HV que é o valor característico de uma microestrutura martensítica segundo Naderi et al. [10].

Para Zapata [11] o aço 22MnB5 não revestido nas regiões de contato acentuado entre o punção e o corpo-de-prova alcança valores adjacentes a 470 HV, com a peça sendo aquecida a 950°C. Os valores encontrados para o aço 22MnB5 aluminizado estão próximos daqueles expostos por George et al. [12] nos quais as amostras foram aquecidas a 950°C e a média de microdureza foi aproximadamente 505 HV. Lisboa [13] obteve 500 HV quando as amostras foram aquecidas até 1000°C, já para Cardoso et al. [14] o valor de 520 HV foi encontrado para o aquecimento de 930°C.

As medições de microdureza obtidas após o ensaio de corrosão cíclica D17-2028, utilizado pela montadora Renault, mantiveram-se mais elevadas para as amostras revestidas, com valores variando entre 523 HV e 445 HV. Enquanto para o material sem revestimento a medição girou entre 486 HV e 441 HV. Com exceção de dois pontos de medição na peça sem revestimento aquecida até 950°C, os registros obtidos foram inferiores após os ciclos de corrosão. O aço revestido teve diminuição mais acentuada na medição de microdureza: em média os valores foram 3,6% menores, enquanto para 22MnB5 sem revestimento houve uma queda

na média de 1,2%. Em valores absolutos a queda foi de 18 HV e 6 HV, respectivamente.

### 3.3 Ciclo de corrosão

A Tabela 5 evidencia uma designação para classificar as imagens realizadas durante o ensaio cíclico de corrosão.

As Figuras 7, 8 e 9 mostram as imagens realizadas em três etapas: estampadas, após o 1º ciclo de corrosão e após o 2º ciclo de corrosão de cada um dos dois materiais e em cada condição de aquecimento.

As amostras de 22MnB5 revestidas com Al-Si obtiveram, no máximo, o nível 2 no critério exposto, o que significa que houve corrosão pontual e deslocamento também pontual. No entanto, o material sem revestimento apresentou, notadamente ao final do segundo ciclo de exposição, nível bastante acentuado de corrosão. Seria necessário realizar uma etapa para retirada da camada oxidada, o que resultaria na diminuição do próprio substrato, diferentemente do material revestido, no qual toda a porção corroída atinge apenas o revestimento.

No estudo de Allély et al. [15] que realizou ensaio cíclico de corrosão de acordo com a norma VDA233-102 para o 22MnB5 revestido, os autores concluem que o Al-Si gera produtos que resultam em barreira e diminuem consideravelmente a taxa de corrosão nesses materiais.

**Tabela 3.** Resultados dos perfis de microdureza das amostras estampadas

	Perfil de Microdureza (HV)				
	1	2	3	4	5
Al-Si 1050°C	533	550	551	543	537
Al-Si 950°C	516	516	526	512	520
Al-Si 850°C	450	461	486	479	466
22MnB5 1050°C	485	487	494	492	484
22MnB5 950°C	470	479	486	481	462
22MnB5 850°C	447	450	457	453	449

**Tabela 4.** Resultados dos perfis de microdureza das amostras corroídas

	Perfil de Microdureza (HV)				
	1	2	3	4	5
Al-Si 1050°C	496	494	502	488	480
Al-Si 950°C	472	482	484	473	470
Al-Si 850°C	445	448	461	466	462
22MnB5 1050°C	475	484	484	486	482
22MnB5 950°C	470	472	481	474	465
22MnB5 850°C	441	442	446	443	445

**Tabela 5.** Designação de severidade visualizada nas amostras na avaliação de resistência a corrosão

Severidade	Descrição
0	Amostra inicial
1	Corrosão pontual - Sem deslocamento
2	Corrosão pontual - Deslocamento pontual
3	Corrosão alastrada - Sem deslocamento
4	Corrosão alastrada - Deslocamento pontual
5	Corrosão alastrada - Deslocamento severo



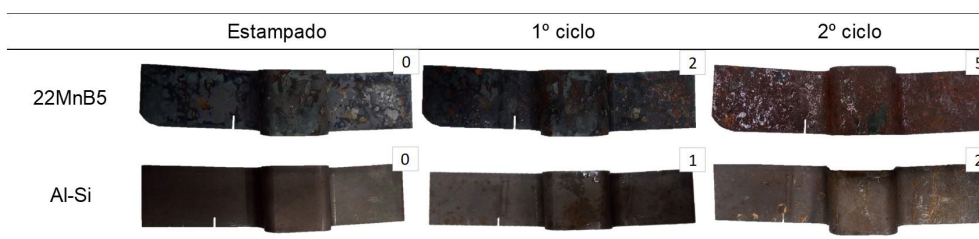


Figura 7. Imagens obtidas para ambos materiais para temperatura de aquecimento de 850°C.

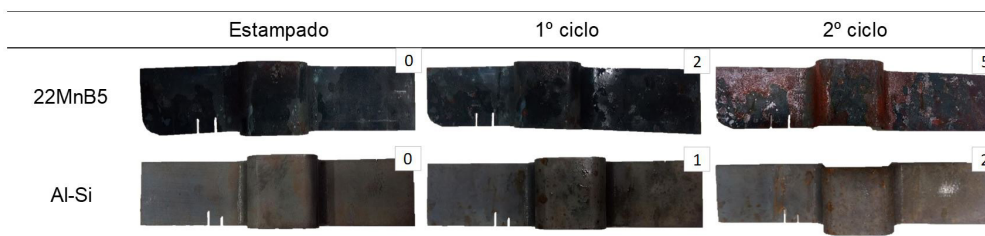


Figura 8. Imagens obtidas para ambos materiais para temperatura de aquecimento de 950°C.

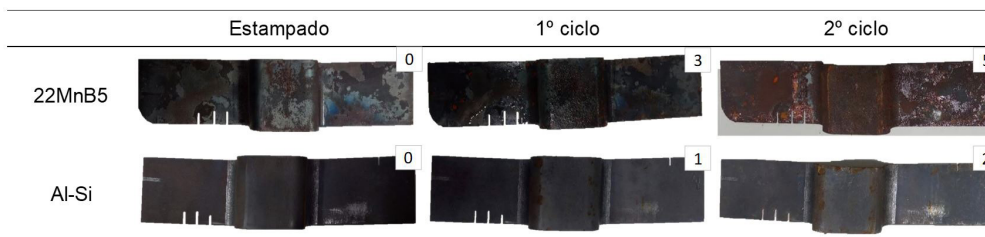


Figura 9. Imagens obtidas para ambos materiais com a temperatura de aquecimento de 1050°C.

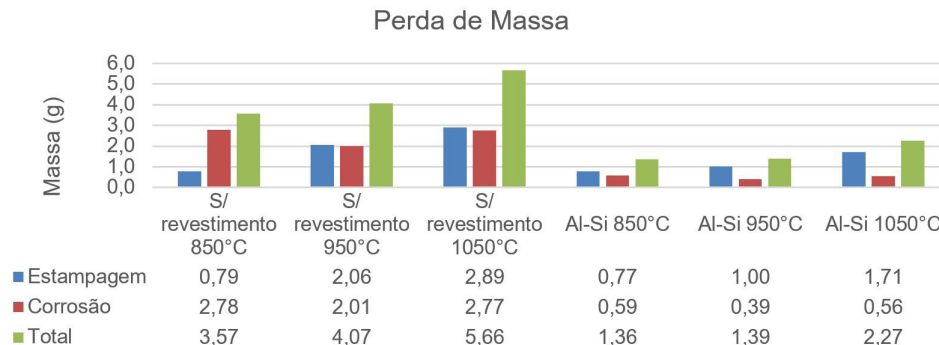


Figura 10. Comparação entre a massa perdida em cada condição de estampagem e em cada etapa.

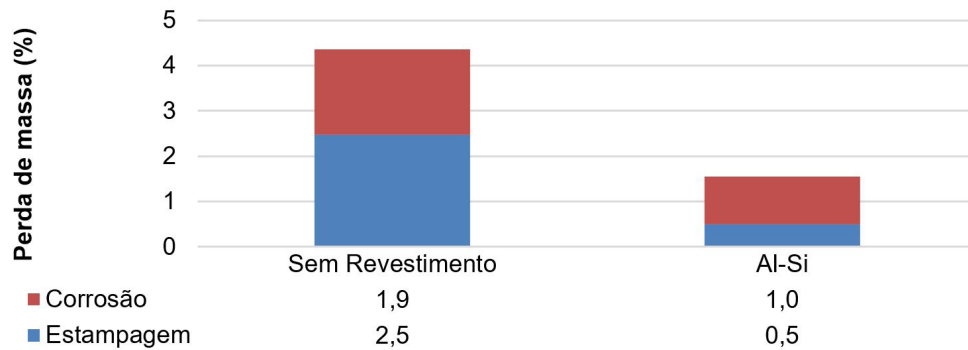
Segundo Suehiro et al. [16] as ligações Fe-Al ocorridas após o aquecimento são responsáveis pela melhor resistência à corrosão, podendo obter resultados próximos à galvanização.

Com vistas a entender a relação entre os produtos da corrosão em cada etapa do processo, foi realizada ainda uma análise de perda de massa. A Figura 10 mostra os valores medidos nos ensaios, o erro associado à medição é de  $\pm 0,002$  g.

Os corpos-de-prova sem revestimento possuíam 101,75 g cada e perderam 13,30 g, enquanto as amostras revestidas pesavam 108,65 g e perderam 5,03 g no total. Pode-se supor, portanto, que 72% da massa perdida pelas amostras tenha sido do aço sem revestimento. Também é possível verificar a considerável redução de massa já

na etapa de estampagem, dos 13,30 g reduzidos no total, 5,74 g deslocou na limpeza posterior à estampagem. Ainda é possível perceber a tendência de redução de massa mais acentuada conforme aumenta a temperatura no forno, na etapa de estampagem, aproximadamente 50% da redução nessa etapa ocorreu na temperatura de 1050°C em ambos materiais, já para a etapa de corrosão essa consideração não é válida.

A Figura 11 mostra o percentual de redução de massa para os dois materiais. A redução no 22MnB5 não revestido alcança 4,4% com 2,5% para amostras estampadas e 1,9% para amostras corroídas, o percentual obtido pelo material aluminizado foi 1,5% com 0,5% para amostras estampadas e 1,0% para amostras corroídas. As análises de redução de



**Figura 11.** Percentual de massa reduzido nas condições estampado e corroído.

massa e visual permitem afirmar que a porção reduzida do material revestido com Al-Si foi apenas do revestimento, não atingindo o substrato. Por outro lado, as amostras não revestidas sofrem, evidentemente, redução de massa do material base.

#### 4 Conclusões

O processamento dos aços de alta resistência ao boro estampados a quente resulta em componentes bastante funcionais, notadamente, pela transformação martensítica que confere a esses materiais elevadas características mecânicas. Entretanto, a exposição da superfície aquecida das peças ao ar atmosférico confere especial complexidade ao processo. Nesse contexto, a análise da adição do revestimento de alumínio-silício no substrato 22MnB5 permite concluir que:

- As camadas intermetálicas formadas pelo alumínio do revestimento e o ferro difundido do substrato não resultaram em aumento de rugosidade em nenhuma das temperaturas de aquecimento testadas. Quando as amostras aluminizadas foram aquecidas a 850°C e 950°C a rugosidade (Ra) foi inferior em até 30% àquela encontrada no material não revestido. Na temperatura de aquecimento de 1050°C a diferença diminuiu, pois a porção de óxido que deslaca do substrato é maior;
- O perfil de microdureza na secção dos materiais estampados permite avaliar um aumento dessa

propriedade com a adição do revestimento de Al-Si. Há acréscimo modesto, 38 HV, em média, dos valores medidos nas amostras revestidas;

- As amostras que foram expostas ao ciclo de corrosão da norma D17 2028 apresentaram microdureza menor, demonstrando certa fragilização na proximidade da superfície do material. No entanto a queda não foi acentuada, 18 HV para o 22MnB5 revestido e 6 HV para aquele sem revestimento;
- A análise visual das amostras expostas ao ciclo de corrosão mostrou uma diferença considerável entre os dois materiais. Inicialmente a corrosão vermelha, comumente associada à estampagem a quente, não ocorreu em nenhum corpo-de-prova. Ao final do primeiro ciclo de 1440 minutos algumas peças sem revestimento demonstraram o início desse processo corrosivo, após o segundo ciclo mostraram-se completamente afetadas por esse tipo de corrosão. As amostras revestidas mostraram alguns pontos, porém, visivelmente, atingindo apenas o revestimento;
- A medição de perda de massa permitiu elucidar o maior alastramento da corrosão nas amostras não revestidas de 22MnB5, nas quais a redução foi 4,4% enquanto no material revestido foi 1,5%. A maior parte da porção de massa reduzida dos corpos-de-prova não revestidos, 2,5%, ocorreu após a estampagem, ou seja, antes da exposição ao ciclo de corrosão, no material revestido esse número foi de apenas 0,5%.

#### Referências

- 1 Li N, Sun C, Mohamed M, Lin J, Matsumoto T, Liu C. Experimental investigation of boron steel at hot stamping conditions. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;228:2-10.
- 2 Gorni AA. Novas tendências no processo de estampagem a quente. *Revista Corte e Conformação*. 2010:62-77.
- 3 Naderi M. Hot stamping of ultra high strength steels. Aachen: Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik; 2007.
- 4 Borsetto F, Ghiotti A, Bruschi S. Investigation of the high strength steel Al-Si coating during hot stamping operations. *Key Engineering Materials*. 2009;410:289-296.
- 5 Fan D, De Cooman B. State-of-the-knowledge on coating systems for hot stamped parts. *Steel Research International*. 2012;83:412-433.

- 6 LeBozec N, Blandin N, Thierry D. Accelerated corrosion tests in the automotive industry: a comparison of the performance towards cosmetic corrosion. *Materials and Corrosion*. 2008;59:889-894.
- 7 Drillet P. Study of cracks propagation inside the steel on press hardened steel zinc-based coatings. In: *Proceedings of the Galvatech 2011 8th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet*; 2011; Geneva. Milano: Mailand Associazione Italiana di Metallurgia; 2011. p. 21-25.
- 8 Uda K, Azushima A, Yanagida A. Development of new lubricants for hot stamping of Al-coated 22MnB5 steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;228:112-116.
- 9 Gracia-Escosa E, García I, de Damborenea JJ, Conde A. Friction and wear behavior of tool steels sliding against 22MnB5 steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2017;6(3):241-250.
- 10 Naderi M, Durrenberger L, Moinari A, Bleck W. Constitutive relationships for 22MnB5 boron steel deformed isothermally at high temperatures. *Journal of Materials Science and Engineering A*. 2008;478(1-2):130-139.
- 11 Zapata G. Estudo da decomposição da austenita na estampagem a quente de aços endurecíveis ao boro para obtenção de produtos com propriedades mecânicas customizadas [dissertação]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2017.
- 12 George R, Bardelcik A, Worswick M. Hot forming of boron steels using heated and cooled tooling for tailored properties. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2012;212(11):2386-2399.
- 13 Lisboa CP. Avaliação da estampagem a quente do aço USIBOR® 1500 utilizando estratégia de refrigeração diferencial para obtenção de peças com propriedades tailored [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2019.
- 14 Cardoso A, Miranda F, Fernandes T, Cerqueira F, Reitz F. Desenvolvimento de aços para estampagem a quente (USIBOR®1500) na ArcelorMittal Vega. In: *Anais do 71º Congresso Anual*; 2016; Rio de Janeiro, RJ, Brasil. São Paulo: ABM; 2016.
- 15 Allély C, Dosdat L, Clauzeau O, Ogle K, Volovitch P. Anticorrosion mechanisms of aluminized steel for hot stamping. *Surface and Coatings Technology*. 2014;238:188-196.
- 16 Suehiro M, Kusumi K, Miyakoshi T, Maki J, Ohgami M. Properties of aluminum-coated steels for hot-forming. Tokyo: Nippon Steel; 2003. (Nippon Steel Technical Report; no. 88).

Recebido em: 10 Fev. 2020

Aceito em: 23 Jun. 2020