

EFEITO DE REVESTIMENTOS GALVANIZADOS POR IMERSÃO A QUENTE NO COEFICIENTE DE ATRITO DE UM AÇO BIFÁSICO DESTINADO À INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Claudeir Carvalho Silveira ¹
Carlos Augusto Silva de Oliveira ²
Jose Francisco da Silva Filho ¹
Cássio Aurélio Suski ³
Nilceu Novicki ³

Resumo

A necessidade de redução de peso na indústria automobilística e aumento da resistência à corrosão dos automóveis obrigaram as indústrias siderúrgicas a produzirem aços galvanizados de alta resistência. Entretanto, quando submetidos a processos de estampagem podem sofrer desgastes da superfície galvanizada, formação de pós e redução da resistência à corrosão. O trabalho avaliou o efeito dos revestimentos com Zn-Puro (GI) e com Zn-Fe (GA) no coeficiente de atrito de um aço bifásico (DP600) utilizando tribômetro de ferramenta plana e caracterização do revestimento por microscopia ótica, eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva. Nos resultados, observa-se que os revestimentos estudados influenciam diretamente no comportamento do atrito da estampagem. Para o DPGI, observa-se menor coeficiente de atrito se comparado ao DPGA, em função de sua microestrutura composta de zinco puro (fase η) e maior susceptibilidade ao fenômeno de desgaste por abrasão denominado stick slip. Mesmo com as diferenças observadas, verificam-se condições favoráveis de uso de ambos os materiais em processos de estampagem e pintura.

Palavras-chave: Aços dual phase; Galvanizing (GI); Galvannealed (GA); Desgaste.

EFFECT OF HOT DIP GALVANIZED COATINGS AT COEFFICIENT OF FRICTION OF DUAL PHASE STEEL SUPPLIED FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Abstract

The need for weight reduction in the automotive industry, developing better design and improve corrosion resistance of the automotive vehicles has forced the steel industry to produce high-strength galvanized steel. However, when subjected to stamping process can suffer wear of the galvanizing surface, powdering and reduced corrosion resistance. The study evaluated the effect of coatings with Zn-Pure (GI) and Zn-Fe (GA) in the coefficient of friction of biphasic steel (DP600) using flat tribometer and characterization process of the coating by optical microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy. As a result, the coatings studied influence directly the behavior of the friction of stamping. For DPGI, is observed lower coefficient of friction if compared to DPGA, due of his microstructure composed of zinc pure (η phase). This microstructure can increase the susceptibility to abrasion phenomenon called stick slip. Despite the observed differences, there are favorable conditions for use of both materials in stamping processes and painting

Keywords: Dual phase steel; Galvanizing (GI); Galvannealed (GA), Wear.

I INTRODUÇÃO

A partir da década de 70 grandes esforços foram realizados para o desenvolvimento de aços galvanizados de alta resistência que propiciassem a redução de peso das carrocerias de automóveis, redução no consumo de

combustível e proteção contra corrosão. Assim, diante do aumento necessário da resistência dos aços e do atendimento a design mais arrojados, observaram-se grandes desafios para o entendimento do comportamento dos revestimentos

¹ ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil. E-mail: claudivr.silveira@arcelormittal.com.br

² Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

³ Departamento de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC, Itajaí, SC, Brasil.

utilizados nos processos de estampagem. Alguns dos principais revestimentos utilizados em aços bifásicos aplicados na indústria automotiva são o Zinco-Puro (Galvanizing-GI) e Ligas Zinco-Ferro (Galvannealed-GA) [1].

A partir da necessidade do uso dos aços galvanizados de alta resistência e da importância do entendimento dos efeitos dos revestimentos na estampagem, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação do efeito dos revestimentos zinco-puro (GI) e zinco-ferro (GA) aplicados em um aço Bifásico, destinado à indústria automotiva no coeficiente de atrito. Além dos ensaios de atrito, foram utilizados ensaios de dureza e rugosidade para a caracterização da evolução do desgaste do revestimento diante da atuação do tribômetro de matriz plana. O revestimento foi caracterizado utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura com Micro-Análise química EDS.

Aços Bifásicos Galvanizados são uma classe de aços de alta resistência e baixa liga caracterizada por uma microestrutura consistindo de uma matriz ferrítica com aproximadamente 10% a 20% de martensita. Estes aços têm como características mecânicas a ausência de patamar de escoamento, baixo limite de escoamento a 0,2%, alta taxa de encruamento, alto limite de resistência, alto alongamento uniforme e total, e efeito Bake Hardening. Devido a sua alta taxa de encruamento combinada ao alto alongamento uniforme, estes aços conferem a conformabilidade desejada para aplicações automotivas tais como peças estruturais, além de apresentarem boa resistência à corrosão [2,3].

As características dos revestimentos dependem da presença e distribuição das ligas intermetálicas ferro/zinco. O processo de galvanização pode ser entendido pelo diagrama de Zn-Fe proposto por Kubaschewski [4] e Marder [5]. No caso do GI, observa-se revestimento composto de uma camada intermetálica (Fe_2Al_5) e da fase eta (η). Após o banho de zinco, na torre resfriamento, ocorre a completa solidificação do revestimento. O GA é produzido a partir da exposição do revestimento zinco puro a um tratamento térmico após o banho de zinco formando microestrutura geralmente composta de fase gama (Γ), fase delta (δ) e fase zeta (ζ). Dessa forma, o controle dessas fases duras e frágeis torna-se essencial para manutenção da aderência do revestimento e sucesso do processo de estampagem dos aços de alta resistência [6].

A distribuição das fases intermetálicas e a microestrutura final do GA é uma função do tratamento térmico do revestimento. A partir da modificação da temperatura de tratamento térmico do revestimento é possível obter três tipos característicos de revestimentos com liga de Fe-Zn, são eles: com grande quantidade da fase zeta (ζ) onde são utilizadas temperaturas menores que 500°C, com pouquíssimas quantidades de fase zeta (ζ) produzidas com temperaturas superiores a 500°C e revestimentos com quantidades intermediárias de fase zeta (ζ) e delta (δ), que podem ser obtidas por uma combinação de fatores de processo de galvanização [7].

No revestimento com grandes quantidades de fase zeta (ζ), observa-se microestrutura característica

de cristais em forma de hastes, que apresentam nos processos de estampagem boa resistência à formação de pós (Powdering), mas ocorre o aumento do coeficiente de atrito. Nos revestimentos com baixas porcentagens de fase zeta (ζ), não são observados mais cristais em forma de hastes e sim uma morfologia de poucos e pequenos cristais.

Conforme Matuszak [8], do ponto de vista tribológico, os revestimentos galvanizados influenciam diretamente na estampabilidade dos aços alterando o comportamento de fricção das superfícies. Em estudos de avaliação do coeficiente de atrito utilizando ensaios de desgaste com ferramentas planas, verificou-se a existência de diferentes comportamentos do atrito e geração de Powdering em função das fases presentes no revestimento GA. Revestimentos com maiores porcentagens de fase zeta (ζ) na superfície possuem maiores coeficientes de atrito quando comparados com revestimentos com reduzidas porcentagens. Entretanto, a redução do coeficiente de atrito ocasiona o aumento do teor de ferro no revestimento, o que resulta no aumento da perda de massa e geração de pós [9].

2 METODOLOGIA

Os aços Bifásicos DPGI e DPGA estudados foram produzidos pela ArcelorMittal Vega contendo na composição química os seguintes teores: carbono (0,08-0,20%), manganês (1,50-2,00%), cromo (0,20-0,50%) e Si (Max 0,40%). Outros elementos tais como molibdênio, titânio e boro também foram observados. O processo de laminação a frio foi realizado objetivando reduções entre 65 e 68% visando uma espessura final de produto acabado de 1,50 mm para a bobina sem recozimento (Full Hard). Na linha de galvanização os materiais foram processados obtendo gramaturas de revestimento de zinco entre 50 a 60 g/m². No banho de zinco foram utilizados teores de Al entre 0,15 a 0,30% para a produção do DPGI e entre 0,11 e 0,15% para produção do DPGA. A Tabela 1 mostra os resultados de propriedades mecânicas do material utilizado no experimento.

Estes aços serão referidos daqui em diante como DPGI e DPGA, respectivamente.

2.1 Microestrutural e Tribologica

A avaliação da microestrutura do aço base para identificar as fases presentes foi realizada em Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL de Modelo JSM 6360). As amostras foram cortadas no sentido de laminação, embutidas, lixadas utilizando lixa de granulometria 120, 320, 800 e 1200 mesh e polidas com pasta de diamante tipo JP4 (3-6 μ m) e JP1/4 (0-1/2 μ m). Posteriormente, estas amostras foram atacadas com solução de Lepera (Solução aquosa de 1% de metabissulfito de sódio- $Na_2S_2O_5$ misturada com uma solução de Picral 4%, na proporção de 1:1)) para revelar as fases presentes e os contornos de grão. O revestimento foi avaliado com relação à formação da camada intermetálica, composição química e microestrutura.

Para caracterização das amostras foram utilizados os mesmos procedimentos indicados acima para o aço base. A avaliação da microestrutura e composição química dos revestimentos foi realizada utilizando Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL, Modelo JSM 6360) com Micro-Análise Química (EDS). Foram obtidas imagens referentes às microestruturas de superfície e seção transversal do revestimento.

A caracterização do revestimento através de dureza foi utilizada para avaliar a evolução do revestimento após ensaio tribológico. Foi utilizado um microdurômetro Vickers, marca SHIMADZU (mod. HMV), com carga de 2,94 N por um tempo mínimo igual a 10 segundos e indentador de base piramidal. As medições foram realizadas nos materiais DPGI, DPGA considerando áreas de baixo (BR) e alto relevo (AR) identificadas visualmente através de microscópio eletrônico de varredura. Áreas de alto relevo foram consideradas como áreas visivelmente submetidas ao laminador de encruamento da linha de galvanização. O principal objetivo foi verificar a influência do laminador de encruamento na Dureza destas áreas (alto e baixo relevo). O ensaio foi realizado seguindo a norma (ASTM A370-12a). Cada valor apresentado é o resultado da média entre cinco endentações. A Figura 1 mostra as regiões da superfície onde foram realizadas as medições de Dureza.

2.2 Caracterização Tribológica

O coeficiente de atrito cinético para os dois revestimentos foi determinado utilizando tribômetro de marca QUIRI com célula de carga de 10.000 N, curso máximo de 150 mm. Foi utilizada matriz plana de carbeto

de tungstênio de área de contato de 100 mm² (10x10 mm). Inicialmente os corpos de prova de 35 mm (cortados no sentido transversal ao de laminação) por 400 mm e as ferramentas de atrito do tribômetro foram limpos por ultrassom e solução de solvente Haku 1025 ASR e spray de éter de petróleo. O procedimento consistiu em tracionar uma das extremidades da chapa enquanto blocos idênticos são simetricamente postos nas duas faces da chapa. Um bloco é fixo enquanto o outro possui força controlada. Os corpos de prova foram lubrificados com óleo de estampagem de marca Quaker 6130 e submetidos a níveis de aperto crescentes de 0,30 a 80 MPa. O ensaio foi realizado a velocidade constante de deslizamento de 0,10 m/min e a temperatura ambiente. A Figura 2 mostra esquematicamente o ensaio de coeficiente de atrito realizado.

O Coeficiente de Atrito Cinético, μ , foi definido a partir da obtenção das medidas das forças de aperto (F_A) e tração (F_T). O cálculo (Equação 1) foi realizado como indicado abaixo:

$$\mu = \frac{F_T}{2F_A} \quad (1)$$

Onde: F_T é a Força de Tração (MPa) e F_A a força de aperto (MPa).

2.3 Caracterização da Evolução do Revestimento

Objetivando avaliar a evolução do desgaste da superfície galvanizada ao longo do curso percorrido pelo tribômetro, as amostras submetidas à avaliação do coeficiente de atrito

Tabela 1. Resultados de propriedades mecânicas dos aços DPGI e DPGA

Amostra	Direção do Ensaio	LE (MPa)	LR (MPa)	Al (80) %	Valor "r ₉₀ "	Valor "n ₉₀ "
DPGI	Longitudinal	382	653	26	0,89	0,184
DPGA	Longitudinal	392	626	26	0,84	0,147
Norma ASTM A1079 – 12		> 340	> 590	> 21	-	> 0,14

Onde: Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência (LR), Alongamento (Al), Anisotropia (r₉₀) e Coeficiente de Encruamento (n₉₀).

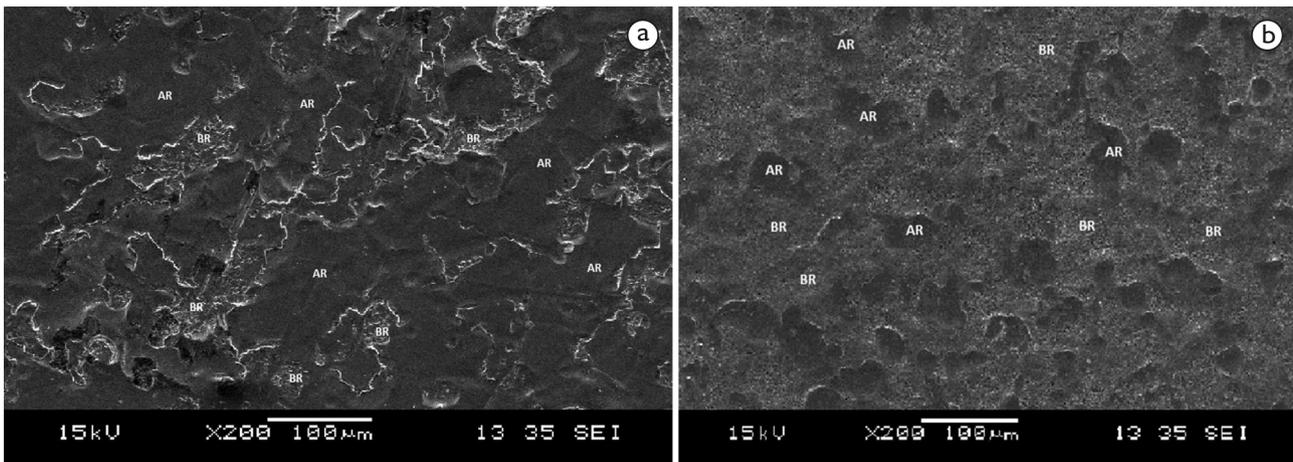


Figura 1. Identificação das áreas de baixo (BR) e alto relevo (AR) avaliadas na medição de Dureza (HV).

foram caracterizadas utilizando microscopia ótica, dureza, rugosidade e densidade de picos. A amostra foi dividida em oito regiões, sendo a região 0, material como recebido, e sete áreas ao longo da área percorrida pelo tribômetro.

A Figura 3 mostra o esquema dos locais avaliados para analisar as alterações microestruturais do revestimento. Para avaliação da evolução microestrutural da superfície galvanizada foi utilizado Microscópio Ótico (modelo Zeiss-A1m) com software analisador de imagens (modelo Axio Vision). Antes da realização das análises de rugosidade das superfícies, as amostras foram limpas com álcool etílico 95 GL. Na medição foi utilizado o Rugosímetro Taylor Hobson, de modelo Talysurf 50, Cut-Off de 2,5 mm e norma SEP 1940. Para caracterização da evolução da dureza da superfície do revestimento foi utilizado microdurômetro Vickers de marca SHIMADZU – mod. HMV com carga 0,98 N (HV-0,01) para o DPGI e DPGA. Foi usado tempo igual à 10 segundos de indentação.

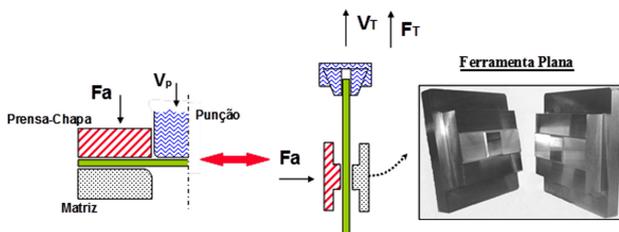


Figura 2. Esquema de realização do ensaio de Coeficiente de atrito.

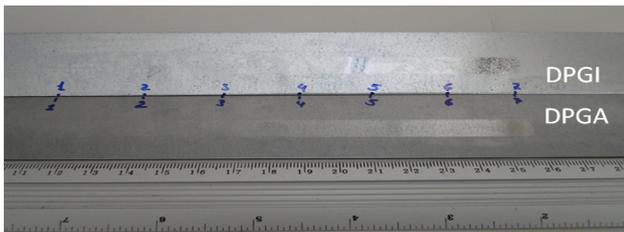


Figura 3. Esquema dos locais de avaliação da evolução Microestrutural do revestimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No DPGI e DPGA a microestrutura ferrita-martensita é obtida através de um recozimento intercrítico ($820 \pm 20^\circ\text{C}$) seguido de resfriamento até a temperatura de 460°C (temperatura do pote de zinco). No caso do DPGA, em particular, deve ocorrer a formação da bainita com a utilização do tratamento térmico do revestimento. Apesar de não ter sido observada a bainita neste trabalho, pode-se dizer que devido à utilização da temperatura de tratamento térmico do revestimento superiores a $>500^\circ\text{C}$ para a produção DPGA, sugere-se afirmar a sua presença. Com relação à temperatura do pote de zinco, neste caso de 460°C , não influencia na formação de bainita devido a estar geralmente abaixo da temperatura de formação da bainita para os aços bifásicos.

Na Figura 4 são apresentadas as microestruturas do DPGI e DPGA na condição inicial, obtidas por microscopia eletrônica de varredura. Em ambas as microestruturas é possível verificar a matriz constituída de ferrita (cor cinza escuro) e presença de martensita, em cinza claro.

Aspectos relacionados à formação do revestimento metálico influenciam diretamente no coeficiente de atrito do material, no desempenho dos processos de estampagem e na resistência a corrosão. No processo de galvanização com zinco puro são adicionados ao banho de zinco quantidades alumínio entre 0,15% e 0,30% que são utilizadas para auxiliar na formação de uma camada intermetálica entre o aço base e o revestimento.

Assim a formação da camada intermetálica e do revestimento são importantes para o sucesso do processo de estampagem e da qualidade das peças estampadas [9]. Para o DPGI foi encontrada a espessura média de camada intermetálica de $0,34 \mu\text{m}$ na face superior e $0,35 \mu\text{m}$ na face inferior. Foi observada ao longo da superfície e da seção do revestimento, composição química de 100% de zinco, ou seja, predominância da fase eta (η). Também foi observada

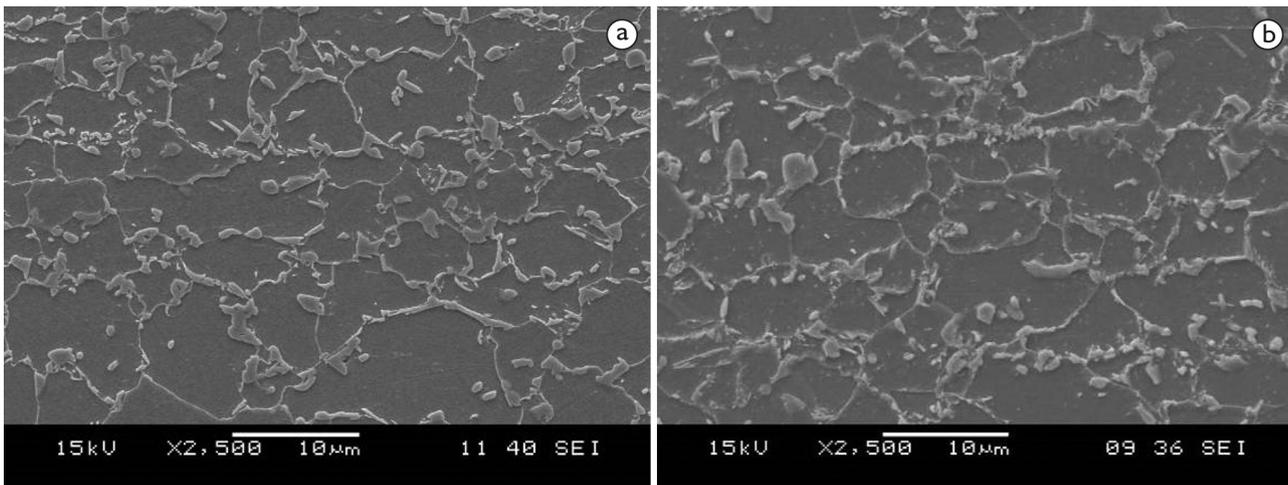


Figura 4. Microestrutura de superfície (a) DPGI (b) DPGA obtida por microscopia eletrônica de varredura.

uma camada intermetálica formada entre o aço base e o revestimento com composição Fe_2Al_5 .

No caso do DPGA, foi avaliada a espessura da fase Gama (Γ) que é a primeira fase que se forma após o aço base. A espessura média da fase Gama (Γ) na face superior foi de $0,73 \mu m$ e de $0,81 \mu m$ na face inferior. Na seção do DPGA foram verificados teores de alumínio entre 0,38% a 0,72%, quantidades de ferro entre 10% e 11% e teores de zinco entre 87% e 89% para os pontos avaliados. No caso da superfície, foram avaliados 8 pontos onde foram verificados teores de alumínio (0,40-0,70%), ferro (10-11%) e Zinco (87-89%). O revestimento possuía quantidades de fase zeta (ζ) inferiores a 1,0%. Na Figura 5 são apresentadas para o aço DPGA, as microestruturas de superfície e seção do revestimento, obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A Figura 6 mostra os resultados de dureza do revestimento obtidas para o DPGI e DPGA e considerando áreas de baixo (BR) e alto relevo (AR).

Para o DPGI, de composição química de aproximadamente 99% de zinco e composto basicamente de fase eta (η), não foi observada diferença significativa de dureza entre as áreas de baixo e alto relevo. A diferença foi de apenas 1 HV. No DPGA, entretanto, observou-se comportamento diferente se comparado ao DPGI entre as áreas de baixo e alto relevo. Foi verificado aumento médio de 217 HV.

O aumento significativo da dureza entre a área de baixo relevo e de alto relevo do DPGA, está associado a duas características, uma morfológica do revestimento e outra de processo. A primeira é quanto à morfologia da superfície do revestimento que se apresenta em forma de cristais de fase δ com elevada dureza. A segunda ocorre com a utilização do laminador de encruamento que, além de proporcionar o nivelamento da superfície do revestimento provoca maior encruamento localizado nos locais denominados como alto relevo (AR), indicando esta diferença.

Foi observado também que Marder [5], possivelmente utilizou cargas inferiores a 2,94N para a realização dos ensaios de dureza em revestimento GI. Isso poderia explicar as diferenças entre os valores medidos e o da literatura.

Para caracterização tribológica do DPGI e DPGA foram realizados ensaios de coeficiente de atrito e a caracterização das alterações do revestimento ao longo da superfície de contato de 150 mm realizado pelo trajeto do tribômetro durante o ensaio. Na Figura 7 é mostrado o comportamento tribológico do DPGI e DPGA quando submetidos ao aumento de pressão em tribômetro de matriz plana e sua correlação com as microestruturas obtidas por microscopia ótica. Para o DPGI verifica-se que de 0 a 3 MPa não existe variação de coeficiente de atrito devido ao fechamento do ferramental e preparação para início do ensaio. À medida que ocorre o aumento da pressão de contato (entre 3 e 10 MPa) ocorre variações do coeficiente de atrito. Esta variação ocorre devido a utilização de sensor com força máxima igual a 1000 daN (1 daN = 1,02kgf = 10 N), ou seja, com baixas pressões. As baixas pressões normais às forças de tração podem variar entre 1 e 30 daN e o coeficiente de atrito entre 0,11 e 0,18. Com pressões de contato entre 10 e 45 MPa, é observado uma pequena variação, com um coeficiente de atrito médio de 0,133. A partir de pressões de contato acima de 45 MPa foi observado o fenômeno *Stick Slip*.

No caso do coeficiente de atrito do DPGA observa-se as mesmas variações que para o DPGI (de 0 a 10 MPa), início de ensaio. Com pressões de contato entre 10 e 37 MPa observa-se aumento crescente dos valores de coeficiente de atrito com o aumento da pressão de contato. A partir da pressão de contato de 38 MPa os valores o coeficiente de atrito tende a estabilizar permanecendo constante até o término do ensaio. Neste caso, o coeficiente de atrito médio foi de 0,155. Para o DPGA não foi observado o fenômeno *Slip Stick*. Com relação à evolução da superfície galvanizada observa-se aumento das áreas deterioradas com o aumento da pressão de contato do tribômetro de ferramenta plana.

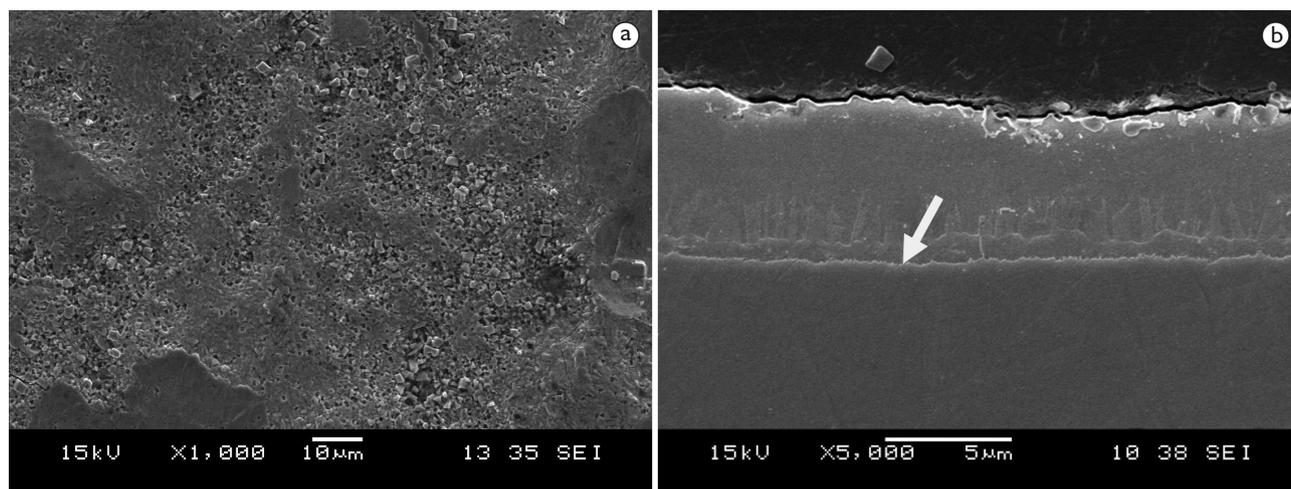


Figura 5. Microestruturas da superfície (a) e (b) e seção dos materiais DPGA obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A seta branca indica a fase Gama homogênea ao longo da seção do aço base.

O desgaste é mais evidente no DPGI onde o revestimento é composto basicamente de zinco puro. No DPGA ocorre também o desgaste, mas em menor nível se comparado ao DPGI em função das fases intermetálicas que compõem este revestimento.

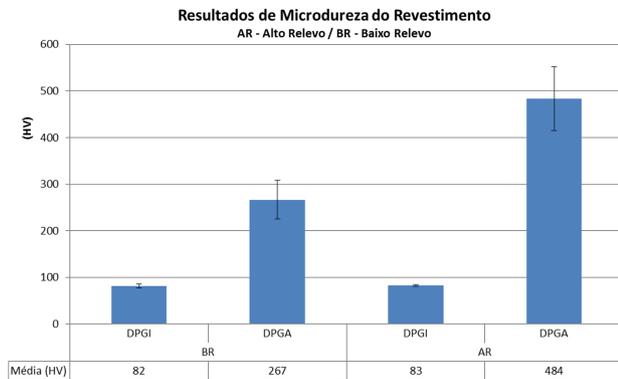


Figura 6. Resultados de Dureza para o DPGI e DPGA para as áreas de alta (AR) e Baixa (BR) Relevô.

Na Figura 8 é possível verificar os resultados da evolução da Rugosidade e Densidade de Picos da superfície do revestimento ao longo do trajeto percorrido pelo tribômetro. Verificou-se que para o DPGI ocorreu redução, tanto da rugosidade quanto de densidade de picos ao longo do trajeto do tribômetro sendo mais evidente a partir da área 3, ou seja, a partir de 28 MPa de pressão de contato. Para o DPGA, também se observou comportamento de redução nos valores de rugosidade e densidade de picos, porém em menor escala se comparado ao DPGI até a área 3 (28 MPa). Porém, com pressões de contato maiores que 28 MPa foi observado estabilidade nos resultados de rugosidade e densidade de picos.

A Figura 9 mostra os resultados da relação entre a dureza na região de contato do tribômetro e o coeficiente de atrito do DPGI e DPGA. Inicialmente, não são observadas variações de dureza para o DPGI ao longo das áreas submetidas ao tribômetro, porém, ocorre à elevação do coeficiente de atrito com o aumento de pressão de contato do tribômetro. Apesar de não ser identificadas elevações na dureza do DPGI, verifica-se incremento do coeficiente de

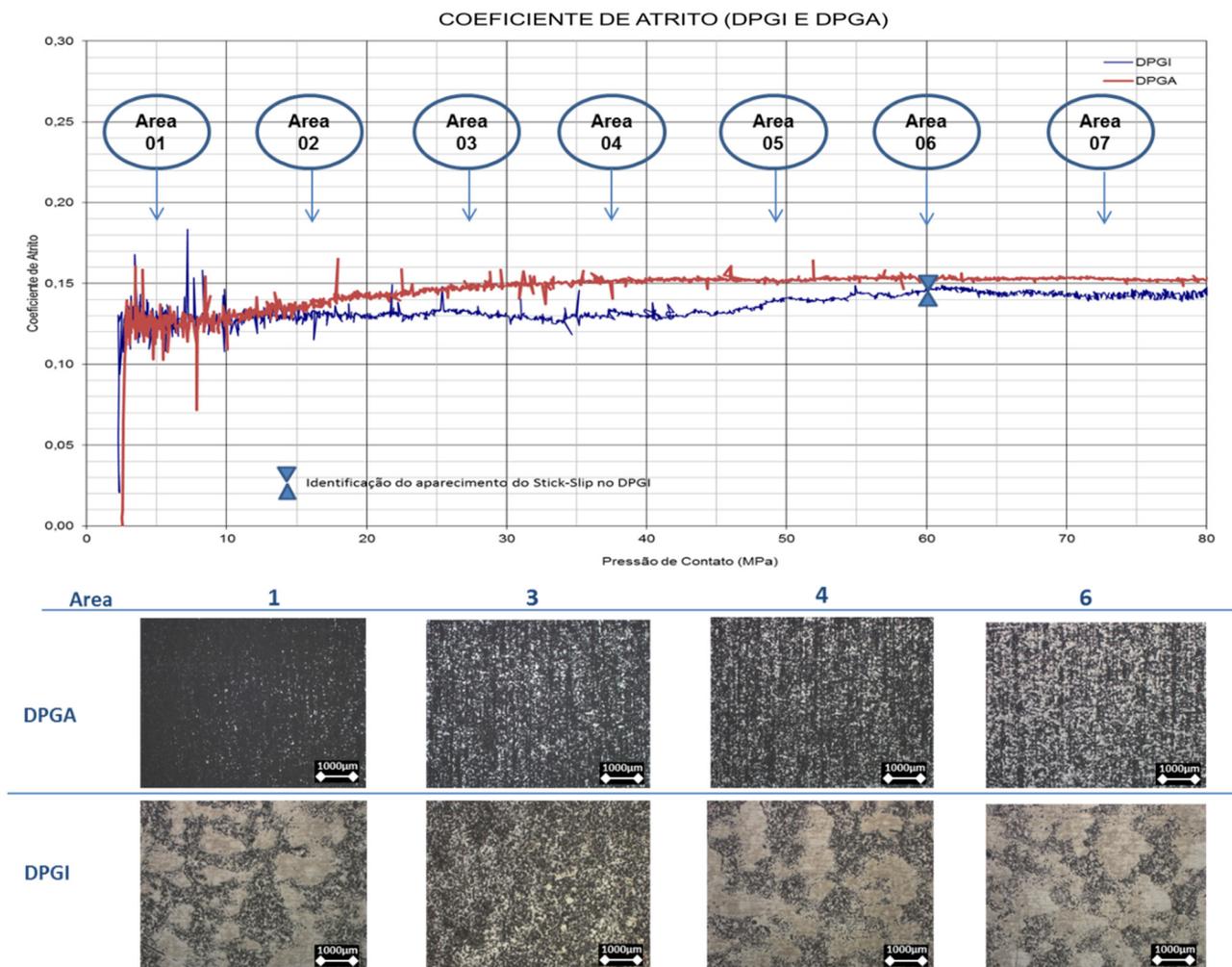


Figura 7. Variação do comportamento de coeficiente de atrito para o DP-GI (a) e DPGA (b) com o aumento da pressão de contato do prensa chapas e correlação com o aspecto superficial obtido por microscopia ótica.

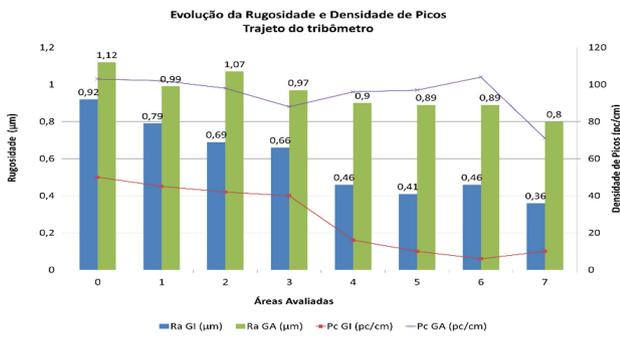


Figura 8. Evolução da rugosidade e densidade de picos da superfície do revestimento após ensaio de atrito.

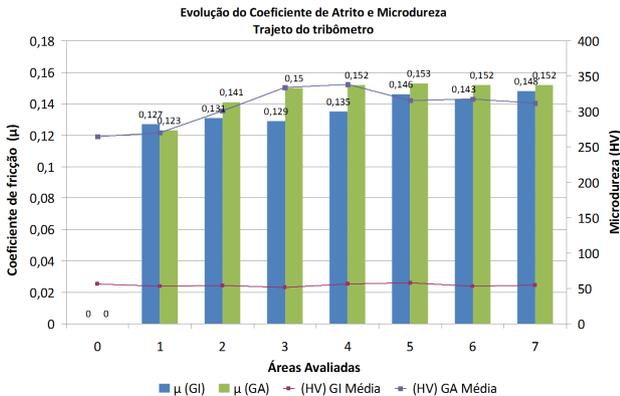


Figura 9. Evolução do coeficiente de atrito e da dureza do revestimento após ensaio de atrito.

atrito ocorrendo desgaste por abrasão, conforme verificado na Figura 9. O comportamento pode ser explicado pela microestrutura macia do revestimento composta basicamente de zinco-puro ou fase eta (η).

REFERÊNCIAS

- 1 Esling LC, Wegria J. Cracking in zinc layers on continuous galvanized sheets: a review. *Textures and Microstructures*. 1995;23:131-147.
- 2 Speich GR. *Physical metallurgy of dual phase steels*. Monroeville: United States Steel Corporation; 1981.
- 3 Bhattacharya D. Developments in advanced high strength steels. In: *Inner Conference*; 2006. Indiana: Research and Development Center; 2006.
- 4 Kubaschewski O, Massalski T. *Binary alloy phase diagrams: metals park*. Ohio: ASM; 1986. p. 1128.
- 5 Marder AR. *Microstructural characterization of zinc coatings*. Zinc Based Steel Coating Systems. 1990.
- 6 Kanamura T, Nakayama M. *Alloying Reaction Control in Production of Galvanized Steel*. Materials Science Research International. 1995;1(3):150-156.
- 7 Maigne JM. Key mechanisms in galvanization of steel sheets. In: *7th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet - Galvatech'07*; 2007. Japan; 2007. v. 333-338.
- 8 Matuszak A. Factors influencing friction in steel sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;106(1-3):250-253. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00625-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00625-7).
- 9 Garza LG, Van Tyne CJ. Friction and formability of galvanized interstitial free sheet steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;187-188:164-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.062>.

Recebido em: 30 Ago. 2014

Aceito em: 12 Jul. 2015

No caso do DPGA, verifica-se o aumento dos valores de dureza do revestimento, sendo observada estabilização dos valores a partir da área 4, ou seja, a partir de uma pressão de contato do tribômetro de 50 MPa. Neste caso observa-se menor desgaste visual se comparado ao DPGI. O fenômeno pode ser explicado primeiro pela característica do revestimento Zn-Fe e das fases intermetálicas observadas na superfície deste revestimento. Neste caso, a fase delta (δ). A segunda explicação do aumento da dureza pode ser pelo encruamento superficial do revestimento diante do aumento da pressão de contato do tribômetro.

5 CONCLUSÃO

- Os revestimentos Zn-puro e com Zn-Ferro influenciam diretamente no comportamento do atrito entre a superfície do aço galvanizado e a matriz de estampagem. Essa constatação foi evidenciada através da avaliação das microestruturas de revestimento e do comportamento do atrito utilizando tribômetro de ferramenta plana. No caso do DPGI, observa-se menor coeficiente de atrito se comparado ao DPGA, em função da microestrutura composta de zinco puro (fase η). Observa-se também para este material, maior susceptibilidade ao fenômeno de desgaste por abrasão denominado *stick slip*;
- Apesar das diferenças observadas entre o DPGI o DPGA, observa-se condições favoráveis para a utilização de ambos os materiais em processos de estampagem e pintura. Isso se dá em virtude da tecnologia dos processos de confecção de ferramentas de estampagem e linhas de pintura utilizadas atualmente.