

## EFFECTO DE LA DEFORMACION POR TRACCION UNIAXIAL SOBRE LA FISURACIÓN Y RUGOSIDAD DE RECUBRIMIENTOS GALVANNEAL

Baldino, Guido A.<sup>a</sup>; Ortiz, Gonzalo E.<sup>a,b</sup>; Elsner, Cecilia I.<sup>c</sup>; Seré, Pablo R.<sup>c</sup>; Culcasi, J. Daniel<sup>d</sup>

(a) Ingeniero de Proceso - Aluar Aluminio Argentino S.A.I.C.

(b) Testing Engineer -Schlumberger Argentina S.A.

(c) CIDEPINT: Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas. (CIC-CONICET. Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata.

(d) LIMF: Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física "Ing. Gregorio Cusminski" Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata.  
e-mail (autor de contacto): jculcasi@ing.unlp.edu.ar

**Palabras clave:** galvanneal, deformación, rugosidad, fisuras.

### 1. Introducción

El "galvanneal" es un recubrimiento de compuestos intermetálicos de hierro y cinc, que se forma cuando una chapa de acero galvanizado es sometida a un recocido, permitiendo que, por difusión, el hierro del sustrato de acero forme una aleación con el cinc del recubrimiento. El resultado es un recubrimiento formado por capas de compuestos intermetálicos de aproximadamente 90% de cinc y 10% de hierro.

A finales de los años 70's, se empezó a utilizar chapa de acero galvanizado para la carrocería de los automóviles a fin de contrarrestar los efectos de la corrosión [1]. Debido a que la resistencia a la corrosión, la pintabilidad y la factibilidad de realizar soldaduras por puntos (tipo de soldadura de mayor uso en la carrocería de los automóviles), son parámetros importantes en la fabricación y desempeño de la carrocería de un automóvil, el "galvanneal" ha ido ganando terreno en esta industria gracias a que puede fabricarse a bajo costo en líneas de galvanizado continuas. El "galvanneal" actualmente es utilizado en el 70% de los automóviles fabricados en Norte América y en China, y prácticamente en el 100% de los automóviles fabricados en Japón [2].

El "galvanneal" tiene una apariencia mate uniforme, a diferencia del galvanizado, que es de apariencia brillante y se pueden observar los macrogranos de cinc incluso después de ser pintado. A escala microscópica, la superficie del "galvanneal" posee fisuras, lo cual resulta en una buena adhesión entre la pintura y el recubrimiento, permitiendo ser pintado sin necesidad de ningún tratamiento previo. El recubrimiento de "galvanneal" presenta mayor resistencia eléctrica, mayor dureza y mayor punto de fusión respecto al galvanizado, lo que permite obtener una soldadura por punto a menor intensidad de corriente y mayor duración de los electrodos [3].

### 2. Parte experimental

Se utilizaron muestras de galvanneal de origen comercial de calidad automotriz. Las muestras fueron sometidas a deformación uniaxial, utilizando una máquina de ensayos de tracción marca EMIC modelo DL 3000 que desarrolla una carga máxima de 30kN, utilizando probetas de dimensiones 300x40x0,7mm y sometiéndolas a diferentes grados de deformación, para así poder estudiar los efectos ocasionados en el material. Las muestras fueron sometidas a 5%, 10%, 15%, y 20% de deformación. El efecto de la deformación se estudió realizando conteo de fisuras y medición de rugosidad sobre las probetas deformadas y sin deformar.

Para la caracterización del recubrimiento por metalografía las muestras se sometieron a un revelado químico recomendado por Marder [4]. Las muestras después de ser pulidas, se

sumergieron en una solución de 1% de ácido pícrico, 1% de ácido nítrico en alcohol amílico durante 20 segundos, posteriormente sumergidas en alcohol etílico y finalmente en un reactivo con la misma composición que el inicial con agregado de 4 gotas de ácido hidrofúorhídrico durante 10 segundos.

Adicionalmente, se utilizó la técnica “stripping” anódico con el propósito de complementar el análisis metalográfico de la estructura del “galvanneal”, para encontrar fases que no se han podido revelar con el ataque químico en la observación por microscopía electrónica de barrido. Esta técnica electroquímica combina el uso de una solución que ataca selectivamente a fases ricas en Zn y la aplicación de corriente anódica que acelera la disolución de las fases. Como electrolito se utilizó una solución de 0,35M  $ZnSO_4$ + 3,42M NaCl, como electrodo de referencia uno de calomel saturado (ECS) y un alambre de platino de gran área como contra electrodo. El sistema se dejó estabilizar a circuito abierto durante 5 minutos y luego se aplicó una corriente de 7 mA. Las variables de ensayo se definieron según el trabajo realizado por Queiroz y Costa [5]. La observación de las muestras deformadas se realizó a través de un microscopio electrónico de barrido ambiental marca “FEI” modelo “Quanta 200”, equipado con un detector de microanálisis por sonda de electrones marca “EDAX”.

Para evaluar el efecto de la deformación sobre los recubrimientos se realizó un conteo de fisuras. Este estudio se basa en emular las tensiones que producen los procesos industriales de conformado a los que son sometidas las chapas de “galvanneal” comercial para la industria automotriz. Si bien los esfuerzos de tracción no son los únicos que tienen lugar en estos procesos, como una primera aproximación para estudiar el comportamiento del recubrimiento se considera válido. Se clasificaron las fisuras en cuatro tipos distintos: A, B, C y D. Las mismas están ejemplificadas en la Figura 1.

- Tipo A: perpendiculares al recubrimiento.
- Tipo B: decohesión del recubrimiento en la interfaz acero-recubrimiento.
- Tipo C: bifurcadas.
- Tipo D: fisuras paralelas al recubrimiento que no están sobre la.

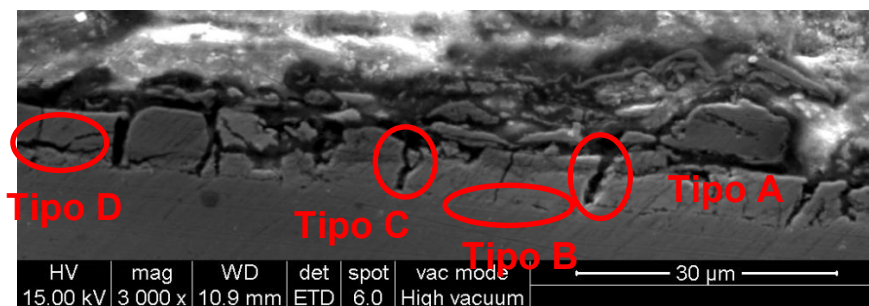


Figura 1. Imagen esquemática de los cuatro tipos de fisuras.

Para cuantificar el efecto de la deformación sobre la rugosidad superficial se utilizó un rugosímetro marca “HommelTester”, modelo “T1000 Basic”. Se determinaron los siguientes parámetros: rugosidad media ( $R_a$ ), altura máxima de pico de rugosidad ( $R_z$ ).

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Análisis metalográfico

La microestructura revelada de la muestra de “galvanneal” sin deformar se presenta en la Figura 2. En ella se puede observar la estructura columnar de la fase  $\delta$ , otras fases presentes en el recubrimiento, no pudieron ser reveladas mediante este procedimiento.

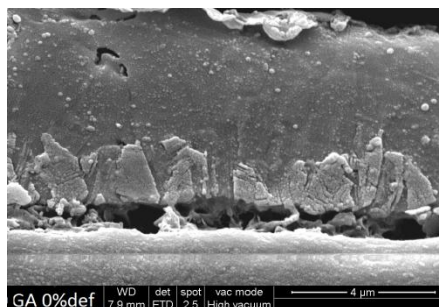


Figura 2. Metalografía de “galvanneal” comercial sin deformar.

Se observa ladecohesión entre el recubrimiento y el sustrato. Esto podría deberse a la diferencia entre la deformabilidad del sustrato y el recubrimiento, asociado a la deformación inhomogénea que produciría el proceso de “skin-pass”.

### 3.2. “Stripping” anódico

La curva E vs. t obtenidas al aplicar el escalón de corriente a la probeta de “galvanneal” comercial no deformada se presenta en la Figura 3. El potencial al que se definen las mesetas es característico de las fases expuestas y la longitud de la misma se vincula con el espesor de cada una de ellas. Tomando como referencia el trabajo de Queiroz y Costa [5] cada zona indicada en el gráfico puede asociarse con una fase del recubrimiento:

- Zona A = Disolución de fase Zeta ( $\zeta$ ).
- Zona B = Disolución de fase delta ( $\delta$ ).
- Zona C = Disolución de fase gamma ( $\Gamma$ ).
- Zona D = Disolución de capa interfacial rica en hierro.
- Zona E = Disolución del acero.

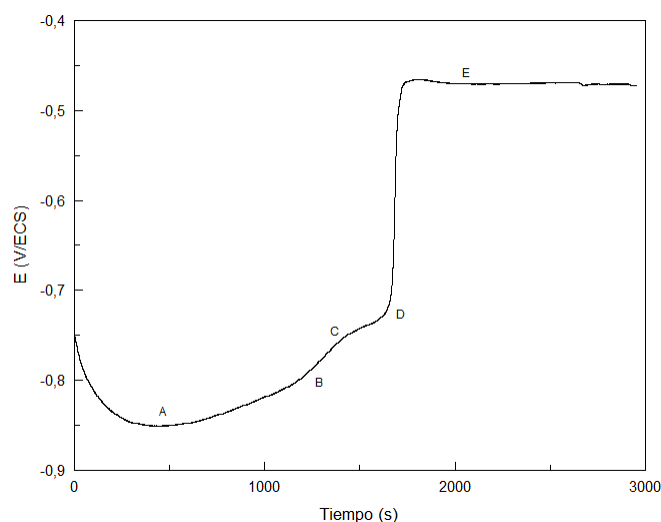


Figura3. Curva potencial (E) vs. tiempo obtenida del ensayo de stripping sobre “galvanneal” sin deformar.

En las zonas A y B se produce la disolución selectiva del cinc, en la zona B se observan los primeros iones  $\text{Fe}^{+3}$  en solución, indicando el comienzo de la disolución de hierro. En la zona C se consume la fase  $\delta$ , incrementándose el contenido de  $\text{Fe}^{+3}$  en la solución y quedando pequeñas cantidades de cinc en el recubrimiento. En la zona D el recubrimiento termina de disolverse y el valor de potencial se estabiliza en E, que corresponde a la disolución del sustrato [5].

Los valores de potencial de corrosión de cada fase se relacionan con cada una de las zonas definidas anteriormente y en la Tabla I se detallan los valores de potencial característicos de cada una de las fases. Los valores hallados coinciden con los encontrados por Queiroz[36].

Tabla I. Potenciales de disolución anódica característicos de las distintas fases detectadas en las muestras de "galvanneal" sin deformar.

Fase	A	B	C	D	E
Potencial	-0,851V	-0,809V	-0,772V	-0,730V	-0,470V

### 3.3. Deformación de probetas

En los ensayos de tracción se observó la presencia de fluencia discontinua. Este fenómeno surge por la interacción de las dislocaciones con solutos intersticiales como el carbono y el nitrógeno. Con el fin de verificar el tipo de acero del material de partida, se procedió a realizar un análisis de composición química por espectrometría de emisión óptica, cuyo resultado se muestra en la Tabla II.

Tabla II. Composición del sustrato.

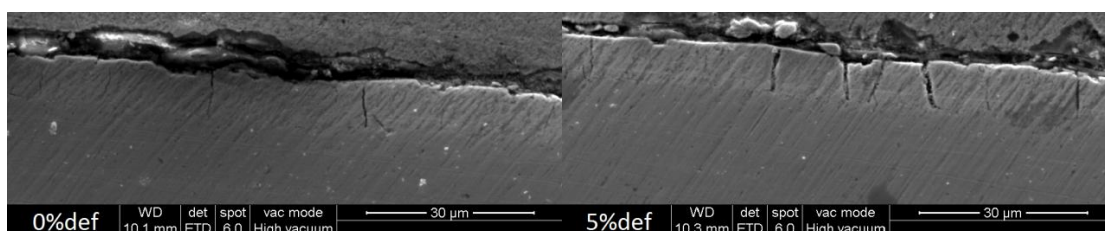
Composición química (%m)								
C	Al	Si	Mn	P	S	Ti	V	Nb
0,014	0,041	0,005	0,239	0,024	0,010	<0,001	<0,002	0,026

### 3.4. Caracterización y cuantificación de fisuras

Los resultados indicaron que es apreciable el efecto que produce la deformación por tracción sobre la formación de fisuras, en cantidad y morfología. Es clara la tendencia del incremento en la cantidad de fisuras tipo A, con el aumento en el grado de deformación. Mientras que las tipo B, C y D comienzan a crecer en número por encima del 10% de deformación. Sin embargo, se observó una particularidad en el recubrimiento con 15% de deformación, ya que el grado de fisuración fue menor que la muestra deformada 10%.

En las Figura 4 se presentan imágenes del corte transversal del recubrimiento para cada grado de deformación.

Para el análisis de la influencia del grado de deformación a nivel superficial se tomaron fotografías SEM complementando el estudio del corte transversal. Los resultados presentados en la Figura 5 demuestran que a mayor grado de deformación se incrementa la cantidad de fisuras y de caminos de propagación.



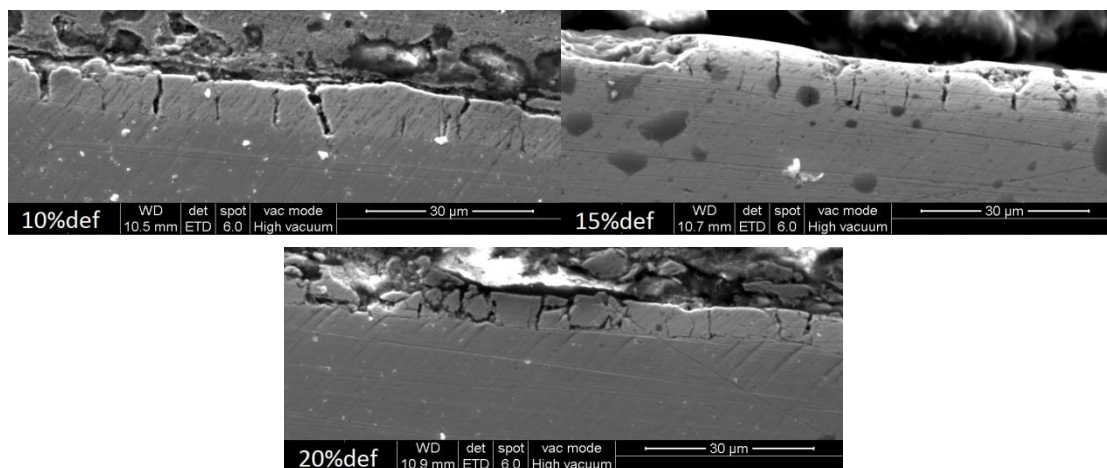


Figura 4. Imágenes representativas de las muestras analizadas para cada grado de deformación obtenidas por microscopía electrónica.

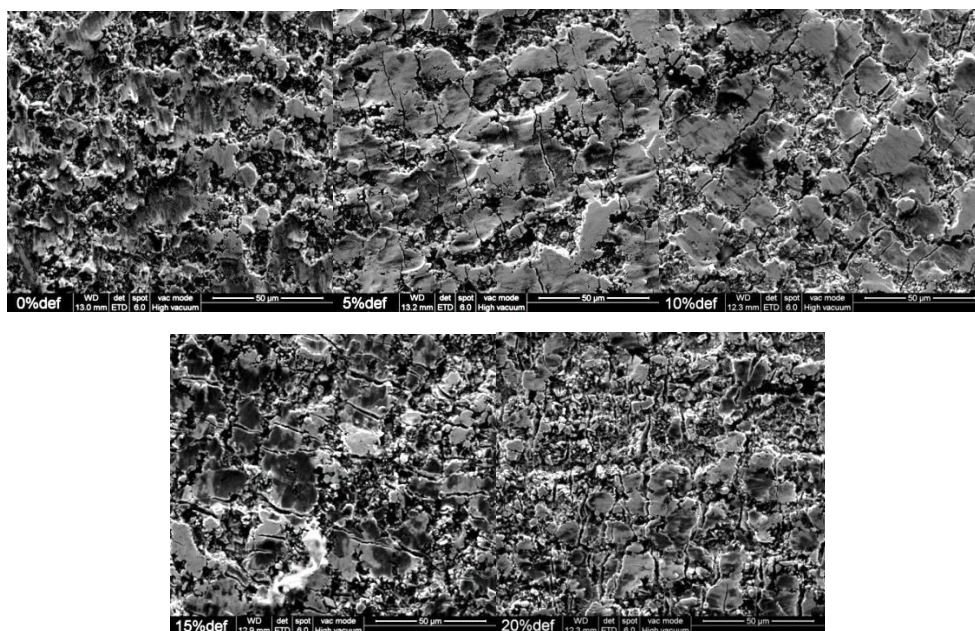


Figura 5. Fotografías de las superficies de “galvanneal” comercial con diferentes grados de deformación, obtenidas por microscopía electrónica.

### 3.5. Rugosidad

Como se muestra en la Figura 6, las probetas de “galvanneal” deformadas presentan una creciente rugosidad media ( $R_a$ ) en ambas direcciones de medición a medida que se incrementa el grado de deformación. Sin embargo no se encuentra una dependencia marcada entre el grado de deformación y el valor del parámetro  $R_z$ , denotando que la rugosidad es homogénea en el perfil medido. La densidad de picos por unidad de longitud ( $D_p$ ), es decreciente con el aumento del grado de deformación. Se mantiene el fenómeno entre el 10% y 15% de deformación, siendo mayor la densidad de picos con el 15% que con el 10% de deformación.

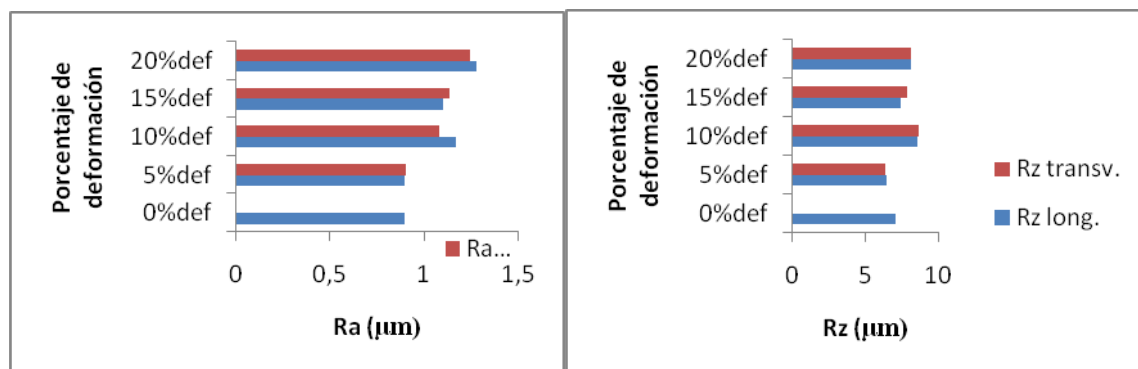


Figura 7. Comparación de valores de Ra, Rz

#### 4. Conclusiones

La caracterización electroquímica de los recubrimientos “galvanneal” es un buen complemento de la metalográfica ya que evidencia la presencia de las fases zeta ( $\zeta$ ) y gamma ( $\Gamma$ ) no observadas en el análisis metalográfico.

En la muestra con un 15% de deformación se observaron mayor cantidad de desprendimientos del recubrimiento. Dado que en la muestra con 10% de deformación, hay considerablemente mayor densidad de fisuras tipo B, C y D y estas se propagan en dirección perpendicular a las de tipo A, la disminución en la densidad de fisuras podría deberse a la intercomunicación entre fisuras tipo A por la propagación de las otras, generando “flaking”.

Es notable la diferencia entre la morfología de las fisuras tipo A con el grado de deformación, dado que a mayor deformación, más anchas son las fisuras.

El aumento de la densidad de fisuras con el grado de deformación incrementa considerablemente la rugosidad media (Ra). Estos resultados son consistentes ya que la formación de fisuras crea nuevos picos y valles. Lo inverso sucede con la densidad de picos, ya que al aumentar la deformación los nuevos picos se alejan generando disminución de la densidad de fisuras.

En cuanto a Rz, no se observan cambios con el grado de deformación. Por lo tanto, se puede decir que el recubrimiento “galvanneal” prácticamente no sufre deformación plástica durante la tracción y, por el contrario, tiene un comportamiento frágil. En este sentido, se concluye que es proclive a fisurarse antes que a deformarse. Esto se reafirma teniendo en cuenta que no se observaron cambios en el espesor del recubrimiento.

#### 5. Referencias

- [1] Y. Suzuki, “Galvannealed steel sheets: trends and developments in Japan”, Proc. 8th. Int. Conf. On Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (Galvatech 2011), Genova, Italia, 21-24 junio, 2011.
- [2] F. Goodwin, E. Silva, “North american zinc based sheet steel coatings: review and prospects”, Proc. 8th. Int. Conf. On Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (Galvatech 2011), Genova, Italia, 21-24 junio, 2011.
- [3] A.R. Marder, “The metallurgy of zinc-coated steel”, Progress in Materials Science 45, 2000; 191:271.
- [4] C.E. Jordan, K.M. Goggins, A.O. Benscoter, A.R. Marder, “Metallographic Preparation Technique for Hot-Dip Galvanized and Galvannealed Coatings on Steel”, Leigh University, Materials Science and Engineering Department, Bethlehem, PA.

- [5] F. M. Queiroz y I. Costa (“Electrochemical, chemical, and morphological characterization of galvanized steel coating”).
- [6] X.G. Zhang, I.C. Bravo, “Corrosion 50”, Abril 1994, p.308.