

Análisis de las tensiones internas en las cáscaras de níquel electroconformadas que se utilizan como inserto de un molde de inyección de termoplásticos (*rapid tooling*)^(*)

M.D. Monzón*, M.D. Marrero*, A.N. Benítez* y P.M. Hernández*

Resumen El presente trabajo forma parte de una línea de investigación iniciada en el Laboratorio de Fabricación Integrada de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, en el que se analizan y proponen mejoras en la fabricación de insertos de níquel electroconformado, cuya aplicación principal será la de moldes de inyección de plásticos. Dentro de este estudio, se ha considerado de especial interés determinar el valor de las tensiones internas que aparecen en los depósitos de níquel electroconformados sobre el modelo; dichas tensiones van a ser determinantes para la calidad dimensional y resistente de las cáscaras que luego serán transformadas en insertos. El estudio combina un análisis teórico con otro experimental. El método de ensayo utilizado presenta la ventaja de una gran aplicación industrial por su sencillez, bajo coste y reproducibilidad de las condiciones reales del baño electrolítico.

Palabras clave Electroconformado. Tensiones internas. Fabricación rápida de moldes. Insertos. Electrodeposición.

Internal stresses analysis in electroformed nickel shells for thermoplastics injection mold core (*rapid tooling*)

Abstract This study deals with a research field started at the LFI (Laboratorio de Fabricación Integrada) of the ULPGC (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria). Its aim is to analyse and propose improvements in the electroformed nickel cores manufacture. The main application of these cores is to be used as plastic injection molds. It has been considered an important part of this study taking under consideration internal stresses that appear in the nickel electroformed core. These stresses play a determinant role towards reaching a dimensional and resistant quality standard of the shells, which will be later transformed into cores. The investigation includes not only a theoretic study but also an experimental one. The testing method has the remarkable advantage of a wide industrial application because of its simplicity, low cost and reproducibility of the electrolytic bath actual conditions.

Keywords Electroforming. Internal stresses. Rapid tooling. Cores. Electrodeposition.

1. INTRODUCCIÓN

El enorme avance de las tecnologías de producción en el ámbito de la Ingeniería Mecánica ha sido posible gracias al desarrollo de modernas técnicas de producción que han permitido obtener mejores productos en menor tiempo y a menor coste. Dentro de los procesos productivos cobra cada vez más

importancia la reducción temporal de las etapas iniciales que van desde el diseño hasta el inicio de la producción en serie.

Centrándose en el área de la inyección de termoplásticos, una de las técnicas que van a facilitar esta reducción es la denominada “fabricación rápida de moldes (*Rapid Tooling*)” que, tomando como partida técnicas de prototipado rápido, va a

(*) Trabajo recibido el día 27 de enero de 2004 y aceptado en su forma final el día 9 de noviembre de 2004.

(*) Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Edificio de Ingenierías. Campus de Tafira Baja. 35017. Las Palmas de Gran Canaria. Islas Canarias, España. mmonzon@dim.ulpgc.es.

permitir fabricar un molde de inyección prototipo para producir series cortas o medias de piezas inyectadas en las etapas iniciales del desarrollo de producto. Es más, algunas de dichas técnicas pueden ser utilizadas como auténticos moldes de producción (por encima de 100.000 piezas). Uno de estos procedimientos es el de fabricación de insertos para moldes de inyección mediante electroconformado.

El Laboratorio de Fabricación Integrada, de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, desarrolla una línea de investigación en la que se pretende establecer una metodología rigurosa y sistematizada para obtener insertos electroconformados, con garantías de éxito, a partir de prototipos fabricados mediante prototipado rápido, más concretamente mediante el sistema FDM (deposición de material fundido). Para ello se han analizado todos los parámetros que intervienen en el proceso, estudiando las cáscaras de níquel obtenidas, desde diferentes puntos de vista, uno de ellos correspondiente a la estimación del nivel de tensiones internas generadas por el depósito de níquel, las cuales pueden tener efectos perjudiciales como los que se describirán posteriormente.

Según la Guía para Electroconformado de Níquel y Cobre (B 832-93), desarrollada por el Comité B-8 de la American Society for Testing and Materials, "electroconformado es la producción o reproducción de piezas por electrodeposición sobre un mandril o molde que es posteriormente separado". El modelo, obtenido con el equipo FDM es un plástico ABS, con lo cual, lógicamente, debe darse un recubrimiento conductor en la superficie deseada para permitir la deposición. El recubrimiento utilizado en los ensayos es una pintura con base de plata química.

Las fases de fabricación de un inserto electroconformado, que se pueden observar en la figura 1, son las siguientes: a) obtención de un modelo mediante técnicas de prototipado rápido; b) inmersión de dicho modelo en un baño electrolítico en

el que se produce la deposición metálica por electroconformado; c) separación de la cáscara de níquel; y, finalmente, d) fabricación del inserto mediante relleno de la cáscara con resina cargada, previa colocación del sistema de refrigeración de la cavidad.

2. TENSIONES INTERNAS EN DEPÓSITOS ELECTROCONFORMADOS DE NÍQUEL

Todos los procesos de deposición metálica experimentan, en mayor o menor medida, la presencia de tensiones internas. Éstas se definen como las tensiones generadas en el depósito como consecuencia del propio proceso de electrodeposición y/o la co-deposición de impurezas, orgánicas o inorgánicas.

Hasta la fecha, se desconoce el mecanismo exacto que hace que las cáscaras electroconformadas experimenten dichas tensiones, ya sean de tracción o compresión, pero que, llegadas a ciertos valores, tienen efectos perjudiciales como son: dificultad de separación modelo-cáscara, separación prematura entre ambos, flexión y/o torsión del depósito al ser separado, aparición de grietas, etc.

A pesar de esta incertidumbre es posible desarrollar una serie de pasos que pueden ser llevados a cabo con el propósito de minimizar las tensiones. Estos son^[1,2]:

- Elección del baño electrolítico.
- Uso de aditivos.
- Uso de temperaturas de deposición más altas.

2.1. Influencia del baño electrolítico

El tipo de anión del baño de electrodeposición puede influir de manera importante sobre las tensiones internas. En el caso de la deposición de níquel, el uso de soluciones de sulfamato de níquel reduce fuertemente el riesgo de aparición de tensiones internas, si se compara con otro tipo de soluciones como el baño Watts.

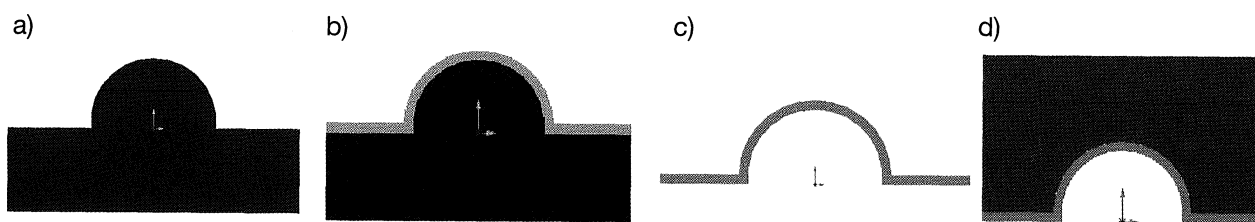


Figura 1. a) Modelo RP b) Electroconformado c) Cáscara de Níquel d) Fabricación de inserto.

Figure 1. a) RP model b) Electroforming c) Nickel shell d) Core manufacture.

2.2. Influencia de los aditivos

La presencia de aditivos, especialmente los orgánicos, influye de manera notable en las tensiones producidas en los depósitos.

En el caso que nos ocupa, electroconformación en un baño de sulfamato de níquel, pequeñas cantidades, del orden de 0,01 a 0,1 g/l, de compuestos que contengan azufre, reducen las tensiones internas en el depósito. La presencia de azufre en el baño puede ser intencionada, mediante la adición de agentes reductores de tensión o casual, debido a la presencia de productos de descomposición de la solución de sulfamato. Sin embargo y sea cual sea la forma de incorporación, su presencia sirve para disminuir las tensiones del depósito, aunque también ejerce una importante influencia sobre otras propiedades como la dureza, la fragilización a alta temperatura o el brillo, siempre aumentándolas.

2.3. Influencia de la temperatura del baño

Tal como demuestran los ensayos realizados y que se describirán posteriormente, la temperatura del baño influye de manera importante en el nivel de tensiones internas.

3. EXPERIMENTAL

3.1. Descripción del equipo de ensayos

Los componentes principales del equipo de electroconformado utilizado en la elaboración de las cáscaras de níquel que conformarán el inserto, son los siguientes:

- Tanque de 600 mm × 400 mm × 490 mm, de polipropileno y con paredes aisladas térmicamente.
- Cesta de titanio para contener los ánodos de níquel "Inco S-Rounds Electrolytic Nickel".
- Resistencias de teflón para calentamiento del baño, de 800 W cada una.
- Conjunto de recirculación-filtración del baño compuesto de bomba trifásica y filtro.
- Sistema de agitación mecánica del cátodo.
- Sistema de evacuación de gases.
- Rectificador de corriente continua.
- Cuadros de control, regulación y maniobra general.

El baño seleccionado está formado, principalmente, por sulfamato de níquel de 400ml/l, cloruro

de níquel y ácido bórico, además de aditivos ductilizantes y tensioactivos. Dicho baño ha sido elegido, sobre todo, porque las cáscaras obtenidas tienen unas propiedades mecánicas adecuadas para su aplicación en moldes de inyección^[3].

3.2. Medición experimental de las tensiones internas

3.2.1. Consideraciones previas

Dado el carácter de aplicación industrial que se buscaba en el desarrollo del proceso que se presenta, se planteó la posibilidad de medir experimentalmente las tensiones internas mediante sencillos procedimientos "in situ". En definitiva, se trataba de definir un ensayo que fuera rápido y fácil de usar e interpretar con un equipo robusto y fiable y cuyos resultados tuviesen un nivel de precisión aceptable, repetibles y significativos. Además, la medición, por un lado, no debía alterar significativamente los modelos electroquímicos o hidrodinámicos establecidos en el proceso de deposición^[4] y, por otro, debía ser capaz de leer los bajos niveles de tensiones que han de presentar la mayoría de los baños de electroconformado.

El método del tensiómetro de flexión catódica permite determinar el valor numérico de las tensiones internas, así como su naturaleza de tracción o compresión (Fig. 2), mediante el empleo de un testigo que se encuentra empotrado en uno de sus extremos y libre en el otro. Como consecuencia de la deposición metálica realizada, tan sólo por una de sus caras, experimenta una deformación mecánica cuya determinación permite calcular matemáticamente las tensiones internas de la solución electrolítica.

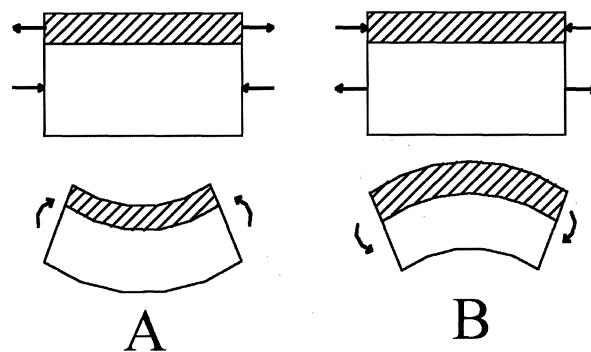


Figura 2. Modelo de influencia de las tensiones internas del depósito sobre el testigo. a) Tensiones de tracción. b) Tensiones de compresión.

Figure 2. Internal stresses model of layer over testing control. a) Tensile stresses. b) Compressive stresses.

Para el caso de una viga larga y a partir de la ecuación de Stoney^[5 y 6], las tensiones en el depósito vienen dadas por:

$$\bar{\sigma}_s = - \left(\frac{E_b}{1 - \nu_b} \right) \frac{t_b^2}{3t_s L^2} \delta \quad (1)$$

donde, ν_b : coeficiente de Poisson del sustrato.

E_b : módulo de elasticidad del sustrato.

t_b : espesor de sustrato.

t_s : espesor de depósito.

L : Longitud.

δ : Flecha

3.2.2. Determinación experimental desarrollada

Para determinar las tensiones internas del baño electrolítico de sulfamato, se llevaron a cabo ensayos con probetas que reunían las características necesarias para poder aplicar las ecuaciones anteriormente expuestas; es decir, testigos donde una de las dimensiones (longitud) es mayor que la otra (anchura) y de pequeño espesor, lo que exigía un espesor de depósito también muy pequeño. Concretamente, se depositaron espesores aproximadamente 100 veces inferiores al de la pieza.

Las condiciones de baño a las que se realizaron los ensayos fueron las siguientes:

- Concentración: constante e idéntica a la descrita en los apartados anteriores.
- pH = 4,0 ± 0,2.
- Temperatura: 35°C, 45°C y 55°C.
- Densidad de corriente: 1,97, 5,25, 9,84, 15,09 y 21,65 A/dm².
- Espesor teórico de depósito: 3 mm.
- Tiempos de deposición: 6,5 min.; 2,5 min.; 1,5 min.; 50 s. y 35 s.

Una vez determinada la flecha de las distintas probetas, mediante un proyector de perfiles, se realizó el cálculo de las tensiones internas con la aplicación de la ecuación de Stoney. Los datos de las propiedades mecánicas de los materiales empleados se observan en la tabla I.

Una dificultad añadida a la medición de las tensiones internas fue el hecho de que los testigos utilizados en el ensayo no tenían un nivel de rectitud ideal sino que presentaban una cierta curvatura que dependía de los mismos y que era variable de uno a otro en función del lote de material utili-

Tabla I. Propiedades mecánicas de los materiales empleados en los ensayos de medida de tensiones internas

Table I. Mechanical properties of materials used in internal stresses test measurement

Material	Módulo de Young, E (GPa)	Coficiente de Poisson, ν
Níquel	199,5	0,312
Acero	205,0	0,270

zado. Esta circunstancia resultó importante a la hora de considerar la aplicabilidad de la fórmula de Stoney, ya que parte del supuesto de que el testigo es idealmente recto. En un principio, se partió de esta hipótesis para realizar una primera aproximación al problema y valorar un orden de magnitud de las tensiones internas que se estaban obteniendo. Una vez determinadas, se realizó el estudio de las mismas tensiones aplicando el método de elementos finitos y se simuló tanto las geometrías rectas como las curvas^[7].

Teniendo en cuenta que la tensión del depósito se transmite a la superficie del testigo en forma de tensión superficial uniforme, la tensión interna producida es igual a:

$$\sigma = \frac{\text{Flecha} \cdot L}{K \cdot t_s} \quad (2)$$

El valor de K representa la rigidez del testigo para una geometría concreta y unas condiciones de contorno concretas.

A) Consideración del testigo con geometría idealmente recta

Para evaluar la constante K que corresponde a un testigo de acero, de espesor 0,3 mm, ancho 12,7 mm y largo 120 mm, empotrado por uno de sus extremos y con deformación libre por el otro, tal como corresponde al utilizado en los ensayos, se recurrió al programa Ansys 5.4 de elementos finitos. Se partió de uno de los ensayos efectuados a temperatura de 45 °C y densidad de corriente 5,25 A/dm². El valor obtenido en uno de los ensayos fue una flecha de 0,309 mm. Partiendo de la expresión de Stoney, con dicho valor, la tensión tangencial que provoca el depósito sobre la superficie del testigo debería ser de 1,483·10⁻³ MPa. Éste fue el valor de entrada utilizado para comprobar si la flecha resultante en MEF era similar a la propuesta por Stoney y, además, para calcular la K. La flecha

resultante fue de 0,269 mm, un 13% menor de la medida según Stoney, valor más que aceptable, dado el nivel de precisión deseado en los cálculos y la propia técnica de ensayo empleada. La constante K resultó ser igual a 181,389 mm/MPa.

Con este valor, se calcularon las tensiones internas producidas en un depósito sobre un testigo de las características mencionadas y del cual se midió su deformación máxima:

$$\sigma = \frac{\text{Flecha} \cdot 120}{181,389 \cdot t_s} \quad (3)$$

B) Consideración del testigo con geometría curva

Tal como se ha comentado con anterioridad, los testigos ensayados no eran idealmente rectos sino que, por el contrario, presentaron una pequeña curvatura que, incluso, llegó a ser variable de uno a otro. Esta circunstancia parecía, en un principio, un obstáculo ya que toda la información disponible hacía mención a testigos idealmente rectos. Sin embargo, tras realizar los primeros ensayos con ellos y desarrollar una metodología de cálculo adecuada, se llegó a la conclusión de que, incluso, mejoraban el proceso de ensayo al proporcionar un efecto de “amplificación” en la medida; es decir, se conseguían mayores curvaturas en las probetas, lo que facilitaba en gran medida la determinación del valor numérico de la curvatura o deformación experimentada.

Dicha metodología desarrollada tiene por objeto último determinar cómo varía la constante K en función del “radio de curvatura” que tenga el testigo ensayado. De esta manera se puede mantener el proceso explicado en el apartado anterior en relación a la obtención de la tensión interna.

En la tabla II se muestran los resultados obtenidos para el testigo tomado como referencia, es decir a 45° y 5,25 A/dm². Los tres casos son los siguientes:

- Recto: Cálculo suponiendo geometría recta, es decir, radio de curvatura infinito.
- Simulación numérica exacta: Consideración de la curvatura del testigo e hipótesis de carga tangencial a la superficie.
- Simulación numérica aproximada: Para simplificar el cálculo y dado que las curvaturas son pequeñas. Suposición de la carga aplicada solo en la dirección principal.

Observando la tabla II, en la que se recogen los valores del testigo referencia ensayado, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Tabla II. Resultados obtenidos bajo diferentes hipótesis de geometría y carga para un testigo ensayado a 45°C y 5,25 A/dm²

Table II. Results for different hypothesis of geometry and load. Tested control at 45°C and 5,25 A/dm²

	Recto	Simulación exacta	Simulación aproximada
Radio de curvatura, R (mm)	∞	4381,35	4.381,35
Tensión tangencial Stoney (MPa)	1,483·10 ⁻³	1,483·10 ⁻³	1,483·10 ⁻³
Flecha calculada, δ (mm)	0,269	0,89	0,735
Constante de rigidez, K	181,389	600,1	495,62
Factor de amplificación	1	3,3	2,73

Cuando se tiene en cuenta la curvatura del testigo se comprueba que efectivamente existe un importante efecto de amplificación, en los términos anteriormente descritos. En el caso mostrado, para una misma tensión tangencial aplicada sobre la superficie, resulta que se obtiene una flecha 3,3 veces mayor. Este aspecto, sin duda, facilita la medición de las deformaciones del testigo, sobre todo si se trata de niveles de tensiones internas pequeños.

Suponer el caso de simulación numérica aproximada no va a suponer un error excesivamente elevado en relación al exacto (15-20 %), donde además la tensión interna que resultará del cálculo siempre será mayor que la real, es decir, estaría sobredimensionado lo cual para una aplicación industrial sería más conveniente.

En la tabla III aparecen los resultados para diferentes testigos con distintos radios de curvatura.

En la curva de la figura 3 se aprecia cómo, a medida que disminuye la curvatura (aumenta el radio) del testigo, la flecha o deformación máxima obtenida es menor. El valor extremo será para radio infinito, donde la flecha tendrá un valor de 0,269 mm.

En la figura 4 se observa la evolución del factor de amplificación indicando que, efectivamente, cuanto más curvado esté el testigo mayor será la amplificación y, por lo tanto, más fácilmente se podrá medir la flecha a pesar de tener tensiones internas pequeñas. El caso de factor igual a 1 coincide, lógicamente, con testigo recto.

Una vez obtenida la rigidez K mediante regresión polinómica, la tensión interna para testigos con las características de los ensayados se determinaría como sigue:

Tabla III. Factores de amplificación obtenidos para diferentes curvaturas en distintas condiciones de deposición

Table III. Amplification factors for different curvatures in different deposition conditions

Temperatura, (°C)	45	35	55	45
Corriente, (A/dm ²)	5,25	5,25	1,96	9,84
Radio de curvatura, R (mm)	4.381,35	3.295,98	4.873,29	5.724,16
Tensión tangencial Stony, (MPa)	1,483·10 ⁻³	5,07·10 ⁻⁴	5,363·10 ⁻⁴	1,647·10 ⁻³
Flecha calculada, δ (mm)	0,735	0,367	0,229	0,56
Constante de rigidez, K	495,62	723,87	427	340,01
Flecha calculada a 1,483·10 ⁻³ (MPa)	0,735	1,073	0,633	0,504
Factor de amplificación	2,73	4	2,354	1,87

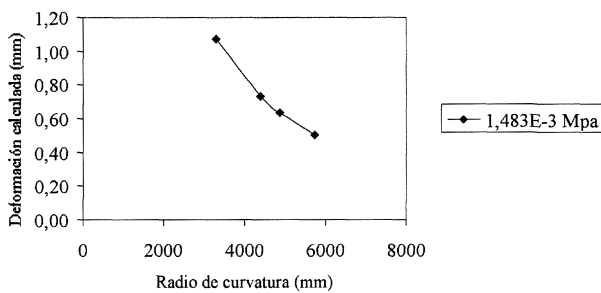


Figura 3. Deformación de los testigos obtenida en función del radio de curvatura.

Figure 3. Testing control deformation depending on curvature radius.

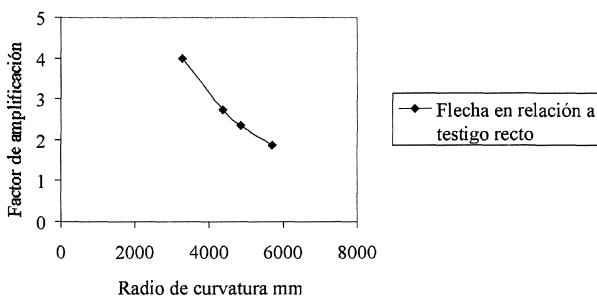


Figura 4. Factor de amplificación de la flecha máxima en función del radio de curvatura del testigo.

Figure 4. Amplification factor of maximum deformation value depending on testing control curvature radius.

$$\sigma = \frac{\text{Flecha} \cdot 120}{(1946,06 - 0,494 \cdot R + 3,727 \cdot 10^{-5} \cdot R^2) \cdot t_s} \quad (4)$$

Las figuras 5 y 6 muestran los resultados obtenidos, para las temperaturas de 55 °C y 45 °C en el valor de las tensiones internas aplicando la ecuación de Stony y el método de elementos finitos para testigos rectos y curvos.

La variación de las tensiones internas con la densidad de corriente es evidente, observándose que existen valores en los que sería recomendable trabajar si se buscan tensiones bajas en el depósito. Sin embargo, la densidad de corriente más favorable no es constante para las diferentes temperaturas en estudio, aunque se mantiene en valores relativamente bajos.

4. CONCLUSIONES

El electroconformado se muestra como una posibilidad interesante en la fabricación de insertos para moldes de inyección partiendo de prototipos realizados mediante prototipado rápido o mediante cualquier otro procedimiento. Desde un punto de vista de poder limitar las tensiones internas de las cáscaras de níquel fabricadas, se ha observado que, además de la composición del baño, influyen de manera determinante los parámetros de proceso, principalmente la densidad de corriente y la

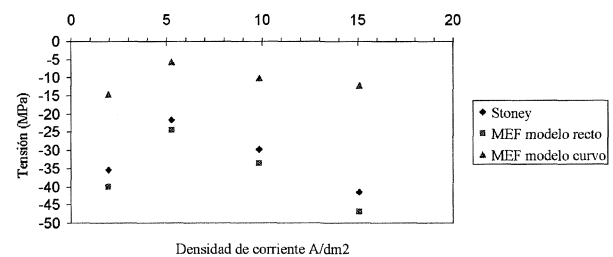


Figura 5. Tensiones internas para T= 55°C obtenidas en los ensayos.

Figure 5. Internal stresses for 55°C measured in tests.

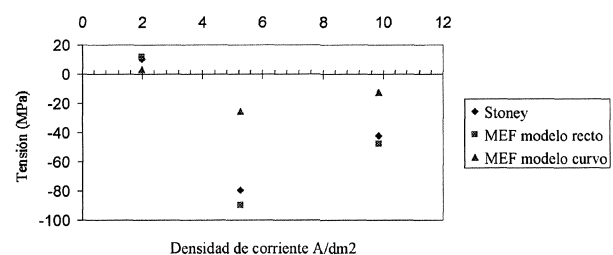


Figura 6. Tensiones internas para T=45°C obtenidas en los ensayos.

Figure 6. Internal stresses for 45°C measured in tests.

temperatura. Los testigos utilizados para los ensayos aparecen como un método aproximado y eficaz para orientar al usuario sobre el nivel de tensiones internas de su baño. Si, además, como se ha ensayado, dichos testigos disponen de un cierto nivel de curvatura, la medición es más sencilla ya que no es necesario utilizar equipos de medición demasiado precisos para determinar la flecha máxima de deformación del testigo, debido principalmente a un efecto de amplificación tal como se ha comprobado en los ensayos y con el apoyo de un programa de elementos finitos. Por otro lado se comprueba que la expresión de Stoney es bastante aproximada a la realidad, siempre que se consideren depósitos pequeños y que el testigo tenga una buena rectitud.

REFERENCIAS

- [1] B. STEIN, *Proc. AESF Electroforming Symposium*, Las Vegas (EEUU), 1996.
- [2] J. DINI, *Electrodeposition. The materials science of coating and substrates*, Noyes Publications, New York, EEUU, 1993, pp. 284-289
- [3] P.M. HERNÁNDEZ, Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2003
- [4] B. STEIN, *Proc. SURFIN' 2000, Fast an Accurate Internal Stress Determination*, Chicago, EEUU, 2000
- [5] T.W. CLYNE, *Residual Stresses in Thick and Thin Surface Coating*.
www.msm.cam.ac.uk/mmc/publications/twc010.pdf
- [6] J.W. JUDY, *Magnetic microactuators with polysilicon flexures*, Masters Report, Department of EECS, University of California, Berkeley, 1994, capítulo 3, [www-bsac.eecs.berkeley.edu/archive/masters/jjudy/Chapter3.pdf](http://www.bsac.eecs.berkeley.edu/archive/masters/jjudy/Chapter3.pdf)
- [7] M.D. MARRERO, Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2003.