



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

MODELADO NUMÉRICO Y TEÓRICO DE UN ACCESORIO DE PVC CON DEFECTOS DE OVALIZACIÓN

*¹ Ing. Cesar Gustavo Veroli; *² Ing. Carlos Gerardo Micuzzi;

*¹ Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste
Av. Las Heras 727 Resistencia Chaco Argentina
correo: gveroli@yahoo.com.ar

*² Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste
Av. Las Heras 727 Resistencia Chaco Argentina
correo: carlosmicuzzi@gigared.com

RESUMEN

Este trabajo surgió sobre la necesidad de analizar un accesorio de PVC del tipo Tee con ramal derivación, el cual presentaba defectos geométricos y físicos visibles a simple vista, los cuales podrían ser objeto de cargas no deseadas, aplicadas en frío o, a temperaturas superiores a la ambiente.

El objetivo fué poder estimar el origen de dichos defectos, para lo cual se llevaron a cabo los siguientes análisis y ensayos:

- Análisis Visual: Para poder confirmar la existencia de indicaciones.

- Análisis Dimensional: Se procedió al relevamiento de espesores y diámetros, del accesorio, a fin de poner en evidencia la ovalización y la deflexión diametral y compararla con los diámetros nominales y tolerancias establecidos por la Norma relacionada.

- Análisis Estructural: Se realizó un análisis estructural en el dominio elástico del material para cuantificar la magnitud de las deflexiones elásticas en la muestra bajo una carga concentrada

a) Análisis numérico basado en un modelo discretizado a efectos de observar las deformaciones del modelo bajo una carga concentrada.

b) Análisis teóricos modelando la muestra como un anillo de línea media circular, espesor delgado y constante, de sección rectangular; con una carga de compresión aplicada en forma concentrada. Los análisis consistieron en calcular las deflexiones elástica y plástica de la muestra analizada.

- Ensayo No Destructivo con Tintas Penetrantes: Se llevaron a cabo a efectos de investigar la posible existencia de fisuras superficiales.

Palabras Claves: *Accesorio, ramal, derivación, deflexión, ovalización.*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. MUESTRAS ANALIZADAS

- Muestra N°1: Accesorio Ramal Tee - Derivación 355-250 (PVC)
- Muestra N°2 : Accesorio Ramal Tee - Derivación 355-200 (PVC)



Figura 1. Muestras Analizadas

2. ANÁLISIS LLEVADOS A CABO :

Análisis Visual.

Análisis Dimensional.

Análisis Estructural.

Ensayo No Destructivo.

2.1 ANALISIS VISUAL

Se llevó a cabo una inspección visual en ambas muestras, observándose las siguientes indicaciones:

- Ovalización de los diámetros del ramal principal y de derivación de ambas muestras, debidas posiblemente a deflexiones diametrales plásticas (permanentes). Ralladuras y hendiduras en la Muestra N°2, que podrían ser objeto de cargas localizadas por manipuleo y transporte. Figuras 8 y 9.
- Líneas continuas y marcas en ambas muestras, que podrían ser indicios de potenciales fisuramientos, por lo que se efectuarán ensayos no destructivos con tintas penetrantes.



2.2 ANALISIS DIMENSIONAL

Se procedió a la medición de espesores y diámetros, principal y de derivación en ambas muestras, a fin de poner en evidencia la ovalización y la deflexión diametral y compararla con los diámetros nominales y tolerancias establecidos por la Norma IRAM 13324. La figura 2 muestra un croquis para referenciar los diámetros medidos.

2.2.1 Muestra N°1

2.2.1.1 Ramal Principal

- Diámetro interior comercial = 355 [mm]
- Diámetro interior según Norma IRAM 13324, $D_0 = 356,2^{+2,2}_{-0}$ [mm]
- Espesor Medio, relevado = 15,4 [mm]
- Ovalización
 - Diámetro interior máximo relevado, $D_{max} = 366,2$ [mm]
 - Deflexión = $D_{max} - D_0 = 10$ [mm]
 - Diámetro interior mínimo relevado, $D_{min} = 345,2$ [mm]
 - Deflexión = $D_{min} - D_0 = -11$ [mm]

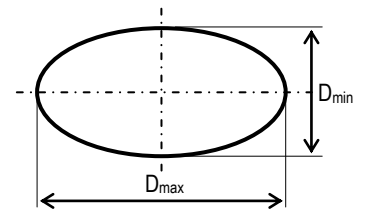


Figura 2

2.2.1.2 Ramal Secundario

- Diámetro interior comercial = 250 [mm]
- Diámetro interior según Norma IRAM 13324, $D_0 = 251,0^{+1,6}_{-0}$ [mm]
- Espesor Medio, relevado = 12,6 [mm]
- Ovalización:
 - Diámetro interior máximo relevado, $D_{max} = 258,8$ [mm]
 - Deflexión = $D_{max} - D_0 = 7,8$ [mm]
 - Diámetro interior mínimo relevado, $D_{min} = 246,8$ [mm]
 - Deflexión = $D_{min} - D_0 = -4,2$ [mm]

2.2.2 Muestra N°2

2.2.2.1 Ramal Principal

- Diámetro interior comercial = 355 [mm]
- Diámetro interior según Norma IRAM 13324, $D_0 = 356,2^{+2,2}_{-0}$ [mm]
- Espesor Medio, relevado = 15,4 [mm]
- Ovalización:
 - Diámetro interior máximo relevado, $D_{max} = 364,2$ [mm]
 - Deflexión = $D_{max} - D_0 = 8$ [mm]



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- Diámetro interior mínimo relevado, $D_{\min} = 340,2$ [mm]
- Deflexión = $D_{\min} - D_0 = -16$ [mm]

2.2.2.2 Ramal Secundario

- Diámetro interior comercial = 200 [mm]
- Diámetro interior según Norma IRAM 13324, $D_0 = 200,8_{-0}^{+1,0}$ [mm]
- Espesor Medio, relevado = 12,4 [mm]
- Ovalización:
 - Diámetro interior máximo relevado, $D_{\max} = 229,2$ [mm]
 - Deflexión = $D_{\max} - D_0 = 28,4$ [mm]
 - Diámetro interior mínimo relevado, $D_{\min} = 166,2$ [mm]
 - Deflexión = $D_{\min} - D_0 = -34,6$ [mm]

2.3 ANALISIS ESTRUCTURAL

Se realizó un análisis estructural en el dominio elástico del material para cuantificar la magnitud de las deflexiones elásticas que experimentarían las muestras bajo una carga de 100 kilos.

- Análisis numérico basado en un modelo discretizado de la muestra más afectada por las deflexiones permanentes (Muestra N°2).
- Análisis teórico modelando la muestra como un anillo de línea media circular, espesor delgado y constante, de sección rectangular; con una carga de compresión aplicada en forma concentrada.
 - Planteo Teórico N°1: Cálculo de la deflexión elástica diametral del anillo, aplicando el Teorema de Castigliano y considerando solo la acción del momento flector deducido de la teoría de flexión de barras de eje curvo (Formula de Winkler-Bach). [1]
 - Planteo Teórico N°2: Aproximación teórica de la relación entre la deflexión plástica y elástica, ésta última deducida de un comportamiento elástico en condiciones normales de cargas y temperaturas y asumiendo comportamiento lineal carga-desplazamiento.

2.3.1 Análisis Numérico

El análisis numérico se llevó a cabo a partir de un modelo CAD construido con SolidWorks. Luego se simuló el modelo estáticamente con el mismo software, bajo una carga puntual de 100 Kilos, aplicada sobre el alojamiento del aro de goma, en el ramal secundario, obteniéndose el descenso o desplazamiento máximo producido. El cálculo se llevó a cabo con el método de los elementos finitos, utilizándose una malla sólida basada en la curvatura con elementos cuadráticos curvilíneos de alto orden. Se configuró la aplicación de un método adaptativo



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

basado en mejorar el mallado en zonas del modelo con mayor probabilidad de errores de cálculo. [2]

Consideraciones :

- Solicitación Estática.
- Temperatura constante 20 C°..
- Carga concentrada, aplicada exteriormente sobre la curvatura donde se aloja el aro de goma de estanqueidad.
- Se modeliza el accesorio de PVC sin el aro de estanqueidad.
- Se analiza al modelo apoyado sobre una superficie plana y rígida.
- Las áreas de apoyo y área de aplicación de la carga, se han calculado previamente según la Teoría de esfuerzos de contacto de Hertz, analizando las superficies de contacto producidas por dos cuerpos en contacto (plano y cuerpo con radios de curvatura finitos).

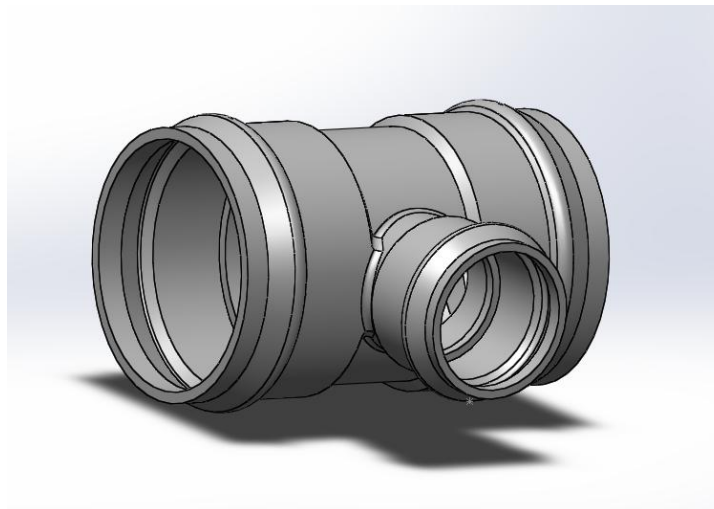


Figura 3. Modelo Tee ramal derivación 355-200 PVC

Tabla 1. Propiedades Volumétricas deducidas del modelo en CAD.

Tratado como	Propiedades volumétricas
Sólido	Masa:18.4493 kg
	Volumen:0.0131781 m ³
	Densidad:1400 kg/m ³
	Peso:180.803 N

Tabla 2. Sistema de Unidades utilizados por el software

Sistema de unidades:	SI (Sistema Internacional)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Celsius (C°)
Fuerzas	Newton (N)



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Presión/Tensión	N/mm ² (MPa)
-----------------	-------------------------

Tabla 3. Propiedades del Material

Nombre:	PVC inyectado
Tipo de modelo:	Isotropo, elástico, lineal
Criterio de error predeterminado:	Desconocido
Límite elástico:	40 N/mm ²
Módulo elástico longitudinal:	3000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson:	0.38
Densidad:	1400 g/cm ³

Tabla 4. Propiedades de la Malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en la curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	26.8062 mm
Tamaño mínimo de elemento	5.36123 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	63812
Número total de elementos	36220
Cociente máximo de aspecto	158.68
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	87.9
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0.229
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:04
Nombre de computadora:	ING-ING-PC

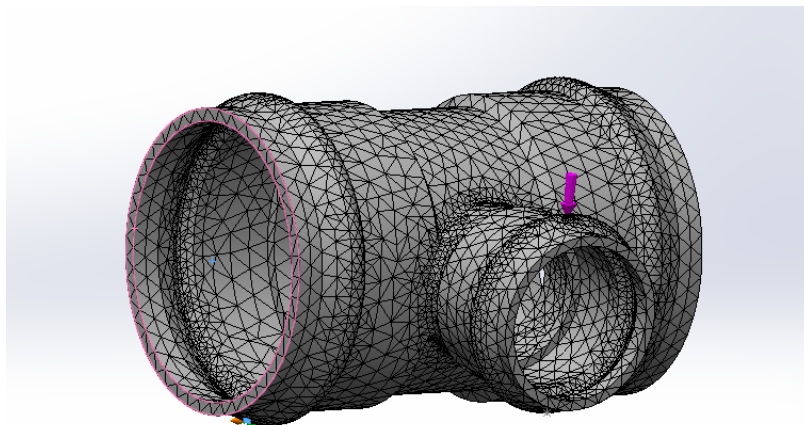


Figura 4. Modelo Mallado



Tabla 5. Resultados

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 207	1.47846 mm Nodo: 13037

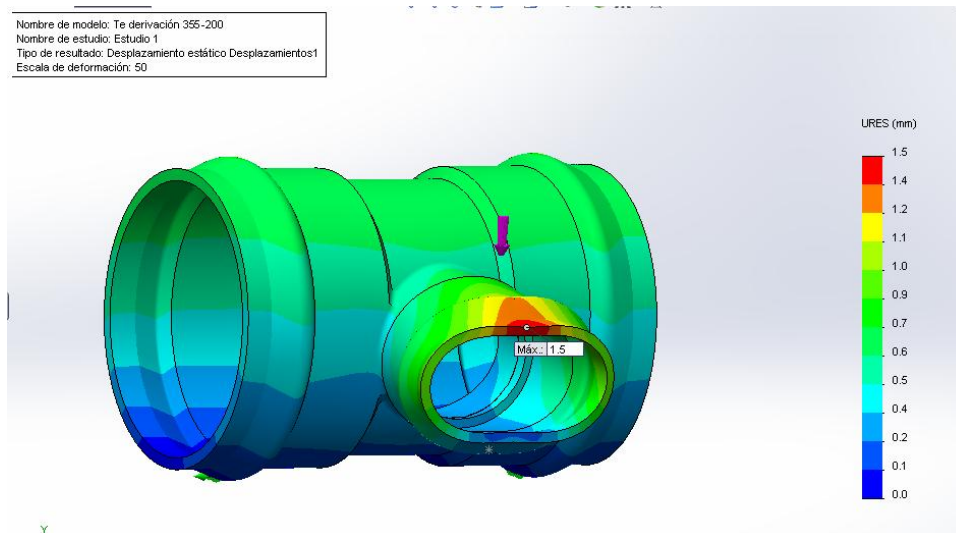


Figura 5. Escala de deformación 50:1

2.3.2 Análisis Teórico

2.3.2.1 Planteo Teórico N°1

Determinación de la deflexión elástica por el Teorema de Castigliano, en función del momento flector determinado por la teoría de flexión en barras de eje curvo.

Modelización:

Se idealiza el accesorio como un "anillo cerrado" de sección rectangular, espesor delgado y constante, solicitado por una carga concentrada de compresión. Figura 6.

Consideraciones e Hipótesis:

- Relación lineal carga - desplazamiento, y comportamiento Hookeano del material.
- Las propiedades mecánicas adoptadas deben considerarse valores medios en condiciones normales de temperatura y duración de la carga, debido a que:
 - Las propiedades mecánicas son muy sensibles a la estructura del material, y estas al proceso tecnológico de fabricación (en nuestro caso proceso de inyección).
 - Las propiedades mecánicas son también sensibles a la composición química del material, en especial por el uso de aditivos y material de relleno.
 - La temperatura es de mucha importancia, en especial en la deflexión elástica y plástica.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- La deflexión depende directamente de la rigidez del material y ésta de la temperatura y tiempo de aplicación de la carga (se considera un modulo de elasticidad “estático” en lugar de uno “dinámico, como correspondería)

No se toma en cuenta la rigidización brindada por la garganta de alojamiento de los aros de estanqueidad.

Propiedades Mecánicas adoptadas para el cálculo (para condiciones normales de temperatura y cargas)

Modulo de Elasticidad Longitudinal (E) = 3000 [MPa]

Limite elástico del Material (S_y) = 40 [MPa]

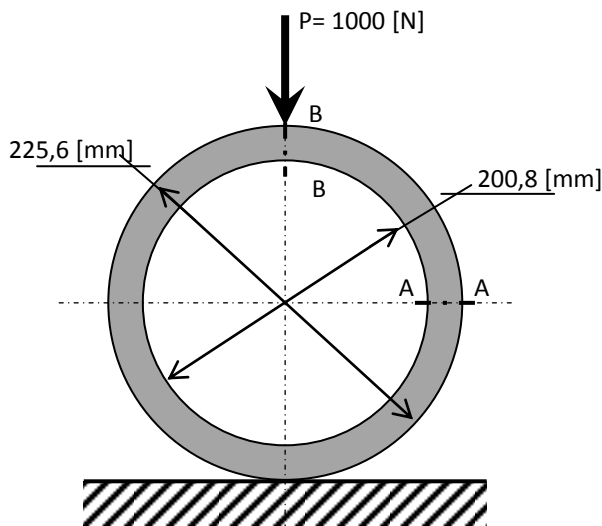


Figura 6. Modelo

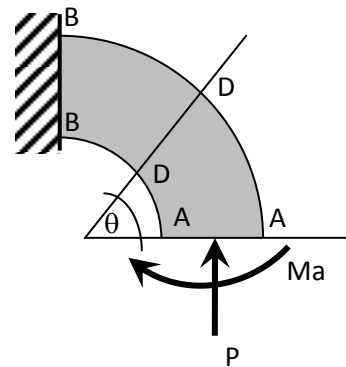


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre

En función a la simetría geométrica del anillo consideramos solo un cuadrante del mismo para esquematizar el diagrama de cuerpo libre. Como vemos se deja fija (empotrada) la sección B-B y libre la sección A-A, donde se pone de manifiesto la influencia de la carga P y el Momento Flector. Figura 7.

Para calcular el desplazamiento vertical se plantea la Formula de WINKLER-BACH [1], la misma tiene en cuenta la energía de deformación total, en este caso la ecuación se simplifica al considerar solo la influencia del momento flector. La siguiente expresión se obtiene de derivar la energía de deformación con respecto a la carga "P" (Teorema de Castigliano).

$$\delta = 0,15 \cdot \frac{P \cdot R^3}{E \cdot I} \quad [1] \tag{1}$$

Donde:

δ: Desplazamiento a calcular.



P: Carga concentrada aplicada. En este caso el valor adoptado como carga representativa para el modelado es **P=1000 [N]**, considerada como una carga regular de transporte.

R: Radio medio del anillo. En este caso **R = 106,6 [mm]**

E: Modulo de Elasticidad Longitudinal. En este caso **E = 3000 [MPa]**

I: Momento de Inercia de la sección transversal del anillo. Adoptando una longitud de **200 [mm]** y un espesor de pared del anillo de **12,4 [mm]**, el momento de inercia es **I = 31777 [mm⁴]**.

Reemplazando valores:

$$\delta = 0,15 \cdot \frac{1000 \text{ [N]} \cdot 106,6^3 \text{ [mm}^3\text{]} \cdot \text{[mm}^2\text{]}}{3000 \text{ [N]} \cdot 31777 \text{ [mm}^4\text{]}} = 1,9 \text{ [mm]} \quad (2)$$

El valor calculado es mayor en 0,4 [mm] respecto del obtenido por el modelado con método numérico. Esto es lógico ya que en este caso solo se ha considerado un anillo sin tener en cuenta las rigidizaciones aportadas por los alojamientos de los aros de estanqueidad.

2.3.2.2 Planteo Teórico N°2

Aproximación teórica a la deflexión plástica.

Deformación plástica circunferencial (ϵ)

$$\epsilon_{\text{circunferencial}} \cong \epsilon_{\text{elastica}} = \frac{S_y}{E} = \frac{40 \text{ [N]} \cdot \text{[mm}^2\text{]}}{\text{[mm}^2\text{]} \cdot 3000 \text{ [N]}} = 0,013 \quad (3)$$

Deflexión Radial (u)

$$u = R \cdot \epsilon_{\text{circunferencial}} = 100 \text{ [mm]} \cdot 0,013 = 1,3 \text{ [mm]} \quad (4)$$

Deflexión diametral elástica ($\delta_{\text{elástico}}$)

$$\delta_{\text{elástico}} = 2 \times u = 2 \times 1,3 \text{ [mm]} = 2,6 \text{ [mm]} \quad (5)$$

Relación entre la deformación plástica máxima medida (en el diámetro derivación de la Muestra N°2) y la deformación máxima elástica calculada

$$\frac{\delta_{\text{plástica}}}{\delta_{\text{elástica}}} = \frac{34,6 \text{ [mm]}}{2,6 \text{ [mm]}} = 13,3 \quad (6)$$

Deflexión plástica promedio calculada por el método numérico y teórico para una carga de 100 [Kg] en la Muestra N°2

(7)



$$\delta_{\text{elástico (100kilos)}} = \frac{(1,5 + 1,9)}{2} = 1,7 \text{ [mm]}$$

Por lo tanto la deflexión plástica que deducimos para una carga de 100 kilos es:

$$\delta_{\text{plastica (100kilos)}} = 13,3 \times 1,7 = 22,6 \text{ [mm]} \quad (8)$$

2.4 ENSAYO NO DESTRUCTIVO

A efectos de investigar sobre la posible existencia de fisuras superficiales se sometieron ambas piezas a ensayo de tintas penetrantes visible a luz natural.

El ensayo se llevó a cabo bajo Norma ASTM E165-02

2.4.1 Resultados

En ambas muestras se observaron algunas indicaciones; principalmente en el interior de la Muestra N°2.

Luego de analizar las indicaciones se informa que son "No Relevantes" ya que no se trata de fisuras sino cambios de diámetro propios del diseño del accesorio y rebabas originadas posiblemente por defectos en la matriz de inyección.

3 CONCLUSIONES

El análisis visual muestra signos de que las muestras estuvieron expuestas a cargas que provocaron hendiduras y ralladuras.

Las deflexiones observadas pueden asociarse a importantes cargas en frío, o menores si actuaron en caliente a temperaturas superiores a las ambientes como podrían ser las de conformado en el proceso de inyección.

El análisis dimensional pone de manifiesto que los diámetros medidos superan los valores nominales y sus tolerancias, establecidos por la Norma IRAM 13324, lo que impediría su montaje en las cañerías y sin dudas afectaría la estanqueidad.

El análisis estructural, numérico y teórico, efectuado con las modelizaciones indicadas, para una carga típica de traslado u operación en depósitos y obra de 100 kilos, dan deflexiones plásticas deducidas de las deflexiones elásticas, asumiendo un comportamiento lineal carga - desplazamiento algo menores a la deflexión plástica relevada en el diámetro del ramal de derivación de la Muestra N°2.

Comparada la deformación plástica determinada, con la relevada (medida), se deduce que la Muestra N°2 estuvo sometida a cargas superiores a los 100 kilos. Se podría decir que la deformación plástica experimentada en el diámetro de derivación de la muestra N° 2 se debe a cargas mucho mayores. Sin embargo debe tenerse en cuenta que el análisis teórico realizado asume condiciones normales de temperatura ambiente y cargas estáticas de corta duración. Si estas condiciones no se cumplen debe tenerse en cuenta, que las deflexiones son



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

consecuencia directa de la rigidez del material, y ésta, en especial en materiales plásticos, disminuye en función del tiempo en que actúa la carga y la temperatura.

En otras palabras:

Una carga grande puede producir la misma deflexión que una carga mucho menor que actué durante un tiempo prolongado, y una carga menor puede provocar una deflexión grande a temperaturas próximas a la de distorsión del material.

En resumen, en función a los análisis realizados las deflexiones que se observan en las muestras pueden asociarse:

- Cargas moderadas que actuaron durante tiempo prolongado.
- Cargas moderadas que actuaron a temperaturas superiores a la de deflexión del material.
- Cargas grandes, muy superiores a los 100 kilos que actuaron en condiciones normales.

3.1 Observaciones:

La cuantificación del daño requiere ensayos no destructivos de defectología y caracterización del material, y otros ensayos mecánicos para determinar la rigidez del material (modulo de elasticidad dinámico) como así también de larga duración para determinar la influencia del tiempo y la temperatura en las deformaciones elásticas y plásticas. O bien, contar con datos del fabricante respecto a los materiales precursores y aditivos utilizados, temperatura y presión de inyección, gradiente térmico de enfriamiento para desmoldeo, control de calidad y dimensional.

El ensayo no destructivo realizado no pone de manifiesto defectos superficiales, lo que indicaría que si bien las deflexiones plásticas (permanentes) son exageradas, no agotaron la resistencia del material.

3.2 Fotografías



Figura 8. Muestra N°1



Figura 9. Muestra N°2



Figura 10. Ensayos No Destructivos



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

4 REFERENCIAS

- [1] Seely y Smith, CURSO SUPERIOR DE RESISTENCIA DE MATERIALES. Editorial Nigar SRL.
- [2] Sergio G. Gonzales, SOLIDWORKS SIMULATION^R, Alfaomega.