

Análisis de la avería de un generador de escamas de hielo.

R. Goytisol Espinosa*, J. G. Noa Aguila*, L. Castellanos González*

A. Borroto Nordelo*, S. Montelíer Hernández*, A. Fernández Cañizares**

* Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad de Cienfuegos.

** Facultad de Humanidades. Universidad de Cienfuegos.

E.mail: ragoyti@fmec.ucf.edu.cu

(Recibido el 4 de octubre de 2006; aceptado el 22 de enero de 2007)

Resumen.

En el trabajo se realizó una investigación para esclarecer las causas de la avería del generador de escamas de hielo No.1 de la empresa EPICIEN de Cienfuegos el cual fue instalado recientemente y fue suministrado por la firma Frigofrance S.A. Desde su puesta a punto dicho generador presentó dificultades hasta que se produjo la deformación del cuerpo del generador, lo cual lo puso fuera de servicio. La investigación arrojó que la causa de la avería fue la pérdida de la estabilidad del equilibrio provocada por las elevadas tensiones de compresión que surgen en la pared del cuerpo producto de la superposición de los efectos de la presión exterior, la temperatura y una pequeña ovalidad de fabricación en el mismo.

Palabras claves: Estabilidad del equilibrio, tensión crítica, generador de escamas de hielo.

1. Introducción.

A mediados del año 2002 la Empresa EPICIEN de Cienfuegos adquirió e instaló dos generadores de escamas de hielo, "Geneglase" fabricados por la firma francesa Frigofrance S.A. Desde los primeros momentos de la explotación, a pesar de que los dos generadores son idénticos, el generador N° 1 comenzó a presentar ciertas dificultades: excesivo ruido en su explotación, disparos por sobrecargas, ya que la fresa se trababa, la que evidentemente implicaba cierto desajuste del equipo. El generador N° 2 por el contrario, operado en las mismas condiciones no presentó ninguna de estas dificultades y se ha mantenido operando hasta la fecha sin averías. En total desde su puesta en marcha el generador N° 1 estuvo parado por diferentes causas en varios períodos, hasta que finalmente se presentó una nueva avería, en esta ocasión mucho más grave, ya que sacó de servicio al mismo, con las correspondientes afectaciones económicas al disponer solamente el 50 % del hielo previsto a producir con esta inversión en la empresa. En total, desde su puesta en marcha, dicho generador averiado produjo solo 400 t de hielo de las más de 2 000 t que debía haber producido. La pared interior del cuerpo del generador se había deformado impidiendo su operación.

Se planteó por la firma suministradora y el personal encargado del mantenimiento y la reparación en Cuba, la posibilidad de que todas estas situaciones hayan sido provocadas por una operación incorrecta, debido a una dosificación insuficiente de sal, lo cual conduciría a que el hielo se torne más difícil de despegar y por lo tanto requiriéndose un mayor esfuerzo para trocearlo. En el caso de esta última avería se planteó la posibilidad de que la deformación observada haya sido provocada por una posible sobrepresión en el sistema.

La Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez" realizó la investigación con vistas a esclarecer las causas que pudieron dar origen a una avería como la observada.

2. Características de los generadores de escamas de hielo. Datos técnicos.

Los datos técnicos fundamentales son (4, 5):

Tipo: 2F60, Capacidad de producción: 24 000 kg/24 horas, 500 kg/ hora cada generador, Potencia del motor: 0,30 kW, Velocidad de giro del motor: 1 620 rpm, Velocidad de giro del rotor: 1,2 rpm, Tipo de refrigerante: Amoniaco, Presión del refrigerante: 3 a 5

kgf/cm², Temperatura del refrigerante: -20 a -25 °C, Adición de sal: de 100 a 300 g/m³

En la Figura 1 se muestra un vista general del generador de hielo y en la Figura 2 un esquema seccionado donde se señalan las principales partes componentes (5):

- Cilindro **A** vertical, fijo de doble pared aislado exteriormente.
- Parte giratoria constituida por un árbol central **B** sustentados por dos soportes **C**, una cubeta de distribución de agua **D**, una cubeta de recuperación **E**, una fresa **F** con dos soportes sustentados por dos brazos solidarios del árbol central y dos raquetas que enmarcan la fresa
- Base **G** de nivel de agua constante, controlado por el grifo de flotador.
- Accionamiento de la parte giratoria por motoreductor **H** con brazo de reacción **I** que actúa en un limitador de esfuerzo **J**.
- Bomba de agua **K** realiza la circulación por un tubo **L** entre la base **G** y la cubeta de distribución **D**. La producción de frío la realiza un conjunto frigorífico, con órgano de descompresión situado a la alimentación que refrigera la doble pared del cilindro.

3. Dimensiones y material de la pared deformada.

La pared deformada es la pared interior del cilindro vertical **A**, cuyas dimensiones son: Radio exterior: $R_e =$

39,05 cm, Radio interior: $R_i = 37,95$ cm, Radio medio: $R = 38,5$ cm y Espesor de la pared $h = 1,1$ cm

Del material sólo se conoce que se trata de un acero inoxidable. Por lo frecuente del empleo del acero inoxidable al cromo - níquel 1X18H9T en equipos de transferencia de calor se consideró que se trataba de uno similar a este acero. Las propiedades físicas y mecánicas del mismo fueron obtenidas según(9,10) y son: Resistencia máxima: $\sigma_u = 5\,800$ kgf/cm², Límite de fluencia: $\sigma_f = 2\,400$ kgf/cm², Módulo de Elasticidad: $E = 2 \times 10^6$ kgf/cm², Coeficiente de Poisson: $\mu = 0.3$, Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha = 18,6 \times 10^{-6}$ °C⁻¹ y la Conductividad térmica: $\lambda = 16$ W/m°C

4. Caracterización de la avería.

La pared deformada del generador de escamas de hielo constituye un cilindro de paredes delgadas sometido a presión exterior tal como se muestra en la Figura 3a). Las causas fundamentales de falla de este tipo de elemento es la pérdida de la estabilidad del equilibrio. Este tipo de avería origina la deformación plástica de la pared, tal como se muestra en la Figura 3b) y 4, a causa de la presencia de tensiones de compresión en la misma que exceden cierto valor σ_{crit} conocido como tensión crítica.



Figura 1 Vista general del generador.

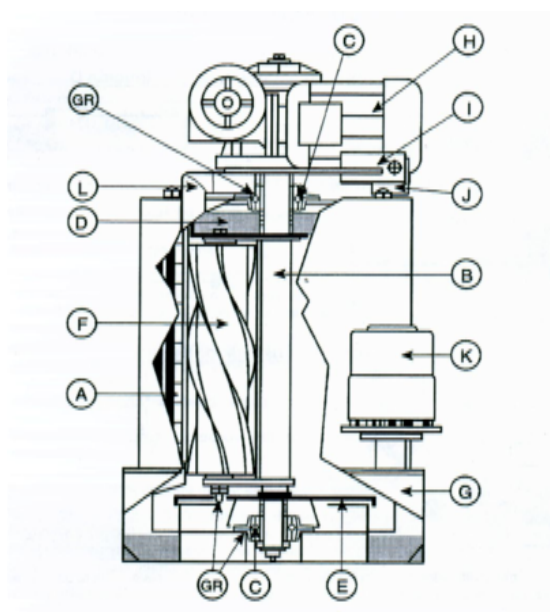


Figura 2 Esquema y partes componentes.

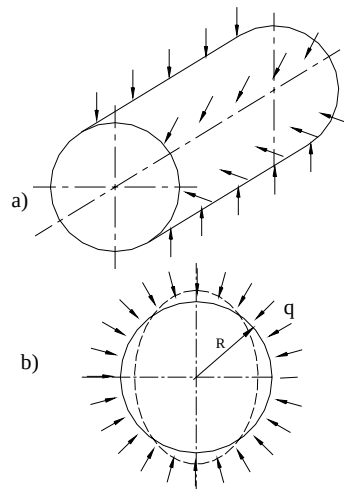


Figura.3 Pérdida de la estabilidad del equilibrio de un cilindro con presión exterior.
- Configuración inicial del cilindro.
- Configuración deformada del cilindro.



Figura.4 Aspecto externo de la pérdida de estabilidad del equilibrio en un cilindro de paredes delgadas con presión exterior.

La deformación observada en la pared interior del generador de escamas de hielo No. 1 se muestra en la Figura 5.

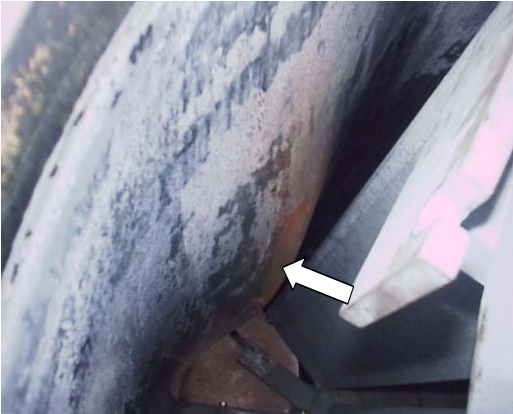


Figura 5. Deformación de la pared del generador No 1.

En el análisis que se realizará a continuación se demostrará que: si la pared interior del generador no presenta imperfecciones geométricas la posibilidad de la pérdida de la estabilidad del equilibrio es limitada, aun en las condiciones más críticas, lo que se confirma por el hecho de que en el generador N° 2, no ha ocurrido esta avería. Sin embargo, se verá como la presencia de una ovalidad inicial, aun de valores tan pequeños como $\mu_0 = 0,1$ a 1 mm, o sea, en el rango de posibles valores de ajuste de la fresa, provoca tensiones suplementarias de flexión que conducen a su vez a una reducción de la tensión crítica, fenómenos estos que aumentan

notablemente la posibilidad de pérdida de la estabilidad del equilibrio.

5. Presión crítica en ausencia de imperfecciones geométricas.

El cálculo de la presión exterior que provoca la pérdida de la estabilidad del equilibrio de la pared de una bóveda cilíndrica, sin imperfecciones geométricas es ampliamente abordado en la literatura (1, 2, 3, 12,13) y esta presión crítica puede ser calculada para la relación R/h existente en la bóveda en análisis por la expresión:

$$p_{crit} = \frac{E}{4 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{h}{R} \right)^3 \quad (1)$$

Donde

p_{crit} - Presión exterior que provoca la pérdida de la estabilidad - kgf/cm^2

E – Módulo de Elasticidad del material - kgf/cm^2

μ – Coeficiente de Poisson del material

h – Espesor de la pared - cm

R – Radio medio de la pared – cm

Para los datos del Generador de Escamas: Radio medio: $R = 38,5$ cm, Espesor de la pared $h = 1,1$ cm , Módulo de Elasticidad: $E = 2 \times 10^6$ kgf/cm^2 y Coeficiente de Poisson: $\mu = 0,3$. Se obtiene que: $p_{crit} = 12,8$ kgf/cm^2

Esta p_{crit} provocará la pérdida de la estabilidad del equilibrio y por ende la deformación plástica de la pared

para una tensión crítica de compresión en la misma, que puede ser calculada por la ecuación de Laplace:

$$\sigma_{crit} = \frac{p_{crit} R}{h} = \frac{12,8 \cdot 38,5}{1,1} = 448 \text{ kgf/cm}^2 \ll \sigma_f = 2400 \text{ kgf/cm}^2 \quad (2)$$

Como se observa, la pérdida de la estabilidad del equilibrio ocurre para tensiones de compresión que están muy por debajo de la tensión de fluencia del material.

La presión de trabajo $p = 5 \text{ kgf/cm}^2$ está muy por debajo de la p_{crit} y provoca una tensión media de compresión en la pared, calculada por la ecuación de Laplace

$$\sigma_{crit} = \frac{p \cdot R}{h} = \frac{4 \cdot 38,5}{1,1} = 140 \text{ kgf/cm}^2 \quad (3)$$

la cual está también muy por debajo de la tensión de compresión crítica, por lo que evidentemente están presente otros factores que contribuyeron a la pérdida de la estabilidad del equilibrio.

Los factores que pueden elevar la magnitud de las tensiones de compresión y por lo tanto elevar el riesgo de pérdida de la estabilidad del equilibrio son:

1. Tensiones de compresión circunferenciales suplementarias originadas por la diferencia de temperatura entre la superficie interior y exterior de la pared deformada.
2. Tensiones de compresión circunferenciales suplementarias originadas por una imperfección geométrica inicial existente en la pared.

Se calculará a continuación la magnitud de estas tensiones.

Tensiones suplementarias circunferenciales originadas por la diferencia de temperatura entre la superficie exterior e interior de la pared deformada.

La diferencia de contracciones térmicas, por el hecho de que la superficie exterior de la pared esta más fría que la interior, origina tensiones en la misma, de tracción en el borde exterior y de compresión en el borde interior. Este fenómeno es abordado en la literatura técnica por los siguientes autores (10, 11, 12, 13) y las tensiones pueden ser calculadas por las expresiones:

En el borde exterior:

$$\sigma_{\Delta t} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(1 - \frac{m}{6 + 3 \cdot m}\right) \quad (4)$$

En el borde interior

$$\sigma_{\Delta t} = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left(1 + \frac{m}{6 + 3 \cdot m}\right) \quad (5)$$

El signo menos indica que esta tensión es de compresión.

Donde:

$\sigma_{\Delta t}$ – Tensión originada por la diferencia de temperatura kgf/cm^2

$\Delta t = t_i - t_e$ - Diferencia de temperaturas entre los bordes interior y exterior de la pared $^{\circ}\text{C}$

α_m – Coeficiente lineal de dilatación térmica medio del material $^{\circ}\text{C}^{-1}$

$$m = \frac{R_e}{R_i} - 1$$

Donde: R_e y R_i – radios exterior e interior de la pared, cm

Para los datos del generador:

$R_e = 39,15 \text{ cm}$; $R_i = 37,95 \text{ cm}$; $\alpha_m = 17,6 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; $E = 2 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$; $\mu = 0,3$

Se obtiene:

Tensión de tracción en el borde exterior

$$\sigma_{\Delta t} = + 26,4 \Delta t \text{ kgf/cm}^2 \quad (6)$$

Tensión de compresión en el borde interior

$$\sigma_{\Delta t} = - 26,7 \Delta t \text{ kgf/cm}^2 \quad (7)$$

6. Cálculo de la diferencia de temperatura Δt y de la temperatura del borde exterior de la pared t_e .

La capacidad de los generadores de escamas de hielo tipo 2 F600 es de 24 000 kg cada 24 horas, o sea $m = 500 \text{ kg/h}$ por cada generador. La cantidad de calor que hay que extraerle al agua a una temperatura: t_a $^{\circ}\text{C}$, para convertirla en hielo a una temperatura: t_H $^{\circ}\text{C}$ es:

$$Q = m \cdot C_a \cdot (t_a - 0) + \Delta H_s + m \cdot C_H \cdot (0 - t_H) \quad (8)$$

Donde:

C_a – Calor específico medio del agua en el rango de temperaturas del agua en el generador – $\text{kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$

C_H – Calor específico medio del hielo en el rango de temperaturas del hielo en el generador – kJ/kg-°C
 ΔH_s – Entalpía de solidificación del agua – kJ/kg

Estos datos fueron obtenidos en las referencias (8, 9).

$Ca = 4,20$ kJ/ kg-°C , valor medio del rango de 0 a 10 °C

$CH = 2,11$ kJ/ kg-°C , valor medio en el rango de 0 a -20 °C

$\Delta H_s = 333$ kJ/ kg

La temperatura del agua en la bandeja superior, la temperatura del hielo y la temperatura de la pared interior fueron medidas con un termómetro digital “Digitrón 2000” con rango de medición desde -199,9 °C a 199,9 °C, con una resolución de 0,1°C en dicho rango y con un sensor plano para medición de temperaturas en superficies, tipo K, obteniéndose: $t_a = 12$ °C, $t_i = -7$ °C

Calculando la cantidad de calor Q en W:

$$Q = [500 \cdot 4,2 \cdot (12) + 333 + 500 \cdot 2,11 \cdot (8)] \cdot \frac{1000}{3600} = 9144 \text{ W}$$

Este calor tiene que ser conducido a través de la pared y tiene que cumplirse que:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t \cdot A \quad (9)$$

Donde:

λ - conductividad del material – W/m-°C

δ - espesor de la pared - m

A -área de conducción de calor

Despejando Δt y calculando para los datos del Generador de Escamas

$$\Delta t = \frac{9144 \cdot 0,011}{16 \cdot 2,86} = 2,2 \text{ °C}$$

Con este resultado se procedió a calcular las tensiones originadas en la pared por la diferencia de temperatura Δt

Los valores de tensiones de tracción en el borde exterior y de compresión en el borde interior fueron:

$$\text{Borde exterior: } \sigma_{\Delta t_e} = 58,1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2},$$

$$\text{Borde interior: } \sigma_{\Delta t_i} = - 58,8 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Estas tensiones se suman a las tensiones provocadas por la presión.

7. Tensiones suplementarias originadas por las imperfecciones geométricas.

El colapso de las bóvedas cilíndricas sometidas a una presión externa depende mucho de las imperfecciones geométricas de la misma. La más importante de las posibles es una ovalidad inicial de magnitud μ_0 , como la mostrada en la Figura 6.

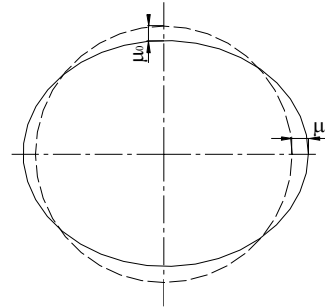


Figura 6. Ovalidad inicial de magnitud μ_0

Según (12, 13) esta ovalidad provoca en la pared un momento flector cuya magnitud depende de la desviación radial máxima μ_0 y se puede calcular por la expresión:

$$M_{fmax} = \frac{p \cdot \mu_0 \cdot R}{1 - \frac{p}{p_{crit}}} \quad (10)$$

Si se aísla de la bóveda un anillo limitado por dos planos meridionales, separados entre si la unidad de longitud. El módulo de la sección de este anillo será:

$$W = \frac{h}{6} \quad (11)$$

La tensión de compresión en el borde interior de la pared originada por el momento flector será:

$$\sigma_{Mf} = \frac{M_{fmax}}{W} = \frac{6 \cdot p \cdot \mu_0 \cdot R}{h^2 \cdot \left(1 - \frac{p}{p_{crit}}\right)} \quad (12)$$

Donde: p – Presión de trabajo - kgf/cm²
 μ_0 – Ovalidad inicial – cm
 R - Radio medio de la bóveda – cm
 h – Espesor de la pared – cm

$p_{crit.}$ – presión crítica de la bóveda sin imperfecciones - kgf/cm^2

Calculando para los datos del Generador de Escamas con una ovalidad máxima de $\mu_0 = 0,1 \text{ cm}$

$$\sigma_{Mf} = \frac{6 \cdot 5 \cdot 0,1 \cdot 38,35}{(1,1)^2 \cdot \left(1 - \frac{5}{12,8}\right)} = 156,6 \quad \text{kgf/cm}^2$$

En la flexión de la pared se producen tensiones de compresión a un lado de la línea media de la pared y tensiones de tracción al otro lado.

8. Tensión crítica en presencia de imperfecciones geométricas.

Timoshenko (12) propuso la siguiente expresión para calcular la tensión de compresión crítica que provoca la pérdida de la estabilidad del equilibrio en una bóveda cilíndrica con una presión exterior y una ovalidad de magnitud μ_0

$$\sigma_{crit}^2 - [\sigma_f + (1 + 6 \cdot m \cdot n) \cdot m \cdot p_{crit}] \cdot \sigma_{crit} + \sigma_f \cdot p_{crit} \cdot m = 0$$

Donde: σ_{crit} - Tensión crítica con una ovalidad μ_0 - kgf/cm^2

σ_f - Tensión de fluencia del material - kgf/cm^2

p_{crit} - Presión crítica en presencia de imperfecciones - kgf/cm^2

$m = R / h$ y $n = \mu_0 / R$, μ_0 - ovalidad, R - Radio medio y h espesor todos en cm

Resolviendo para σ_{crit} la ecuación cuadrática (13) y calculando para el Generador de Escamas: $\sigma_f = 2400 \text{ kgf/cm}^2$, $p_{crit} = 12,8 \text{ kgf/cm}^2$, $R = 38,5 \text{ cm}$ y $h = 1,1 \text{ cm}$ y para valores de ovalidad inicial $\mu_0 = (0,01 \text{ a } 0,1) \text{ cm}$, o sea, dentro del rango de valores posibles de ajuste de la fresa. Los resultados se muestran en la Figura 7.

En la Figura 7, junto con la dependencia entre la tensión crítica y las imperfecciones geométricas se ha planteado la dependencia entre la tensión de trabajo resultante y la magnitud de la imperfección. De esta se puede apreciar como ya, a partir de un valor de $\mu_0 > 0,095 \text{ cm}$, la tensión resultante de trabajo es mayor que la tensión crítica y se produce la pérdida de la estabilidad del equilibrio.

Está claro que la dispersión propia de las propiedades mecánicas del material puede influir en los resultados obtenidos, sin embargo en el trabajo (7) se analizó la influencia de la dispersión de éstas para los aceros y se concluyó que las posibles variaciones del Módulo de Elasticidad y del límite de fluencia pudieran influir como máximo en un 17,5 %. Por otro lado en el trabajo

(6) se confirman las apreciaciones finales de este análisis al concluir que la presencia de imperfecciones geométricas influye sensiblemente en la posibilidad de la pérdida de la estabilidad del equilibrio.

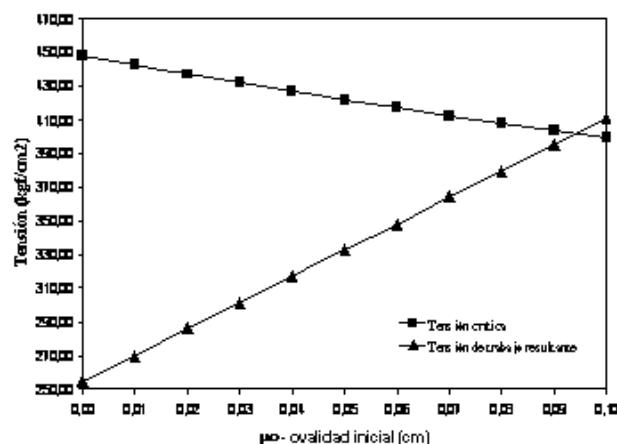


Fig. 7 Dependencia entre σ_{crit} y σ_{res} v.s μ_0

9. Conclusiones.

Del análisis realizado se puede concluir lo siguiente:

1. Se excluye la posibilidad de que la avería haya podido ocurrir por alteraciones en la dosificación de sal o por violaciones de los parámetros de operación, por diversas razones, tales como:
 - Los dos generadores se han operado desde un principio con la misma dosificación de sal y el generador N° 2 no ha presentado en ningún momento problemas en a operación, mientras que en el generador N° 1, estos han sido reiterados desde el comienzo de la explotación.
 - En el momento de la avería y en los días precedentes a la misma, tal como se reporta en los registros de la empresa ambos generadores estaban operando simultáneamente, por lo que cualquier otra violación hubiera provocado la avería de ambos equipos.
 - Una sobrepresión considerable, no provocaría la pérdida de la estabilidad en un solo lóbulo, como la observada en el generador N° 1, sino en dos o cuatro lóbulos como se muestra en las figuras 3 b) y 4 lo que confirma la presencia de una imperfección geométrica en el recipiente.
2. La tensión de compresión en la pared tomando en cuenta no solo la presión exterior y la diferencia de temperatura en la pared, sino incorporando también la tensión de flexión originada por la presencia de una ovalidad inicial, supera el valor de la tensión crítica de la bóveda con imperfecciones geométricas.

Para un valor de ovalidad de $\mu_o = 0,095$ cm,

$$\sigma_i = 395,4 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} > \sigma_{crit}$$

3. El análisis realizado conduce al dictamen final de que la avería presentada en el generador de escamas de hielo No 1 de la Empresa EPICIEN de Cienfuegos es una falla por pérdida de la estabilidad del equilibrio de la pared a consecuencia de elevadas tensiones de compresión existentes en la misma y agravada por una ovalidad inicial muy pequeña, dentro el rango de posibles valores de ajuste de la fresa.

10. Referencias.

1. Besujov I.L, Lyzchin O.V, Kolkinov N.V. Estabilidad y Dinámica de la Destrucción. Moscú: Editorial: Vizchaya Schkola, 1987.— 264 p.
2. Birger J.A. Cálculo de Piezas de Máquinas. Moscú: Editorial Mashinostroenie, 1966. — 322 p.
3. Fedosiev V. Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR, 1985.—583 p.
4. FrigoFrance S. A. Guía del Instalador. 34p. Catálogo Industrial, 1998
5. FrigoFrance S.A. Guía del Usuario. 13p. Catálogo Industrial, 1999.
6. Gonzáles Pérez, V. Influencia de las imperfecciones geométricas en estructuras de paredes delgadas sometidas a presión. Ingeniería Mecánica, 3 (2): 7-14, Abril-Junio, 2000.
7. --- Análisis estructural de cilindros de paredes delgadas sometidos a presión. Centro Azúcar. 29 (1): 43-48, Enero-Marzo. 2002.
8. Kirilin V, Sichev V., Sheindlin A. Termodinámica Técnica. Moscú: MIR, 1986— 599 p.
9. Krasnoschicov E.A. Sukomel A.S. Problemas de Termotransferencia. Moscú: Editorial MIR, 1986.—327 p.
10. Pisarenko G.S., Yakolev A.P., Matveev V.V. Manual de Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR, 1989.—694 p.
11. Recipientes y tuberías de alta presión : Manual E.R. Jusmatulin, E.M. Koroliov, V.I. y otros. Moscú: Editorial Mashinostroenie, ,1990.— 384 p.
12. Timoshenko S. Teoría de la Estabilidad Elástica. Buenos Aires: EDIAR, 1961.—549 p.
13. Timoshenko S. Resistencia de Materiales. Moscú : Editorial Nauka, 1965. T2—480 p.

Analysis of the failure of ice flake generator.

Abstract.

This research paper was carried to determine the causes of the failure of the Company EPICIEN geneglace No.1 of the Fishing Port of Cienfuegos, which was installed recently by the FrigoFrance Corporation. Since the generator was installed, it presented several difficulties until the deformation of the body of the generator took place, which put it out of service. The investigation showed that the cause of the failure was the collapse of the wall due to the loss of the stability caused by high compression tensions. These stresses arise in the body wall due to the overlapping of the effects of the external pressure, the temperature and a small geometric imperfection of construction found in the wall.

Key words: Ice flake generator, loss of stability, critical stress.