

frio-calor
aire acondicionado

CYF

PUBLICACIÓN TÉCNICA MENSUAL
Nº 394 JULIO/AGOSTO 2007

LAMEJORRESPUESTA ALASNECESIDADES DELAREFRIGERACIÓNACTUAL



MASTERING THE NEEDS OF MODERN REFRIGERATION INDUSTRY

RIVACOLD

www.rivacold.com



Tel. +34.902431214 - Fax +34.933941559 - www.e-bcsystems.com - rivacold@e-bcsystems.com

frío calor aire acondicionado

ISSN 0210-0665
Depósito Legal: M-1.911/1972
Madrid - Año XXXIV - Num. 394

Julio-Agosto 2007
Publicación mensual

Edita: FRIO CALOR AIRE ACONDICIONADO,S.L.
Director: M.ALONSO
Director Comercial: J. DE LA PEZUELA

REDACCIÓN Y ADMINISTRACIÓN:
c/ Antonio Pérez, 18 -1º ext.dcha. - 28002 MADRID
Teléfono: 91.562. 86. 83 - Fax: 91.411.29.22
C. electrónico: friocaloraireac@terra.es

Delegación Cataluña:
Javier Curiel
c/ De L'Esglesia, nº 29 - puerta B-2
08392 Sant Andrés de Llavaneras (Barcelona)
Tfno./Fax. 93.792.91.01
C.electrónico: friocalorcuriel@terra.es

PRECIO DE SUSCRIPCIÓN (Un año, 11 números):
España: 99,62 € (IVA incluido)
C.E.E: 127,37 €

Otros países: 167,50 €

Impresión: TECNOLOGÍA GRÁFICA
Avd. Gumersindo Llorente, 23 - 28022 Madrid

SUMARIO

FRÍO INSTALACIÓN

- Diseño de seguridad en compresor con CO23
- Aplicaciones en supermercados y bombas de calor: compresores Scroll con inyección de vapor. Concepto y Experiencia de campo14

FRÍO ALIMENTACIÓN

- Fluctuaciones térmicas: efecto sobre la calidad de la masa de pan congelada26

CALOR

- Compresión sobrealimentada con lubricantes en sistemas de bomba de calor con compresión del vapor32
- El secado de la madera: aplicación industrial de bombas de calor a alta temperatura42

AIRE ACONDICIONADO

- Sistema VPS (sistema compacto versatil)50

FERIAS Y CERTÁMENES60

EMPRESAS Y EQUIPOS70

DIRECTORIO EMPRESARIAL93

Prohibida la reproducción total o parcial,
sin citar la procedencia.

La dirección de **Frío Calor Aire Acondicionado**
no se hace responsable de las opiniones contenidas
en los artículos firmados que aparecen en la publicación.

INDICE DE ANUNCIANTES

AFRISA	Contraportada
AUTOMATIZACION Y CONTROL ATROL	41
CARBUROS METALICOS	2ª Cubierta
DAIKIN AC SPAIN	53
DANFOSS	33
DISTRIBUCIONES CASAMAYOR	63
ELIWELL IBERICA	79
FRICO	49
FRIMETAL	5-85
GARCIA CAMARA	21
GELFRED	39
GRUPO MOMPLET	55
GUNTNER	45

IBERMATIC	23
INGENIERIA FRIGORIFICA DAM	25
INSTRUMENTOS TESTO	29
INTERSAM	9
LU-VE CONTARDO IBERICA	16-17-3ª Cubierta
MOMPLET	1
PQ VALLES	67
PECOMARK	13
RITTAL	73
RIVACOLD	Portada
TANE	36
ZIEHL	59



DISEÑO DE SEGURIDAD EN COMPRESOR CON CO₂

Raul BOSCO, Jr., Ricardo Alexandre MACIEL, Miguel MATTAR N., y Carlos Alexandre J. MIRANDA, presentaron la ponencia "Design for Safety in CO₂ Compressor" en la 6ª Conferencia Internacional de Compresores y Refrigerantes, celebrada en Casta Papiernicka, República de Eslovaquia-septiembre 2006, auspiciada por el International Institute of Refrigeration-IIR (www.iifir.org).

Por cortesía de sus autores y del IIR ofrecemos esta ponencia a nuestros lectores.

1. RESUMEN

En el diseño de compresores para funcionar con refrigerantes a alta presión, tal como el CO₂, los aspectos de seguridad deben constituir una preocupación obligatoria. Más aún, cuando se trata con niveles de alta presión, los componentes del compresor tienen su propio diseño original adaptado para soportar tales presiones elevadas, en particular los silenciadores acústicos, la carcasa externa y el mecanismo de compresión.

Por lo que respecta a la carcasa externa, el enfoque del proyecto va más allá de los aspectos acústicos y estéticos, como se observa sobre todo en los compresores normales de refrigeración. Con el fin de incluir con seguridad el mecanismo de compresión, es obligatoria la aplicación de una metodología adecuada de diseño para salvaguardar la integridad estructural tanto de la carcasa externa del compresor como de todo el sistema de refrigeración.

Considerando los factores rentables aceptables de seguridad, es obligatorio en un enfoque simultáneo de diseño, que se incluyan técnicas avanzadas de mecánica estructural, experimentación, revisión de las normas de seguridad, y aplicación de herramientas como CAE (Computer Aided Engineering).

El propósito del presente trabajo es exponer cómo Embraco ha estado enfocando el diseño estructural de su compresor para CO₂.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Breve reseña histórica del CO₂ como refrigerante para sistema de refrigeración y de bomba de calor

El diseño de un sistema de refrigeración implica muchas consideraciones. El diseño requiere invariablemente una evaluación crítica de las soluciones propuestas al considerar factores como los económicos, la fiabilidad, la seguridad y

el impacto medioambiental. El ciclo de compresión de vapor ha dominado el mercado de refrigeración hasta la fecha debido a sus ventajas: elevada eficiencia, bajo coste, y sencillas incorporaciones mecánicas. Aparte de esas ventajas, una de las preocupaciones concerniente al uso de estos sistemas viene del hecho de que el efecto de refrigeración se produce haciendo hervir un fluido volátil a una baja temperatura idónea.

La mayoría de clases de los fluidos volátiles de uso frecuente agreden la capa de ozono, promueven el calentamiento global de la Tierra o presentan propiedades desfavorables para la salud humana y / o la seguridad.

En los años recientes los aspectos medioambientales están tomando un creciente auge llegando a ser un aspecto importante en el diseño y en el desarrollo de los sistemas de refrigeración. En los sistemas de compresión del vapor, la prohibición de los CFCs y los HCFCs debida a sus negativos impactos medioambientales ha abierto un camino para los refrigerantes HFCs. Hasta ahora no hubo motivo alguno para que en el mercado de refrigeración se buscasen otras alternativas.

Ya que la preocupación medioambiental crece, las tecnologías alternativas que utilizan gases inertes, o bien en absoluto ningún fluido, se están convirtiendo en soluciones atractivas en relación con el tema medioambiental.

En esta situación los HFCs parecen ser sólo una solución intermedia. Mirando a las selecciones finales y tomando en consideración las reglamentaciones para las emisiones de gases de efecto invernadero, los fluidos naturales se presentan como alternativa prometedora de fluidos refrigerantes. Algunos de estos refrigerantes como los hidrocarburos y el amoníaco traen consigo ciertos riesgos en cuanto a seguridad.

Si se exige no toxicidad y no inflamabilidad, todo apunta al CO₂, que se ha considerado para las aplicaciones de baja capacidad que operan en el ciclo transcrito de refrigeración.



2.2 Aplicación de compresores de CO₂ transcrito

El ciclo transcrito es aquel en el que la presión de descarga del compresor se encuentra por encima del punto crítico del refrigerante y la presión de aspiración por debajo de él. En otras palabras, la condensación no tiene lugar en el intercambiador de calor en el lado de alta y las fases de vapor y líquido del refrigerante coexisten en una fase perceptible.

En la Figura 1 se representa un típico ciclo transcrito del CO₂ en un diagrama de presión-entalpía. Ya que las temperaturas ambiente usuales pueden exceder los 31°C (temperatura crítica del CO₂), un sistema de refrigeración con CO₂ no presentará condensación en el intercambiador de calor en el lado de alta, como muestran los procesos de eliminación de calor 2-3 en la figura, y las temperaturas y las presiones no estarán relacionadas como en la zona de saturación (parte cóncava). En un ciclo de refrigeración en la banda donde las condiciones van desde el estado subcrítico al supercrítico, el CO₂ alcanza presiones elevadas, tanto como 100 bares (10 MPa), o incluso más en condiciones de temperatura ambien-

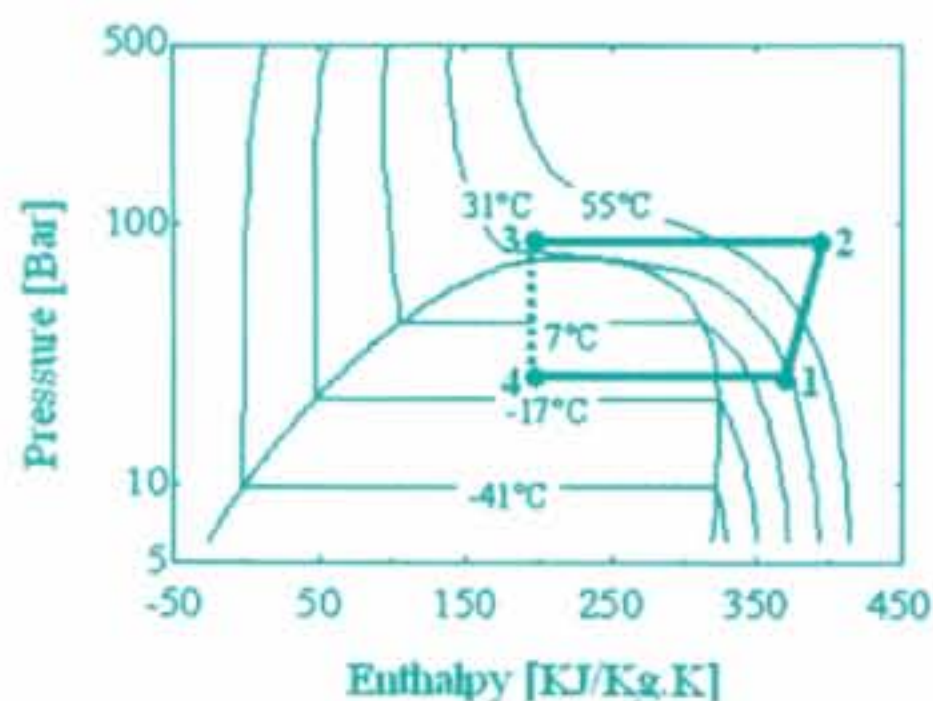


Figura 1a: Diagrama presión-entalpía del CO₂

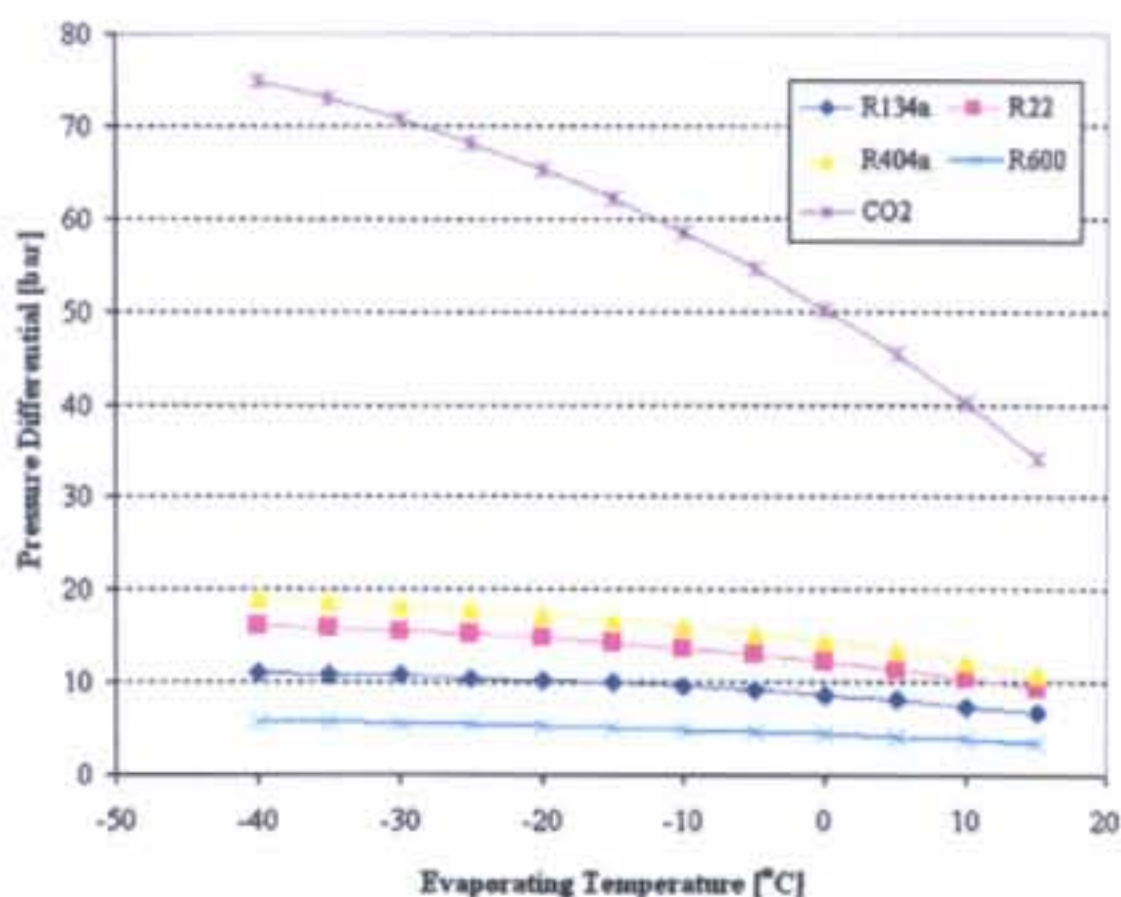


Figura 1b: Diferencia de presión para refrigerante común y para el CO₂

te elevada y/o bajo condiciones extremas de funcionamiento. Por debajo se representan las típicas diferencias de presión para las condiciones de diseño empleando fluidos refrigerantes usuales así como el CO₂.

2.3 Principales aspectos de seguridad y fiabilidad

A pesar de la fuerte llamada ecológica de la refrigeración con CO₂, la utilización de este compuesto como fluido refrigerante aún sigue demandando soluciones para algunos retos técnicos, principalmente los relacionados con las altas presiones asociadas al ciclo de refrigeración transcrito del CO₂. La estructura del compresor debe cumplir ciertos requisitos planteados por la incidencia de las normas de seguridad en el segmento de la refrigeración. Además, tomando en consideración la versión actual de dichas normas, los requisitos para el CO₂ llevarán invariablemente a un diseño desfavorable desde el punto de vista de costo si se compara con el de los compresores actuales para refrigeración.

Entre los componentes afectados al sustituir los fluidos refrigerantes con elevado GWP por CO₂, probablemente la carcasa exterior es uno de los que merece una atención particular. Ya que este componente se desarrolló para resistir la carga de prueba impuesta por los códigos internacionales como el UL 984, y dicha carga es el resultado de la presión de diseño (presión de saturación del refrigerante a 27°C) multiplicada por una constante fija (indiferente del fluido refrigerante), se puede llegar fácilmente a unas condiciones de diseño no económico.

En el caso del CO₂ la presión hidrostática de prueba puede exceder los 350 bares, mientras que los refrigerantes al uso requieren una presión de prueba de 35 bares para el mismo código. Esto obliga a exigencias especiales para el material de construcción, la geometría, el desarrollo del diseño de tubería y de las conexiones eléctricas. Además, ya que la carcasa representa una frontera entre el circuito de refrigeración y el entorno, hay que tomar precauciones especiales con el fin de satisfacer la resistencia mecánica a las exigencias del diseño y con factores favorables para la seguridad ponderados con los aspectos de seguridad y económicos.

3. ASPECTOS DE FIABILIDAD Y SEGURIDAD EN LA CARCASA DEL COMPRESOR

3.1 Evaluación de los Normas

Con el propósito de diseñar un depósito a presión aprovechando la ventaja de algunos procedimientos estándar o incluso las buenas prácticas de las mismas, un buen enfoque para el diseño del compresor en cuestión representaría un esfuerzo por seguir dichas normas específicas para recipientes a presión. Además, el seguir estas normas muy al comienzo del desarrollo conduce a una buena afirmación



Tabla 1: Presiones mínimas de prueba en lado de baja y en lado de alta

Refrigerante		Presión de prueba	
		lado de alta	lado de baja
Subcrítico CF3CH2F	R-134a	6,5 (65)	2,5 (25)
Transcrítico CO2 Para aplicaciones de AC	R-744	42,0 (420)	26 (260)
Para aplicaciones de frigoríficos y congeladores		36,0 (360)	
Para aplicaciones con bomba de calor		39,0 (390)	

Nota 103: Los valores arriba indicados pueden que no sean suficientes para algunas aplicaciones

para obtener resultados muy tempranamente en el desarrollo, disminuyendo el tiempo de tentativas y enfoque fallido.

Sin embargo, algunas normas como el código ASME muestran una inmensa cantidad de reglas y recomendaciones, que en la mayoría de los casos parecen ser muy conservadoras dependiendo de la aplicación. Están basadas en la selección de material; desarrollo del proyecto, proceso de fabricación, montaje e inspección.

Desafortunadamente, las reglas "normalizadas" se utilizan para evitar la aplicabilidad o incluso abstenerse en aplicar los recipientes bajo algunas condiciones de temperaturas y presiones, imponiendo limitaciones geométricas, tales como el espesor de la carcasa o la selección de material.

Ya que existen dos niveles diferentes de presiones en la carcasa de un compresor para refrigeración, la descarga (lado de alta) y la aspiración (lado de baja) habría que diseñarlo para resistir estas dos cargas diferentes. Además, la prueba experimental debería llevarse a cabo ateniéndose a este aspecto. En la IEC 60335-2-34, las propuestas preliminares para moto-compresores con R-744 en aplicaciones transcriticals,

se especifican las siguientes presiones para este tipo de aplicación (Tabla 1).

Con el fin de analizar cómo tratan estos aspectos otras normas, se ha considerado el código ASME Recipientes a Presión Sección VII-División II como la herramienta para resolver sus asuntos.

Algunos partes afectadas por dicha norma se han tenido en cuenta en el desarrollo subsiguiente

del compresor y en el diseño de sus componentes, tales como UG-19, UG-21 y UG 99. Para más detalles consultar [1].

3.2 Definición de características del material

Con el fin de disponer de un buen conocimiento de todos los materiales empleados en el compresor para CO₂, principalmente en lo que atañe al cuerpo de la carcasa, se ha llevado a cabo un análisis en profundidad de los materiales estándar. Por lo que respecta a la posibilidad de una carcasa de fundición, se ha evaluado tanto la fundición gris como la fundición nodular. Debido al comportamiento notoriamente superior de la fundición nodular comparada con la fundición gris, se eligió la primera como material para el recipiente de fundición.

Para las especificaciones de la fundición se analizó el código ASME y se tuvieron en cuenta: Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión, Sección VIII, División I, Reglas para la Construcción de Recipientes a Presión, edición 2004. En la Tabla 2 se resume la información concerniente a la norma.

Sin embargo, como puede verse en la limitación de la norma y, debido al tratamiento especial del material para alcanzar

las especificaciones indicadas, esto nos lleva a desarrollar internamente nuestro ensayo para aprobación y el análisis del material sin hacer caso de una evidente ventaja al seguir el código ASME o con independencia de normas para recipientes a presión.

Así pues, con el propósito de evaluar un material razona-

Tabla 2: Especificación del material y sus restricción conforme al códigoASME

Elongación	Código ASME parte	Restricciones	Material
≥ 18%	Parte UCDe Caso del código 1939	Pproyecto ≤ 7 POa soldadura permitida	SA-395 Clase 60-40-18
≥ 15% e ≤ 18%	Parte UCD	Pproyecto ≤ 7 MPa soldadura no permitida	SA-395
≤ 15%	Parte UCI	Pproyecto ≤ 1,1 MPa	SA-278 SA-47



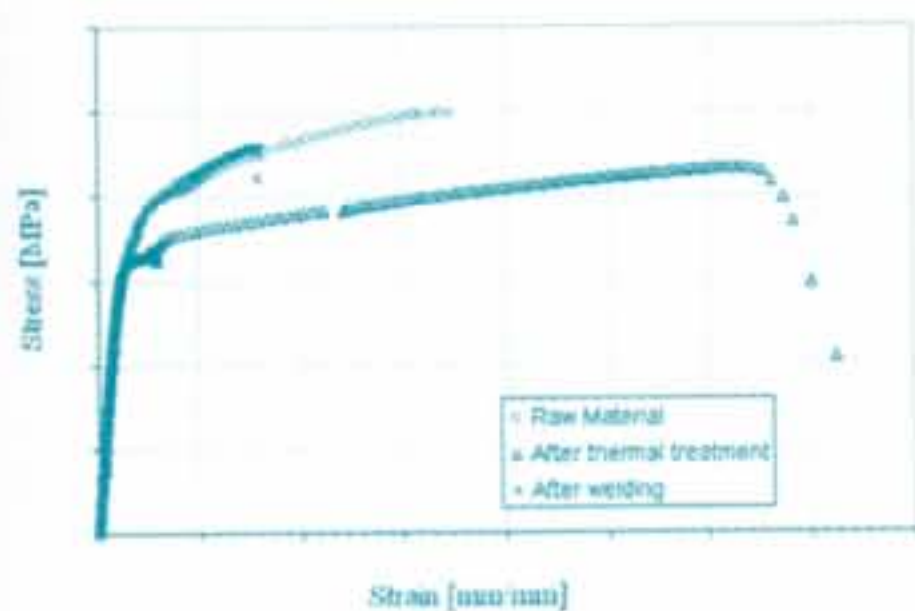


Figura 2: curva de tensión-deformación para fundición bruta de hierro, después de tratamiento y después de soldadura

ble y rentable y hacer un análisis de compensaciones entre viabilidad y seguridad, se ha considerado el enfoque siguiente en el desarrollo del material:

- Calidad y homogeneidad del material actual;
- Evaluación de las uniones soldadas con el fin de obtener sus características
- Propiedades mecánicas de todo el material usado actualmente, incluyendo el material del cuerpo principal, material para la unión soldada y propiedades de la soldadura;
- Fatiga y mecánica de fractura considerando sus curvas de fatiga σ -N y ϵ -N, KIC, J y así sucesivamente;
- Programa experimental y completo de laboratorio para evaluar todo el material y su composición, Programa de validación y experimentación;
- Análisis estructural muy bien desarrollado por elementos finitos, FEA. Con lo que el Proyecto mediante Análisis ha supuesto un gran esfuerzo.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

Se ha realizado una considerable cantidad de simulaciones numéricas y ensayos experimentales con el fin de evaluar cada propuesta de carcasa para el compresor, con el propósito de un análisis completo de la envoltura en cuanto a su aspecto de seguridad: **Carga de colapso, rótula plástica, análisis de roscado, análisis de soldadura, ensayo de presión hidrostática y ensayo de fatiga.**

CARCASA DEL COMPRESOR

Seguramente este componente es el más importante en cuanto a seguridad se refiere, y así pues es el tema principal de esta ponencia.

Esto incluye todos los otros componentes del compresor que garantizan su hermeticidad y mantienen la presión elevada inherente al CO₂. Por otra parte la cabeza del cilindro está soportando la presión más alta dentro de la carcasa incorporada, debido a que la superficie y el volumen de la carcasa del recipiente será el punto más débil del diseño.

En la figura 3 se presenta la vista externa de todo el recipiente del compresor, en el que la carcasa y la cabeza del cilindro se muestran en un cuerpo de fundición. La carcasa debe diseñarse teniendo en cuenta una gran cantidad de temas estructurales y de seguridad del material considerando el comportamiento del material, el análisis plástico, la carga de colapso, las propiedades a la fatiga, la rótula plástica, la evaluación de roscado, el análisis de soldadura, y así sucesivamente.

Las figuras siguientes y el análisis muestran estos aspectos de seguridad, con el propósito de establecer las características y analizar el propio recipiente a presión, y sus singularidades, tales como la soldadura y el roscado.

CARGA DE COLAPSO

Puede utilizarse un análisis plástico para determinar la carga de colapso para una combinación dada de cargas sobre una determinada estructura. Se utilizará el siguiente criterio para determinar la carga de colapso. Se dibuja una curva carga-flecha o carga-deformación con la carga en ordenadas y la flecha o deformación en abscisas. El ángulo que la parte lineal de la curva carga-flecha o carga-deformación forma con la ordenada se denomina θ . Una segunda línea recta, denomi-

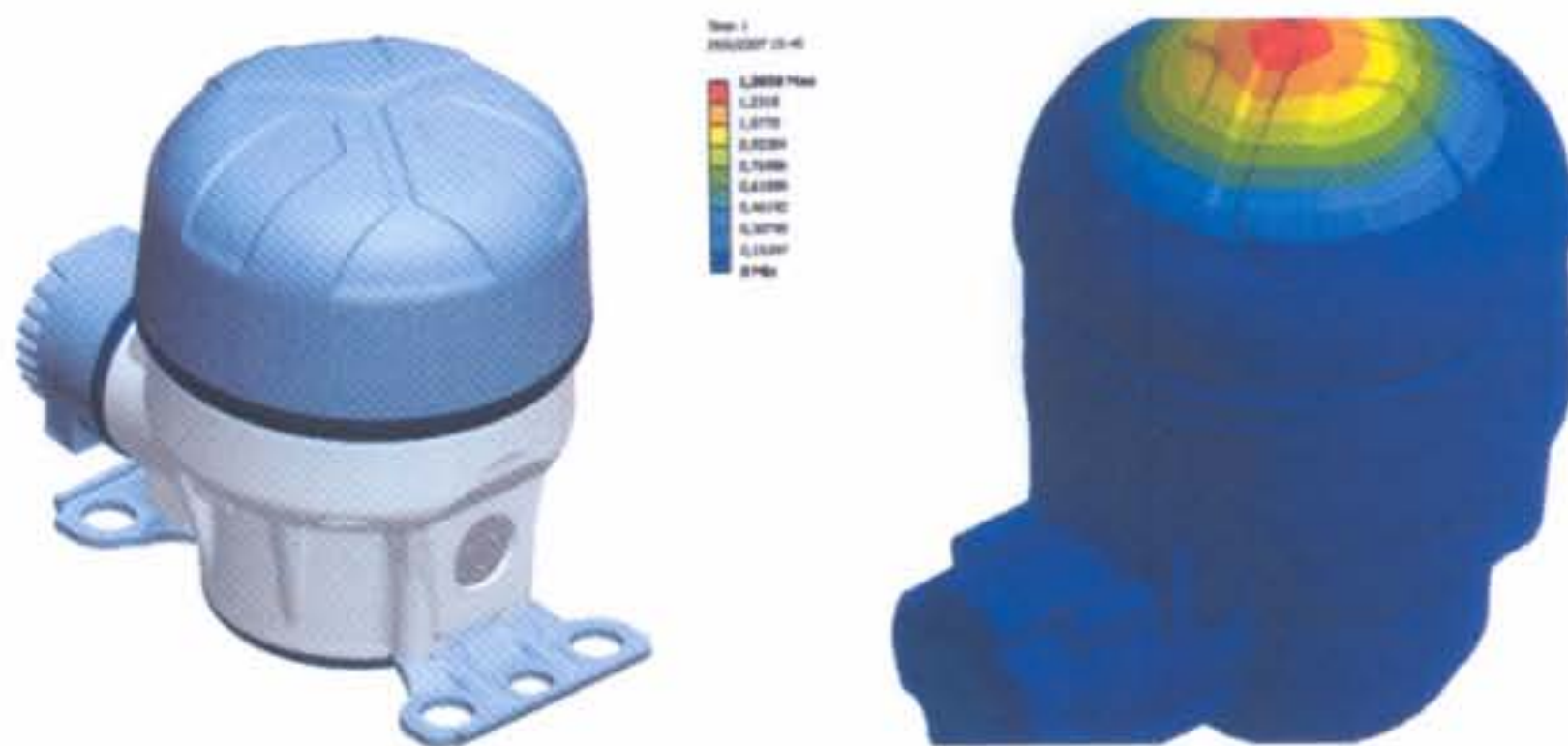


Figura 3: Modelo 3D de la carcasa del compresor para CO₂ y resultado del FEA para la deformación total debida a la evaluación de carga elástica de colapso



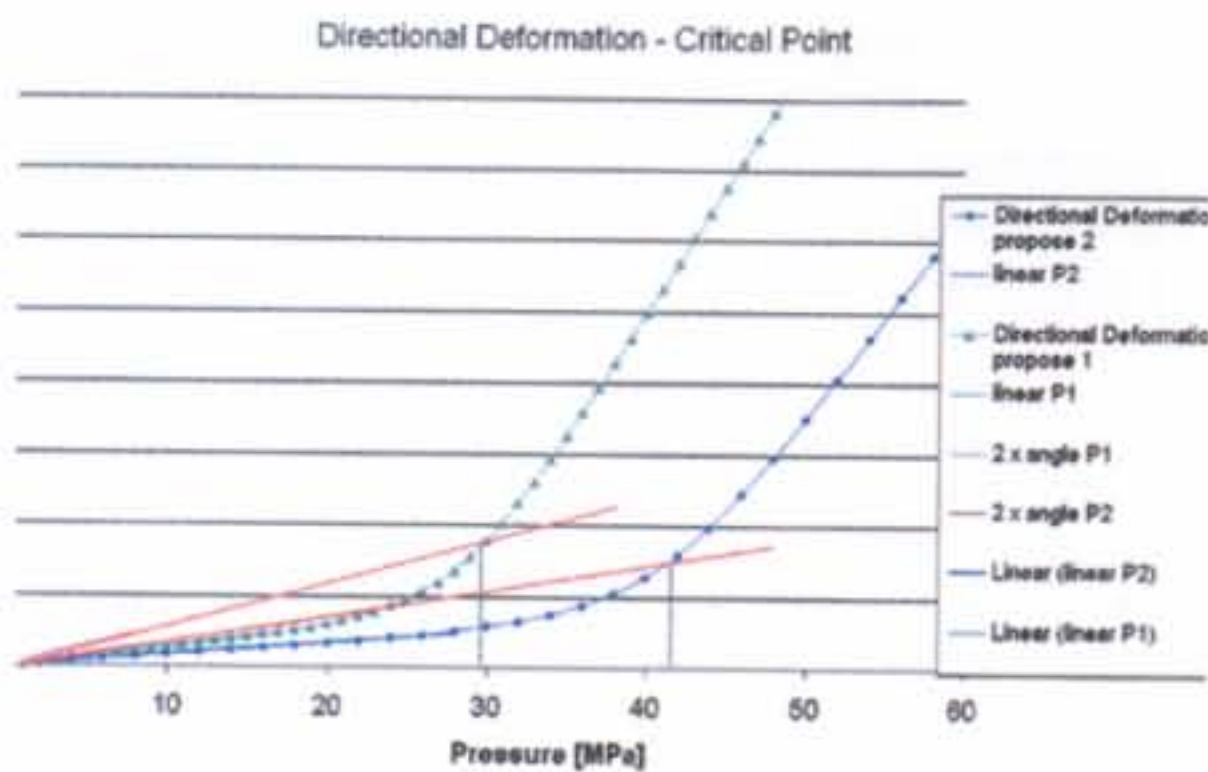


Figura 4: Evaluación de la carga plástica de colapso para dos propuestas diferentes de carcasa del compresor

nada en adelante línea límite de colapso, se traza pasando por el origen de modo que forma un ángulo $\phi = \tan^{-1}(2 \tan \theta)$ con la ordenada. La carga de colapso es la carga en la intersección de la curva carga-flecha o carga-deformación y la línea límite de colapso. Si se utiliza este método, habría que tener especial cuidado en asegurar que las deformaciones o las flechas que se usan son indicativas de la capacidad portante de carga de la estructura.

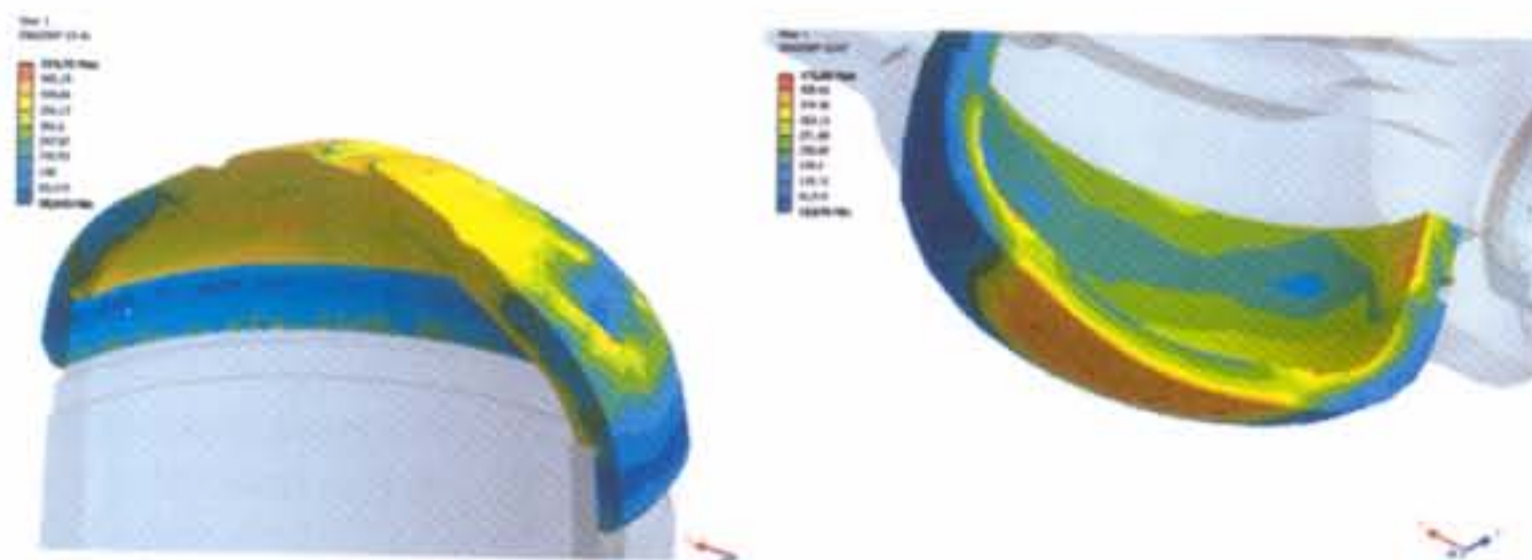


Figura 5: Evaluación 3D de la tensión con comprobación de la formación de rótula plástica general

El resultado de la carga de colapso puede verse en la Figura 3, en la que la deformación total analizada es el punto crítico más importante. La Figura 4 muestra dos propuestas diferentes para la carcasa, representando el límite de presión para ambas en una simulación no lineal de la carga de colapso. El punto en el que la línea recta corta la línea de la deformación expresa la presión para la carga de colapso según el criterio del código ASME.

RÓTULA PLÁSTICA

La rótula plástica es un concepto idealizado utilizado en el Análisis Límite. En una viga o estructura, una rótula plástica se forma en el punto en el

que el momento, la fuerza cortante y la fuerza axial se encuentran en la superficie de interacción del límite elástico. En las placas o en carcasas se forma una rótula plástica cuando las tensiones generalizadas se encuentran en la superficie del límite elástico.

Dependiendo de la región de la carcasa, se tendría que aplicar la teoría correspondiente con el fin de evaluar su factor de seguridad, principalmente en la zona de discontinuidad.

Para esta presión de diseño, cada transición específica tendría que analizarse en lo que concierne a sus tensiones de H.Tresca (máximo esfuerzo cortante) y tanto si hay o no presencia de rótula plástica. Ver Figura 5.

ANÁLISIS DE ROSCADO

Algunas discontinuidades, tales como la zona de roscado, tienen un especial tratamiento en cuanto a tensión y factor de seguridad. El nivel de tensión a través de la sección del filete de rosca no alcanzaría un valor específico en relación con su criterio de fallo, en este caso, la cuarta teoría de la elasticidad y la teoría de H. Tresca.

Cortante Puro. La tensión cortante primaria media en la sección cargada bajo las condiciones de diseño en puro esfuerzo cortante se limitará a $0.6 S_y$ (por ejemplo, llaves, aros de corte, roscas de tuercas).

ANÁLISIS DE SOLDADURA

En el diseño de una junta de soldadura (unión soldada) en recipientes a presión como el compresor para CO_2 , se ha de prestar especial atención para seguir, o al menos contemplar, cómo el código ASME trata este tipo de unión o junta.

En el código queda bastante claro cómo se tiene en cuenta el proceso implicado, como la selección de material, tipo de

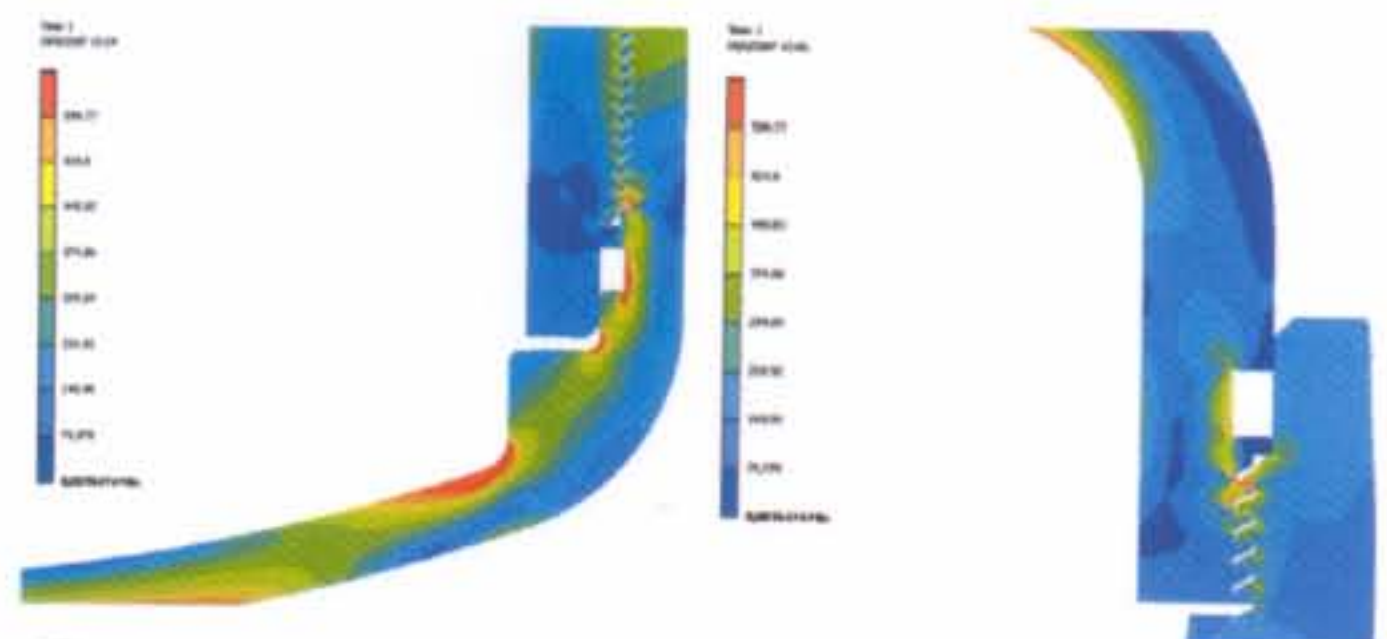


Figura 6: Análisis de roscado por tensión e intensidad del esfuerzo cortante



unión, proceso de soldadura, etc., de acuerdo con la así llamada denominación de eficiencia de la unión.

La eficiencia de la unión (o junta) se define por la relación de la resistencia de una junta a la resistencia del metal base, expresada en porcentaje.

En el código ASME, la sección que trata este tema es la parte UW, requisiciones para recipientes a presión fabricados mediante soldadura. En ésta se especifican varios tipos de juntas, tales como *junta a tope* y *junta de solape*, con su correspondiente eficiencia de junta. Así pues, habría que usar el correspondiente multiplicador para el ratio de esfuerzo en el proyecto del recipiente a presión empleando este tipo de soldadura. Ver Tabla 3.

También hay en el código ASME una caracterización de la unión soldada en función de su localización en el recipiente a presión, por ejemplo, si está situada en el cuerpo principal de la carcasa, en las cámaras de comunicación, toberas, o transiciones en el diámetro, incluyendo las uniones entre la transición y un cilindro, tanto en el extremo grande como en el pequeño; uniones soldadas circunferenciales conectando cabezas formadas distintas de las hemisféricas a las carcasas principales, a las transiciones en el diámetro, a las toberas, o a las cámaras de comunicación.

Dependiendo de la situación, también hay que interesarse en especial por los aspectos de seguridad. Sin embargo, con el fin de optimizar el desarrollo de la carcasa del compresor, habría que evaluar la eficiencia actual de la soldadura y llevar cabo ensayos experimentales con el propósito de reducir el criterio conservador del cumplimiento de dicho código.

PRUEBA DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Para cada propuesta de diseño se realiza una prueba de pre-



Figura 7: Compresor en cámara de ensayo de presión hidrostática

Tabla 3: Máximas eficiencias permitidas para uniones soldadas por arco o a gas del código ASME Tabla UW-12

Tipo de unión	Grado de examen radiográfico		
	1,00	0,85	0,70
Unión a tope	1,00	0,85	0,70
Unión simple con total solape en ángulo sin soldadura de tapón	No aplicable	No aplicable	0,45

sión hidrostática con la que se pretende comprobar la resistencia a una presión extrema de la carcasa.

Esto es una prueba completa de esfuerzo estático, en la que todos los componentes de la carcasa, esto es el material del cuerpo principal y la unión soldada, están sometidos a la misma presión hasta el colapso por deformación.

Después de la prueba de colapso, el componente con fallo se valúa con la pretensión de obtener su modo de fallo y la condición de sus partes, principalmente defectos de fundición o de soldadura.

La Figura 7 muestra un compresor preparado para el ensayo de sobrecarga hidrostática dentro de la cámara de prueba hidrostática.

PRUEBA DE FATIGA

Se pretende evaluar el comportamiento a la fatiga del propio compresor y también de las diferentes configuraciones para el material, y en concreto se han realizado pruebas de fatiga en muestras especiales y en el recipiente a presión.

La prueba de fatiga en las muestras ha seguido a las pruebas estandarizadas de muestras (ASTM E399/90) y se han tomado por corte de placas soldadas de fundición de hierro.

Los límites a la fatiga se han evaluado en diferentes sitios (zona fundida, zona afectada por el calor y metal base) con marcas especiales en las muestras. En la Figura 8b puede observarse el corte de muestra tomado del cuerpo principal de la carcasa soldada. En estas figuras la muestra está sometida una carga de fatiga en la máquina universal de tensión axial.

Para la prueba a fatiga de la carcasa final del compresor, se han sometido a la carga de presión tanto el lado de alta como el lado de baja de la parte cerrada del recipiente, de acuerdo con la condición de trabajo para cada lado del compresor.

Como primera aproximación para realizar la prueba a fatiga y también tener un resultado razonable en cuanto al vida de seguridad, las pruebas se han realizado de acuerdo con la





Figura 8a: Prueba de la carcasa del compresor en una máquina desarrollada especialmente



Figura 8b: Muestra cortada del cuerpo principal soldado de la carcasa del compresor y desarrollo de la prueba a fatiga en la máquina universal de tensión axial

Tabla 1. Sin embargo, el código IEC dice incluso que aquellas presiones no podrían ser suficientes y que podrían diferir dependiendo de la aplicación del compresor. Así pues, alguna otra prueba a fatiga para una presión razonable tendría que tomar parte en el desarrollo del compresor, y este aspecto es aún un asunto obligatorio en el desarrollo del compresor para CO₂.

En la Figura 8 puede verse una prueba para vida a la fatiga que se realizó en el lado de alta de la carcasa del compresor, en la que algunas carcasas están sometidas a un ciclo de presión variable de acuerdo con la Tabla 1. Esta es una máquina especialmente diseñada en EMBRACO interesándose por los aspectos de seguridad para el operador. El bucle del ciclo de presión está monitorizado mediante un programa informático y se registran el número de ciclos y los datos relativos a las condiciones de presión.

Una ventaja notoria resultante de someter toda la carcasa a la prueba a la fatiga es la evaluación de todos los puntos del

recipiente, como soldadura, materiales, roscados, y otros posibles puntos débiles en el diseño de la carcasa, garantizando sobre todo el factor de seguridad

ANÁLISIS DE LA CABEZA DEL CILINDRO

El mismo enfoque tendría que aplicarse en el diseño de la cabeza del cilindro. Más aún, este componente podría considerarse también como punto débil crítico, ya que se enfrenta al nivel de máxima presión y también al gradiente de temperatura.

Así en el cálculo del factor de seguridad, la tensión a considerar tendría que ser la dada por la carga de la presión de descarga más la que resultara del gradiente de temperatura.

Otro punto débil importante tendría que concernir a la discontinuidad que resulta de los conectores. Esta región podría estar afectada por un nivel de alta tensión debida al factor de concentración dado por la presencia de un hueco en una zona de tensión debida a la máxima presión. Ver Figura 9.

5. CONCLUSION

La evaluación estándar y el análisis son con seguridad un excelente y obligado enfoque en el diseño de un compresor de este tipo.

Se aprovecha la ventaja de una enorme experiencia en el desarrollo de recipientes a presión, si por ejemplo consideramos el SME, pero también las experiencias intrínsecas de cada comité específico de normalización.

Más aún, siguiendo algunas de las buenas prácticas de aquellas normas se llega a un desarrollo que es más concluyente desde muy al comienzo del diseño, como la selección de material, elección del proceso, aspectos de fabricación y así sucesivamente.

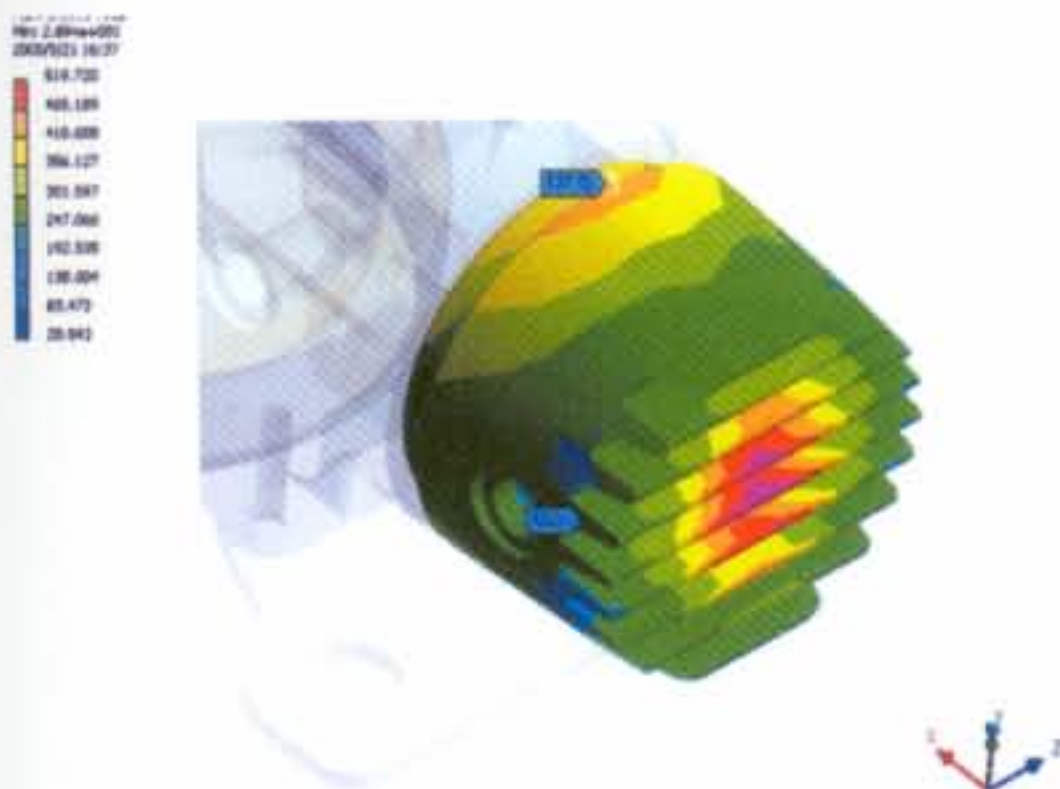


Figura 9: Nivel de tensión en un componente de la cabeza del cilindro. Hay que prestar una atención especial a las discontinuidades, como transiciones de forma y huecos para tubos



Sin embargo, el enfoque general de la norma conduce a una postura mucho más conservadora en el diseño de los componentes y en los criterios de seguridad.

Este enfoque tiende a no conseguir un diseño optimizado en lo que concierne a la optimización de la selección de material, espesor y esfuerzo de todos los componentes y los criterios para el modo de fallo, dando un resultado normalmente bastante alto en el factor de seguridad.

Así pues, una vía eficiente para diseñar un compresor de este tipo sería aquél en el que todos los aspectos involucrados se comprendan bien y se analicen en profundidad. Por ejemplo, en vez de escoger un material exactamente de acuerdo con la especificación de la norma, que puede llevar a un coste más elevado que otro más barato, puede calcularse la tensión actual del componente a través del análisis avanzado FEA y la verificación experimental. Este enfoque se denomina por algunos *Diseño por el Análisis* en vez de *Diseño por las Reglas*.

El Análisis por Elementos Finitos permite que la ingeniería de diseño disponga una comprensión en profundidad del comportamiento de un componente, y logre un mejor diseño, en el que cada parte de la estructura se optimiza para una condición de trabajo de este tipo.

Esto conduce a un razonable factor de seguridad, que no llega a ser tan pequeño que resulte peligroso, pero no tan elevado que haga el proyecto de compresor inviable desde el punto de vista económico.

Este enfoque de Análisis por Elementos Finitos en el desarrollo del compresor y de sus componentes ha representado

un importante punto de discusión: la actualización requerida de algunas normas vigentes para compresores domésticos y comerciales en el sector de refrigeración.

Principalmente aquéllos que se han desarrollado basándose en el funcionamiento con refrigerantes CFCs a una presión de trabajo mucho más baja que con el CO₂.

6. REFERENCIAS

- [01] ASME, The ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2, ASME, New York, NY, SA, 2005.
- [02] ASME, The ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Subsection NB, ASME, New York, NY, USA, 2005.
- [03] Pissarenko, G. S., Iakovlev, A. P., Matveiev, V. V., *Prontuário de Resistência de Materiais*, Editora Mir Moscou, Tradução para o Português, 1975
- [04] O'Brien, R. I. (ed.), *Jefferson's Welding Encyclopedia*, 18th Edition, American Welding Society, 1997.
- [05] ASME, *Criteria of Section III of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Nuclear Vessels*
- [06] Mackenzie, D. & Boyle, J., *Pressure Vessel Design by Analysis, A Short Course*, ABCM, 1996
- [07] Gerdeen, J. C., *A Critical Evaluation of Plastic Behavior Data and a United Definition of Plastic Loads For Pressure Components*, *Welding Research Council Bulletin # 254*, Nov. 1979

