

**CÁMARA DE VACÍO PARA PRENSADO EN CALIENTE
Y SINTERIZACIÓN A ALTA TEMPERATURA**

ÍNDICE DEL CONTENIDO

1. OBJETIVOS.....	4
2. BLOQUE I: EVALUACIÓN DE MATERIALES.....	7
I.I. ACEROS INOXIDABLES.....	8
I.II. CERÁMICAS REFRACTARIAS.....	20
I.III. FIBRAS CERÁMICAS.....	30
I.IV. ALEACIONES PARA RESISTENCIAS DE CALEFACCIÓN.....	35
I.V. TERMOPARES.....	44
I.VI. MATERIALES CARBONOSOS (GRAFITO).....	54
I.VII. POLÍMEROS (VITON ®).....	58
3. BLOQUE II: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE CADA PIEZA.....	64
II.I. CÁMARA EXTERIOR	65
II.II. BASE PRINCIPAL.....	66
II.III. BASE REFRIGERADA.....	67
II.IV. CERÁMICO REFRACTARIO	67
II.V. RESISTENCIA CALEFACTORA.....	68
II.VI. TERMOPAR.....	69
II.VII. AISLAMIENTO.....	69
II.VIII. PUNZÓN.....	70
II.IX. MATRIZ Y SUFRIDORA.....	71
II.X. CÁPSULA CONCENTRADORA DE CALOR.....	71
II.XI. CAJA DE CONTROLADORES.....	71
II.XII. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	72
II.XIII. SISTEMA DE CONTROL DE VACÍO.....	72
II.XIV. APORTE DE GAS.....	73
II.XV. O-RING.....	73

4. BLOQUE III: REFERENCIAS DE TABLAS.....	74
5. BLOQUE IV: REFERENCIAS FIGURAS.....	76
6. BLOQUE V: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
7. BLOQUE VI: MEMORIA DE CÁLCULO.....	80
VI.I. RESISTENCIA CALEFACTORA.....	81
VI.II. DISEÑO DE RECIPIENTE A PRESIÓN.....	83
VI.III. CÁLCULOS TÉRMICOS.....	86
VI.IV. AJUSTES.....	92
VI.V. TIEMPOS DE MECANIZADO.....	93
VI.VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
8. BLOQUE VII: PLIEGO DE CONDICIONES.....	99
9. BLOQUE VIII: MEDICIONES.....	103
10. BLOQUE IX: PRESUPUESTO.....	109
11. BLOQUE X: PLANOS.....	117

OBJETIVOS DEL PROYECTO



Figura:1 Máquina universal de ensayo tracción compresión. (Foto tomada en el laboratorio de Ingeniería Mecánica y de los Materiales de la Escuela Politécnica Superior)

Se trata del diseño de una cámara de vacío para probetas de materiales sinterizados y prensados, a alta temperatura, que pueda ser usada en la mayoría de máquinas universales de ensayos de tracción/compresión, existentes en las instalaciones del departamento de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y Transporte de la Universidad de Sevilla.

En primer lugar la característica principal debe ser facilidad de montaje, siendo de vital importancia el tamaño disponible en las máquinas de ensayo. Se trata de un equipo, pequeño y fácilmente adaptable a diversas situaciones de uso, ampliando su campo de aplicación tanto para su uso al vacío, atmósfera inerte, presión atmosférica, diferentes rangos de temperatura, tratamientos térmicos, producción de probetas de ensayo mediante sinterizado.

Por otra parte las condiciones de uso deben permitir alcanzar una temperatura de 1400°C. Para disminuir el efecto pernicioso que produce la oxidación a esta temperatura, y las pérdidas térmicas al exterior, se ha incorporado un sistema de vacío, además de una entrada para gas inerte (Argón) que proteja tanto a las probetas que se produzcan como a los mismos elementos constituyentes del conjunto de la cámara. Para disminuir aún más el calor transferido al soporte inferior que soportará la presión a alta temperatura, se ha incluido una pieza en la que circula agua de refrigeración de manera que mantenga el soporte de la máquina de ensayos de tracción a una temperatura que no produzca daños en la misma por creep.

A lo largo del proceso se aplica presión a la probeta mediante una prensa de ensayos para compactar el material en polvo, lo que nos obliga a que los materiales usados en la base del conjunto, así como el soporte para las matrices debe tener elevada resistencia mecánica. Además debe ser buen aislante térmico de modo que se transmita la mínima cantidad posible de calor.

Otro factor a tener en cuenta es el peso del conjunto, si queremos que sea adaptable y en cierto modo portátil. De manera que cualquier usuario pueda utilizarlo en diversas máquinas universales de ensayos de tracción/compresión.

Se trata de un equipo versátil, en el que se ha tenido en cuenta para el dimensionado, el menor de los espacios disponibles en las máquinas universales de ensayos del Departamento de Ingeniería y Ciencia de Materiales y Transporte. Obteniendo así un equipo de reducido tamaño. El espacio del que dispone la máquina de la figura 1, es de 37,5 cm, el espacio entre columnas, y en dirección vertical tenemos un recorrido de unos 50 cm, estas dimensiones son las que nos marcan el tamaño máximo para el equipo que se está desarrollando.

Se ha incluido un sistema automatizado para el control de temperatura y otro sistema para el control de vacío. Se situará en una mesa auxiliar cercana al equipo, en la que se realizarán todas las conexiones.

- . BLOQUE I . -
EVALUACIÓN DE MATERIALES

I.I.-ACERO INOXIDABLE

El acero inoxidable es un material de amplio uso en la ingeniería con muy diversas composiciones para sus múltiples usos. En este trabajo se han estudiado diferentes aceros inoxidables teniendo en cuenta sus resistencias mecánicas, temperaturas de trabajo, conductividad térmica, etc.

El acero inoxidable es el principal material empleado en el diseño de esta cámara, ya que la mayoría de las piezas son de este material.

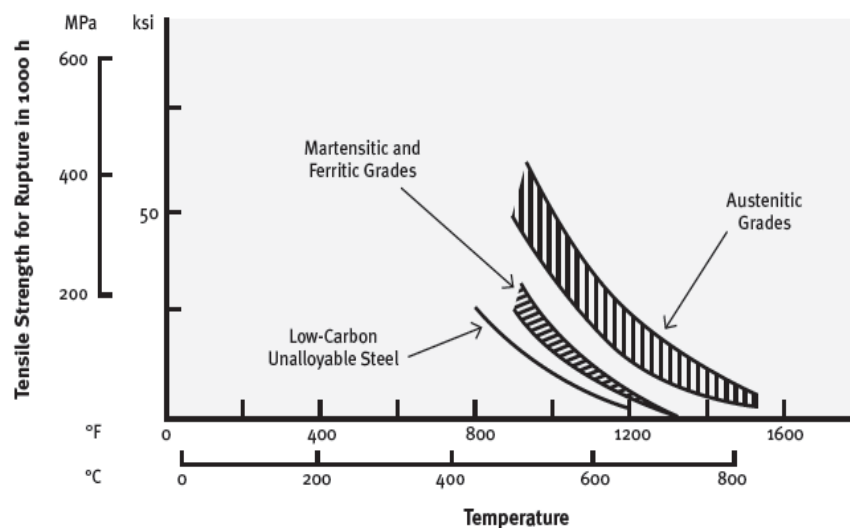


Figura 2. Resistencia tracción contra temperatura según grupo de acero inoxidable.

En la figura 2 observamos los grados de aceros inoxidables y sus respectivas tensiones de ruptura frente a la temperatura, este gráfico es útil para ubicarse en que grupo de acero inoxidable se debe prestar más atención. Se observa que el grupo de los austeníticos se ajustan a priori como los que mejor se adaptan a las necesidades del proyecto.

Tabla 1: Temperaturas de trabajo para distintos aceros inoxidables en aire.

DESIGNACIÓN DEL ACERO			TEMPERATURAS MÁXIMAS DE TRABAJO
CÓDIGO	NOMBRE	DESIGNACIÓN A.I.S.I.	
AC. INOXIDABLES FERRÍTICOS RESISTENTES AL CALOR			
EN-14713	X ₁₀ CrAlSi ₇	-	800
EN-14724	X ₁₀ CrAlSi ₁₃	-	850
EN-14742	X ₁₀ CrAlSi ₁₈	-	1000
EN-14762	X ₁₀ CrAlSi ₂₅	-	1150
EN-14749	X ₁₈ CrN ₂₈	-	1100
AC.INOXIDABLES AUSTENÍTICOS RESISTENTES A CALOR			
EN-14835	X ₉ CrNiSiNCe ₂₁₋₁₁₋₂	S30815	1150
EN-14833	X ₁₂ CrNi ₂₃₋₁₃	309S	1000
EN-14845	X ₈ CrNi ₂₅₋₂₁	310S	1050
EN-14841	X ₁₅ CrNiSi ₂₅₋₂₁	314	1150
AC. INOXIDABLES DÚPLEX			
EN-14821	X ₁₅ CrNiSi ₂₅₋₄	-	1100
AC. INOXIDABLES FERRÍTICOS			
EN-14016	X ₆ Cr ₁₇	430	815
AC. INOXIDABLES MARTENSÍTICOS			
EN-14006	X ₁₂ Cr ₁₃	410	705
AC. INOXIDABLES AUSTENÍTICOS			
EN-14301	X ₅ CrNi ₁₈₋₁₀	304	925
EN-14541	X ₆ CrNi ₁₈₋₁₉	321	925

I.I.I.-TEMPERATURAS DE TRABAJO

Los aceros ferríticos y martensíticos no son aptos para temperaturas de trabajo superiores a 800°C, no obstante los austeníticos, la mayoría de la serie 300 y algunos endurecidos por precipitación si poseen resistencia aceptable a la temperatura de trabajo.

A la vista de la figura 3 podemos decir de antemano que el acero inoxidable austenítico del tipo AISI-316 es el que mayor resistencia a tracción presenta para casi todo el rango de temperaturas.

I.I.II.-PROPIEDADES MECÁNICAS A ALTA TEMPERATURA

Es la cualidad a tener más en cuenta junto con la corrosión, ya que nuestra pieza base, el punzón y la base refrigerada estarán sometidas a compresión. A partir de aquí estudiaremos además el comportamiento a termofluencia (creep).

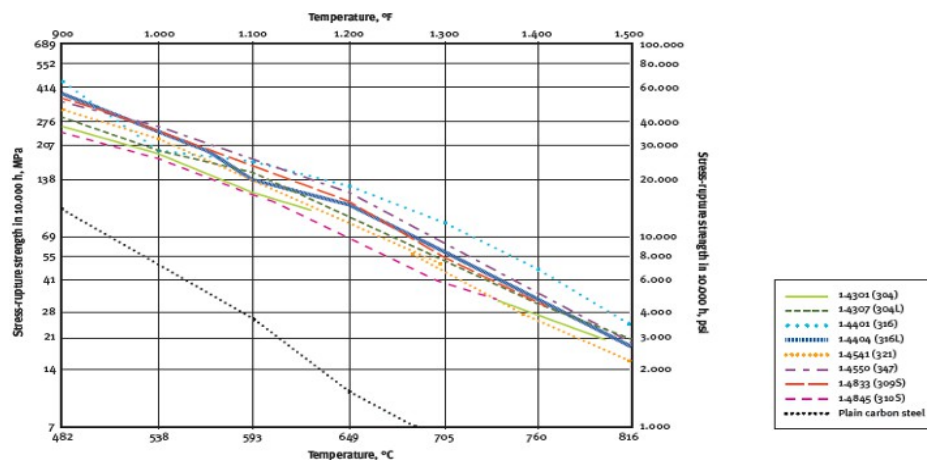


Figura 3: Variación de la resistencia a tracción para diferentes aceros inoxidables austeníticos después de 10.000 h. De permanencia a alta temperatura.

Se observa como los grados austeníticos tienen mejor comportamiento en cuanto a capacidad portante y temperatura lo que hace que sean los principales en estudiar.

Tabla 2. Temperaturas máximas sugeridas para servicio continuo basada en datos de termofluencia y en ruptura.

MATERIALES	TEMPERATURA MÁXIMA BASADA EN TERMOFLUENCIA		TEMPERATURA MÁXIMA BASADA EN RUPTURA	
	°C	°F	°C	°F
ACERO AL CARBONO	450	850	540	1000
AC. AL CARBONO 0,5Mo	510	950	595	1100
AC. 2,25Cr-1 Mo	540	1000	650	1200
AC. INOXIDABLE 304	595	1100	815	1500
ALEACION BASE Ni C-276	650	1200	1040	1900

La resistencia a la termofluencia es dependiente de la temperatura y el tiempo de exposición, se debe valorar el grado de deformación que puede alcanzar la pieza, la cual debe mantenerse prácticamente intacta para poder mantener las condiciones de estanqueidad requeridas. En este contexto los aceros austeníticos son los que muestran el mayor límite de resistencia.

Cabe señalar que el grupo de las aleaciones ferríticas-martensíticas, del que el tipo AISI-410 es típico, muestran los valores más bajos de capacidad de fuerza como una función de la temperatura de ensayo. La aleación Greek Ascoloy es considerablemente más fuerte que la de tipo 410, con un límite de elasticidad (0,2% de desviación) de 480 MPa y una resistencia a la tracción de 585 MPa a 540 °C. Las capacidades de resistencia a la tracción de H-46, Moly Ascoloy y el tipo AISI-422 son muy similares y son los más altos en este grupo de aleaciones. Los datos obtenidos en el ensayo de tracción, revelan que los alargamientos de todas estas aleaciones son similares, de aproximadamente el 20% de elongación a 21 °C a alrededor de 30% a 650 °C.

La variación de la tensión de rotura y el límite elástico para aleaciones típicas de cada subgrupo se comparan en la figura 4. Hay que señalar que la aleación H-46 contiene niobio y tiene la mayor capacidad de rotura por tracción, con el tipo AISI-422, Moly Ascoloy, y greek Ascoloy, teniendo cada vez más bajas capacidades de ruptura, en ese orden. El tipo acero inoxidable AISI-410 tiene un muy bajo punto de rotura por fatiga y es la más débil de todas las aleaciones inoxidables martensíticas. Las aleaciones que contienen niobio, tales como H-46 por lo general muestran una ventaja en la capacidad de rotura por fatiga (resistencia a la fluencia) para tiempos de ensayo cortos (100 a 1000 h), pero pierden su ventaja de la resistencia en las pruebas para períodos de alrededor de 10.000 h o más.

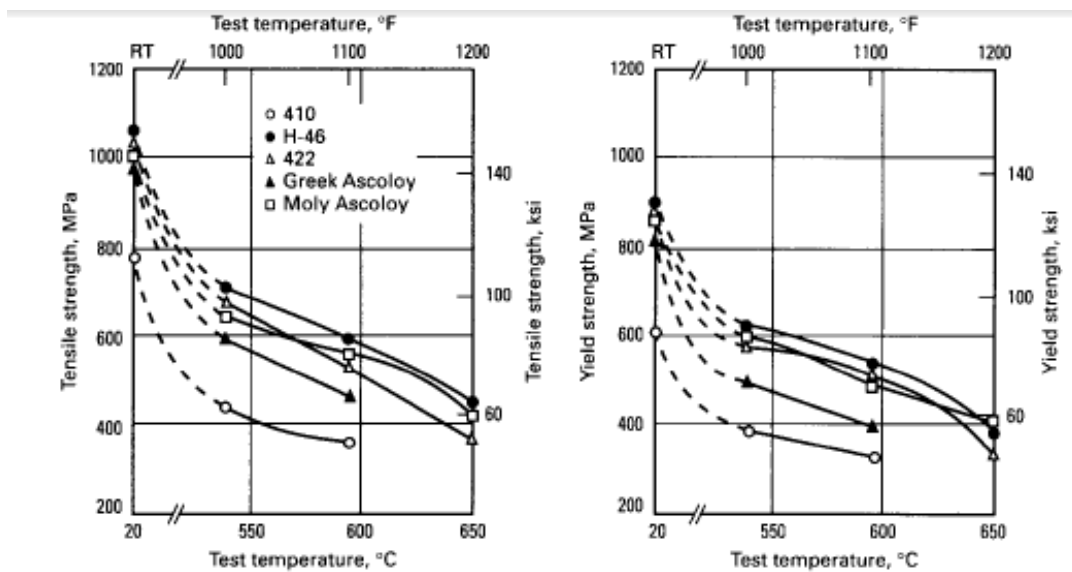


Figura 4. Resistencia a tracción para diferentes aleaciones a diferentes temperaturas.

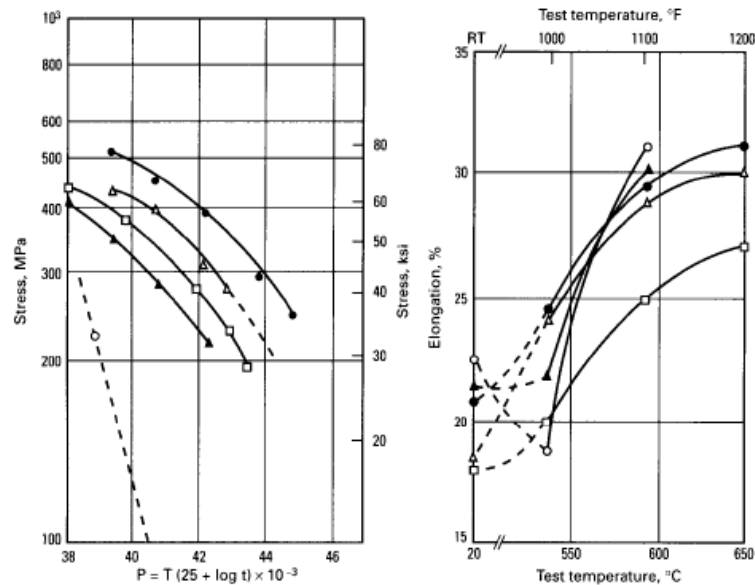


Figura 5. Curvas para las mismas aleaciones de la figura 4, Parámetro P, frente a temperatura; y Elongación frente a la temperatura.

I.I.III.-PROPIEDADES DE TERMOFLUENCIA

La resistencia a termofluencia o creep, es la capacidad que tiene un material de resistir una tensión constante a alta temperatura, sin que en este se produzcan grietas o deformaciones.

Para este diseño es importante tener en cuenta este factor ya que, aunque las temperaturas a las que está sometido no son excesivamente altas, pero los ciclos si podría llegar a perjudicar ciertos componentes.

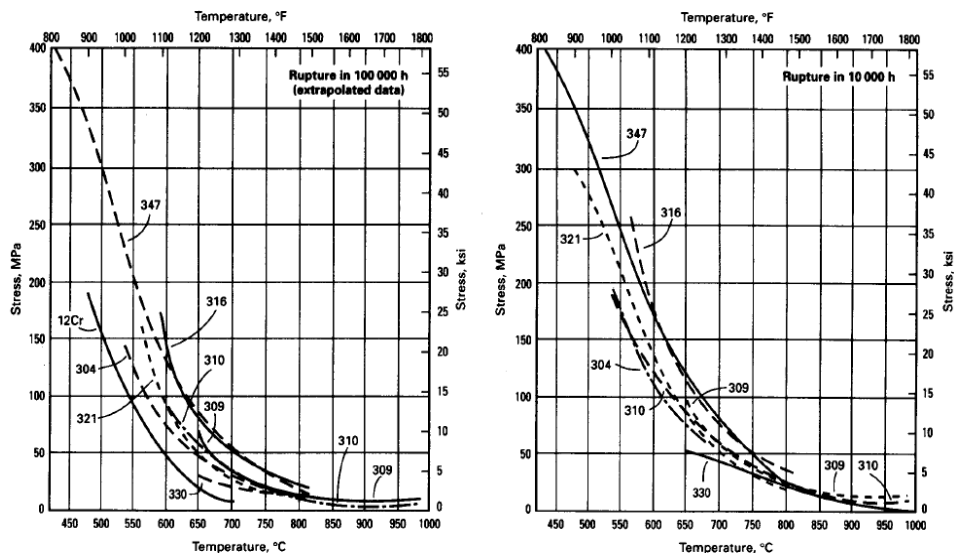


Figura 6: Curva de tensión-fractura para varios aceros inoxidable austeníticos datos extrapolados de ruptura a 100.000 horas (izquierda); ruptura en 10.000 horas (derecha).

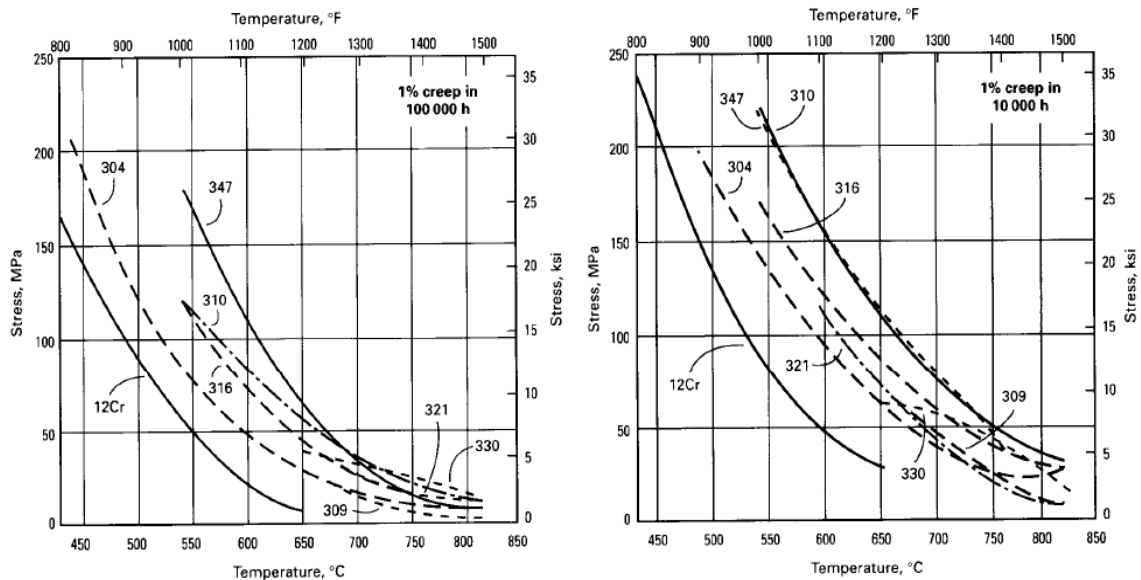


Figura 7: Curva de tensión-temperatura para varios aceros inoxidable (izquierda) con 1% termofluencia a 100.000 horas; (derecha) en 10000 horas.

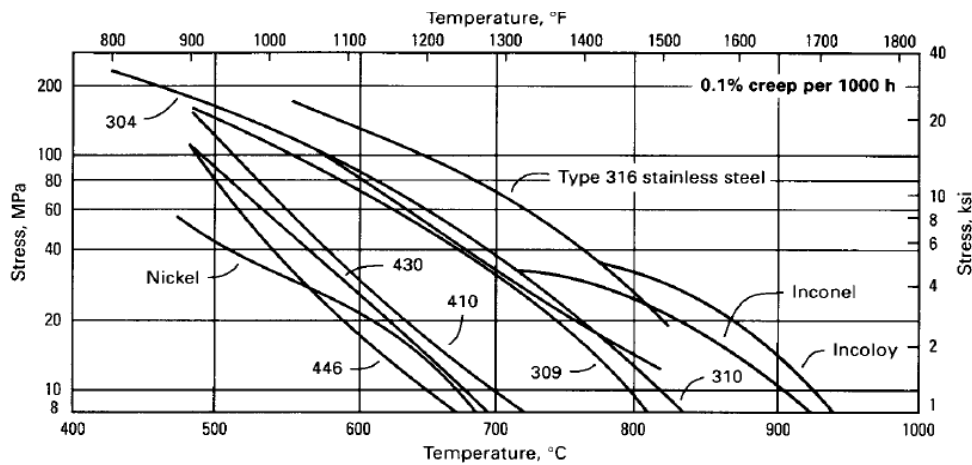


Figura 8: Curva Tensión-Temperatura para diferentes grados de aceros inoxidables, al 0,1% termofluencia por 1000 horas.

En la gráfica de la figura 8 se observa la tensión para un 0,1 % de elongación durante termofluencia a 1000°C de varios metales. Algunas aleaciones como el Inconel tienen gran resistencia a la termofluencia, no obstante su resistencia mecánica es bastante inferior, para ensayos a menor temperatura. En el caso del acero inoxidable austenítico tipo AISI-316 se observa mayor resistencia tanto por la temperatura como por la tensión absorbida.

Para el intervalo de tiempo-temperatura, las aleaciones cromo-níquel-molibdeno tienen mayores resistencia a la rotura por tensión que las aleaciones de la serie 300, con las siguiente excepciones: El acero inoxidable tipo AISI-316 y el AISI-347 son más resistentes que Nitronic 60. La resistencia a la propagación de grietas entre estas aleaciones es mayor a las temperaturas de ensayo más bajas (540 °C a 700 °C) y se convierte progresivamente menor, a medida que aumenta la temperatura, aproximadamente a 980 °C, donde todas las aleaciones exhiben ruptura en la hora 1000 con tensiones de aproximadamente 7 a 10 MPa. Los aceros inoxidables austeníticos de los tipos AISI-304 y AISI-310 tienen el mínimo de ruptura a tensión.

I.I.IV.-PROPIEDADES CONTRA CORROSIÓN

La exposición continuada a alta temperatura puede provocar empobrecimiento o sensibilización y disminuir así la resistencia contra la corrosión. Usualmente esta degradación es causada por la precipitación de carburos hacia los límites de grano, corrosión intergranular, y es dependiente del tiempo, de la temperatura y del ambiente al que sea expuesto.

La resistencia contra la corrosión en los aceros inoxidable depende de la barrera de óxido que lo aísla de la atmósfera circundante. La protección será función del espesor de esta capa protectora así como su continuidad y coherencia, adherencia al metal base y la difusividad del óxido y el metal.

A elevada temperatura usa un modelo similar de protección, pero a baja temperatura la película pasiva es no porosa, insoluble y autoregenerable si se rompe en presencia de oxígeno.

Si se rompe la capa en ambientes que no favorezcan la creación de la capa pasiva, puede incluso corroerse más rápido que un acero convencional.

El contenido en Cromo debe ser relativamente alto, y el de Níquel oscilará entre un 8 y un 10% para mejorar la resistencia a la corrosión fatiga. El contenido en Carbono debe ser el mínimo posible para así evitar la precipitación de las fases secundarias a alta temperatura. Debería de estar presente algún contenido de Molibdeno que favorezca la fase austenítica y disminuya la segregación, aunque también disminuye algunas propiedades mecánicas. Sería deseable un contenido mínimo en Vanadio o Titanio para conferir estabilidad a la fase austenítica.

Tabla 3: Peso ganado por unidad de superficie y tiempo entre 815°C y 1090°C y la hora 900 y 1000 (10^{-5} g/in²h) para diferentes aceros inoxidables.

TIPO	815°C	870°C	925°C	980°C	1090°C
AISI-446	0.0	0.0	2.0	-	11.5
AISI-310	-	0.0	-	1.0	2.5
AISI-304	0.0	-	22.0	75.0	-
AISI-410	38.0	28.0	-	125.0	-

Para la base podría usarse un acero inoxidable martensítico del tipo 410, se trata de un acero de uso general, que se utiliza para las válvulas de vapor, ejes de bombas, pernos, y diversas piezas que requieren resistencia a la corrosión y resistencia moderada hasta 540 °C. El tipo AISI-403 es similar al AISI-410, pero es la composición química puede ajustarse para evitar la formación de ferrita- δ en secciones pesadas. Se utiliza ampliamente para las palas del rotor de la turbina de vapor y turbinas de gas álabes del compresor que operan a temperaturas de hasta 480 °C. Para este tipo de aplicación el acero se temple a 590 °C (1100 °F) o por encima, después de lo cual la fragilización es insignificante en el rango de temperatura de servicio de 370 °C a 480 °C.

Un tratamiento térmico satisfactorio para estos aceros es austenizar a 950°C a 980 °C , se enfría rápidamente en el aire o aceite.

Las aplicaciones que utilizan las capacidades de resistencia al calor de los aceros inoxidables austeníticos pueden ser partes de horno, tubos de intercambiadores, tuberías de vapor, sistemas de escape en motores alternativos y turbinas de gas, partes de postcombustión, y partes similares que necesitan resistencia a la oxidación.

El acero inoxidable del tipo AISI-304 tiene buena resistencia a la corrosión atmosférica y la oxidación a alta temperatura. Los aceros inoxidables austeníticos de los tipos AISI-309 y AISI-310 poseen un mayor rango en estas propiedades debido a su mayor contenido en níquel y en cromo. El tipo AISI-310 es útil en ciclos térmicos, debido a que forma una película más adherente que el tipo AISI-309. Éstos dos últimos se utilizan para piezas tales como hojas de fogones, revestimientos horno o deflectores de calderas...

Los aceros inoxidables austeníticos pueden ser susceptibles a la corrosión intergranular en algunos entornos. Esto ocurre cuando estos aceros se exponen a temperaturas entre 500 °C y 900 °C y se difunde el carbono a los límites de grano para formar carburos de cromo. La formación de estos carburos puede reducir significativamente la cantidad de cromo en la aleación, deteriorando la resistencia a la corrosión en los límites de grano.

La corrosión intergranular se suele producir en las zonas afectadas por el calor de soldaduras. Los aceros inoxidable austeníticos de los tipos AISI-321 y AISI-347 (mediante un tratamiento térmico para formar carburos de titanio y niobio, respectivamente) y naturalmente, los grados bajos en carbono, como el AISI-304L y el AISI-316L son resistentes a la corrosión intergranular, debido a su bajo contenido en carbono. El ataque intergranular se limita generalmente a los ambientes acuosos. Los aceros inoxidable austeníticos de los tipos AISI-321H y AISI-347H se utilizan en aplicaciones en las que la corrosión intergranular puede ser un problema, es posible aplicar un tratamiento de estabilización adicional a una temperatura de alrededor de 900 °C para producir carburos de titanio, y carburos de niobio, muy estables a alta temperatura y por lo tanto reducir el contenido de carbono disponible para formar carburo de cromo.

Los aceros inoxidable de los tipos AISI-321 y AISI-347 se pueden utilizar donde el tratamiento de solución después de la soldadura no es posible, tal como en las líneas de vapor y tubos calentadores, sistemas de escape de motores alternativos y turbinas de gas que funcionan a temperaturas de 425 °C a 870 °C. Los aceros inoxidable de los tipos de bajo carbono, como son el AISI-304L y el AISI-316L se utilizan para aplicaciones similares, pero son más susceptibles al ataque intergranular durante una larga exposición a alta temperatura.

El acero inoxidable austenítico AISI-316 tiene mejores propiedades mecánicas que el AISI-304 o el AISI-321 y es más resistente a la corrosión en algunos medios, tales como ácidos grasos a temperaturas elevadas y soluciones suaves de ácido sulfúrico. La resistencia a la tracción y resistencias a la fluencia para los aceros inoxidable austeníticos de los tipos AISI-304, AISI-304L, AISI-316 y AISI-316L pueden ser aumentadas con adiciones de nitrógeno. Estas modificaciones son designadas como AISI-304N (UNS S30451), AISI-304LN (UNS S30454), AISI-316N (UNS S31651), y AISI-316 LN (UNS S31653).

I.I.V.-PROPIEDADES TÉRMICAS

Tabla 4: Propiedades térmicas de distintos grados de aceros inoxidable.

Tipo (AISI)	E(Gpa)	CTE 0 a 538°C(coef. Expansion)			Conductividad térmica	
		100 °C $\mu\text{m/m} \cdot$ °C	315 °C $\mu\text{m/m} \cdot$ °C	538 °C $\mu\text{m/m} \cdot$ °C	at 100 °C W/m.K	at 500 °C W/m · K
304	193	17.2	17.8	18.4	16.2	21.5
309	200	15	16.6	17.2	15.6	18.7
310	200	15.9	16.2	17	14.2	18.7
316	193	15.9	16.2	17.5	16.2	21.5
405	200	10.8	11.6	12.1	27.0	-
17-7PH	204	11.0	11.6	16.4	16.4	21

Se observa que el tipo acero inoxidable AISI-310 es el que ofrece menor conductividad térmica a diferentes temperaturas. No obstante no ofrecen muchas diferencias entre ellos exceptuando el 405, en tal caso, cualquiera de los mostrados en la tabla 4 ofrecen valores bastante constantes a lo largo de un rango de temperaturas considerable.

Para mantener las condiciones de estanqueidad a lo largo de todo el campo de temperaturas, se requiere un coeficiente de expansión o dilatación térmica bajo, ya que con el aumento de la temperatura no deben producirse deformaciones que puedan desembocar en desajustes, ya que estos podrían dar lugar a posibles puntos de filtración de aire, afectando a la composición de los materiales de ensayo, problemas por oxidación a alta temperatura, cambios en las condiciones de producción que trabajaría casi a presión atmosférica.

Derivado de este planteamiento surge la condición de que para dos elementos o más que encajen el uno sobre el otro, a alta temperatura, se produzca en ambos una dilatación igual o muy similar, así se mantienen las proporciones en las diferentes partes del conjunto, entre ambos se mantiene el contacto continuando el conjunto completamente estanco.

Es importante un valor pequeño de conductividad térmica, ya que el calor transferido al exterior es un valor dependiente de la conductividad del material. Así un acero de menor conductividad térmica producirá mayor gradiente de temperaturas, es decir, la temperatura al otro lado del foco caliente será menor conforme menor sea el valor de conductividad térmica.

I.II.-CERÁMICAS REFRACTARIAS

Los refractarios silico-aluminosos constituyen el 70% de los materiales refractarios utilizados en la industria. Debido a las condiciones cada vez más severas a las cuales son sometidos y a su incidencia en los costos de producción de la industria que los utiliza, la tendencia es hacia el consumo creciente de refractarios de alto contenido de alúmina, los cuales, por su menor costo, son fabricados en su mayor parte, a base de bauxita natural calcinada.

La cordierita ($2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot 2\text{MgO}$) y la mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) constituyen una clase de materiales cerámicos técnicamente importante aplicable a una gran variedad de áreas.

Sin embargo, la cordierita presenta la desventaja de poseer propiedades mecánicas no muy buenas y un coeficiente de expansión térmica muy inferior al del silicio.

Por otro lado, la mullita se emplea como material estructural debido a sus excelentes propiedades mecánicas aún a altas temperaturas y se considera un material adecuado para su uso en electrónica. El agregado de mullita a materiales de cordierita permite ajustar el coeficiente de expansión térmica del material compuesto.

I.II.I.-PROPIEDADES MECÁNICAS EN FUNCIÓN DE LA POROSIDAD

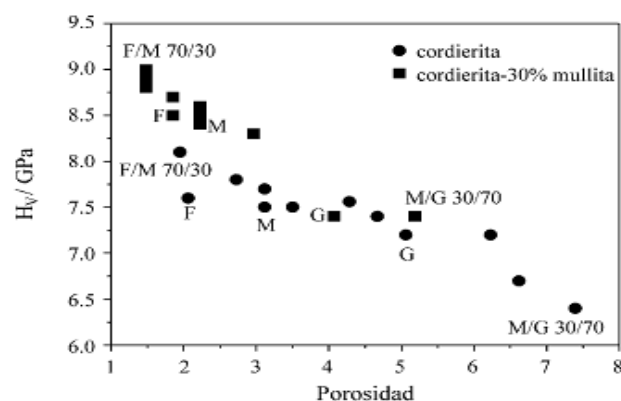


Figura 9: Variación de la dureza Vickers de los materiales cordierita y cordierita 30% mullita

Tanto los valores de dureza de los materiales de cordierita G, M y F como los de los mismos con 30% de mullita siguen el orden $H_V(G) < H_V(M) < H_V(F)$ con la disminución de la porosidad. Los valores máximos y mínimos de dureza para los materiales de cordierita y cordierita-30% mullita corresponden a las materiales de cordierita F/M 70/30 (8,1 y 9 GPa) y M/G 30/70 (6,4 y 7,4 GPa).

La tenacidad a la fractura (K_{IC}) disminuye con el aumento de la porosidad de 1,90 a 1,67 y de 2,03 a 1,83 MPam para los materiales de cordierita y cordierita-30% mullita, respectivamente.

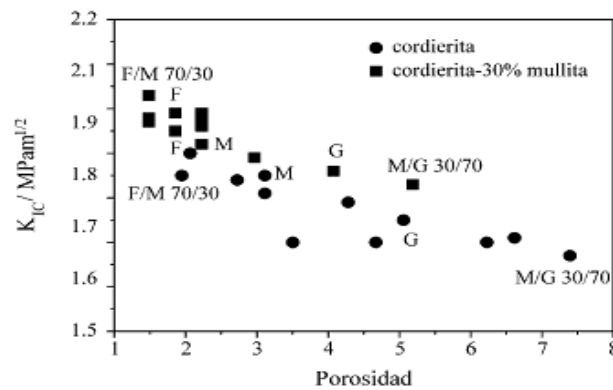


Figura 10: Variación del factor crítico de intensidad de tensiones en función de la porosidad para materiales de cordierita y cordierita más 30% mullita.

Tanto los valores de tenacidad obtenidos para las fracciones simples como los de estas fracciones con 30% de mullita siguen el mismo orden de variación que los de dureza $K_{IC}(G) < K_{IC}(M) < K_{IC}(F)$ con el incremento en la porosidad de estos materiales. Asimismo, los valores extremos corresponden a las matrices de cordierita F/M 70/30 que presentó la menor porosidad (1,90 y 2,03 MPam^{1/2}) y M/G 30/70 (1,67 y 1,83 MPam^{1/2}), matriz con la porosidad más alta. Considerando que en estos materiales el tamaño de poro es del orden del tamaño de grano ($D_{50} \approx 0,5 \mu m$), el efecto de las grietas (defecto crítico mayor que el tamaño del poro) a lo largo del borde de grano será dominante. A mayor porosidad, el aumento de la cantidad de poros actuando como concentradores de esfuerzos explicaría la disminución en el valor de K_{IC} por un efecto combinado del poro y la grieta cuando esta propaga.

Los valores medidos de los coeficientes de expansión térmica de los materiales de cordierita ($\alpha_{\text{cordierita}} = 2,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) y cordierita-30% mullita ($\alpha_{\text{compuesto}} = 3,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) confirman que con el agregado de este porcentaje de mullita, se logra ajustar el coeficiente de expansión del material compuesto al del silicio ($\alpha_{\text{silicio}} = 3 - 3,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) según se había obtenido por cálculo.

El análisis de refractariedad arrojó como resultado que las muestras poseían una refractariedad a cono Orton superior 37; ello quiere decir que a 1820°C (como mínimo), el material mantiene su estabilidad química y dimensional. El ensayo también mostró que los conos no sufrieron una deformación apreciable, lo que indica que sus refractariedades podrían ser aún mayores. El buen resultado de este análisis muestra también, que las cantidades de sodio en las muestras no afecta el producto final y que el exceso de alúmina puede ayudar a la refractariedad del material.

I.II.II.-MULLITA

La Mullita es un excelente material estructural debido a su alta estabilidad térmica, resistencia y resistencia a la fluencia. Tiene un dieléctricas bajas capacidades eléctricas constantes y de alto aislamiento.

Las aplicaciones típicas incluyen muebles del horno, horno de tubo central, las piezas de intercambio de calor, las piezas de aislamiento térmico y los rodillos.

Tabla 5: Propiedades Mullita

PROPIEDADES	UNIDADES	PRUEBA	VALOR
FÍSICO			
Fórmula Química	-	-	$3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$
La densidad, ρ	g / cm^3	ASTM C20	2,80
Crystal Structure	-	-	ortorrómbica
Dureza	Mohs	-	8
Dureza	Knoop (kg / mm^2)	Knoop 100g	1450
MECÁNICO			
Resistencia a la compresión	MPa	ASTM C773	551
Resistencia a la Tracción	MPa	ACMA Prueba n° 4	103,5
Módulo de Elasticidad (Young Mod).	GPa	ASTM C848	150
Relación de Poisson, ν	-	ASTM C818	0,25
La tenacidad de fractura, K_{Ic}	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	Prueba del haz con muesca	2,0
TÉRMICO			
Max. Utilice Temperatura (* Indica atm inerte.)	$^{\circ}\text{C}$	No hay carga cond.	1700
Resistencia al choque térmico	$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	Enfriamiento	300
Conductividad térmica	W / mK	ASTM C408	3,5
Coefficiente de expansión térmica lineal, α_{v_1}	$\mu \text{m/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ($\sim 25^{\circ}\text{C}$ hasta $\pm 1000^{\circ}\text{C}$)	ASTM C372	5,3
Calor específico, c_p	$\text{cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$	ASTM C351	0,23
ELÉCTRICO			
Constante Dieléctrica	1MHz	ASTM D150	6.0
Rigidez dieléctrica	kV / mm	ASTM D116	9,8
Resistividad eléctrica	Ωcm	ASTM D1829	10^{13}

I.II.III.-CORDIERITA

Cordierita es principalmente una cerámica estructural, a menudo usados para los muebles del horno debido a su choque térmico muy bueno.

Esto es principalmente una cerámica estructural, a menudo usados para los muebles del horno debido a su resistencia al choque térmico muy bueno.

Al igual que otros materiales cerámicos estructurales, sino que también tiene una buena capacidad de aislamiento térmico y eléctrico.

Tabla 6: Propiedades Cordierita

PROPIEDADES	UNIDADES	PRUEBA	VALOR
FÍSICO			
Fórmula Química	-	-	$2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$
La densidad, ρ	g / cm^3	ASTM C20	2,60
Crystal Structure	-	-	ortorrómbica
Dureza	Mohs	-	7
Dureza	Knoop (kg / mm^2)	Knoop 100g	-
MECÁNICO			
Resistencia a la compresión	MPa	ASTM C773	350
Resistencia a la Tracción	MPa	ACMA Prueba n ° 4	25,5
Módulo de Elasticidad (Young Mod).	GPa	ASTM C848	70
Relación de Poisson, ν	-	ASTM C818	0,21
La tenacidad de fractura, K_{Ic}	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	Prueba del haz con muesca	-
TÉRMICO			
Max. Utilice Temperatura (* Indica atm inerte.)	$^{\circ}\text{C}$	No hay carga cond.	1371
Resistencia al choque térmico	$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	Enfriamiento	500
Conductividad térmica	W / mK	ASTM C408	3,0
Coefficiente de expansión térmica lineal, $\alpha_{\text{v l}}$	$\mu\text{m/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ($\sim 25^{\circ}\text{C}$ hasta $\pm 1000^{\circ}\text{C}$)	ASTM C372	1,7
Calor específico, c_p	$\text{cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$	ASTM C351	0,35
ELÉCTRICO			
Constante Dieléctrica	1MHz	ASTM D150	4,7
Rigidez dieléctrica	kV / mm	ASTM D116	5,11
Resistividad eléctrica	Ωcm	ASTM D1829	10^{14}

I.II.IV.-ESTEATITA L-5

Este material tiene aplicaciones en aislamiento y resistencia a alta temperatura. Usado como aislantes y separadores.

El coste de este material es relativamente bajo en comparación con otros materiales de cerámica.

Tabla 7: Propiedades Esteatita L-5

PROPIEDADES	UNIDADES	PRUEBA	VALOR
FÍSICO			
Fórmula Química	-	-	H ₂ Mg ₃ (SiO ₃) ₄
La densidad, ρ	g / cm ³	ASTM C20	2,71
Crystal Structure	-	-	hexagonal
Dureza	Mohs	-	7,5
Dureza	Knoop (kg / mm ²)	Knoop 100g	-
MECÁNICO			
Resistencia a la compresión	MPa	ASTM C773	621
Resistencia a la Tracción	MPa	ACMA Prueba n ° 4	62
Módulo de Elasticidad (Young Mod).	GPa	ASTM C848	138
Relación de Poisson, ν		ASTM C818	-
La tenacidad de fractura, K_{Ic}	MPa xm ^{1/2}	Prueba del haz con muesca	-
TÉRMICO			
Max. Utilice Temperatura (* Indica atm inerte.)	° C	No hay carga cond.	1425
Resistencia al choque térmico	ΔT (° C)	Enfriamiento	190
Conductividad térmica	W / mK	ASTM C408	2,9
Coefficiente de expansión térmica lineal, α_{v1}	μ m/m- ° C (~ 25 ° C hasta \pm 1000 ° C)	ASTM C372	7.0
Calor específico, c_p	cal/g- ° C	ASTM C351	0,22
ELÉCTRICO			
Constante Dieléctrica	1MHz	ASTM D150	6,3
Rigidez dieléctrica	kV / mm	ASTM D116	9,3
Resistividad eléctrica	Ω cm	ASTM D1829	10 ⁴

I.II.V.-ALÚMINA 99,5%

La alúmina representa el material más comúnmente utilizado en la industria cerámica. Los niveles de pureza están disponibles a partir de 85% hasta 99,9%. Esto es debido a la abrasión, alta temperatura y resistencia química. Este material tiene una relación excepcional entre coste y vida útil.

Las aplicaciones incluyen el desgaste y revestimientos resistentes al calor, mecánicos y sellos de la bomba, inyectores, componentes de equipos de semiconductores, aislantes, etc

Tabla 8: Propiedades Alúmina 99,5%

PROPIEDADES	UNIDADES	PRUEBA	VALOR
FÍSICO			
Fórmula Química	-	-	Al_2O_3
La densidad, ρ	g / cm^3	ASTM C20	3.7-3.97
Crystal Structure	-	-	hexagonal
Dureza	Mohs	-	9
Dureza	Knoop (kg / mm^2)	Knoop 100g	2000
MECÁNICO			
Resistencia a la compresión	MPa	ASTM C773	2070-2620
Resistencia a la Tracción	MPa	ACMA Prueba n ° 4	260-300
Módulo de Elasticidad (Young Mod).	GPa	ASTM C848	394
Relación de Poisson, ν	-	ASTM C818	0,27
La tenacidad de fractura, K_{Ic}	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	Prueba del haz con muesca	4,5
TÉRMICO			
Max. Utilice Temperatura (* Indica atm inerte.)	$^{\circ}\text{C}$	No hay carga cond.	1750
Resistencia al choque térmico	$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	Enfriamiento	200
Conductividad térmica	W / mK	ASTM C408	35
Coefficiente de expansión térmica lineal, $\alpha_{\nu l}$	$\mu \text{m/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ($\sim 25^{\circ}\text{C}$ hasta $\pm 1000^{\circ}\text{C}$)	ASTM C372	8,4
Calor específico, c_p	$\text{cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$	ASTM C351	0,21
ELÉCTRICO			
Constante Dieléctrica	1MHz	ASTM D150	9,6
Rigidez dieléctrica	kV / mm	ASTM D116	15
Resistividad eléctrica	Ωcm	ASTM D1829	$> 10^{14}$

La resistencia mecánica, como apuntamos al principio de este apartado, no es un factor decisivo. No obstante, el coeficiente de expansión térmica no es demasiado alto, con lo que reúne las cualidades necesarias.

I.II.VI.-ALÚMINA MECANIZABLE (RESCOR)

El Rescor 960, es una cerámica mecanizable con el 96% de Alúmina y que puede ser utilizado hasta 3000°F (1648°C). El mecanizado puede ser realizado mediante máquinas convencionales y equipamiento estándar y no se requiere de ningún tratamiento térmico. Las propiedades químicas, eléctricas y térmicas son equivalentes a las de un cerámico de alta alúmina típico.

El rescor está muy recomendado para aplicaciones eléctricas, electrónica, metalúrgica y aplicaciones al vacío.

Tabla 9: Resumen principales propiedades para los distintos cerámicos estudiados.

PROPIEDADES	MULLITA	CORDIERITA	ESTEATITA L-5	ALÚMINA
DENSIDAD (g/cm ³)	2,8	2,60	2,71	3,7-3,97
DUREZA (Mohs)	8	7	7,5	9
M. ELASTICIDAD (GPa)	150	70	138	394
TENACIDAD (MPa x m ^{1/2})	2,0	-	-	-
RES. CHOQUE TÉRMICO (Δ T (° C))	300	500	190	200
CONDUCTIVIDAD (W / mK)	3,5	3,0	2,9	35
COEF. EXPANSIÓN (μ m/m- ° C (~ 25 ° C hasta ± 1000 ° C))	5,3	1,7	7,0	8,4

I.III.-FIBRAS CERÁMICAS REFRACTARIAS (AISLAMIENTO)

I.III.I.- INTRODUCCIÓN

La fibra cerámica es un producto flexible que se obtiene en horno eléctrico mediante fusión de óxidos de sílice y aluminio. La fibra cerámica desarrollada como sustitutivo del amianto, se presenta en el mercado con muy diversas configuraciones como mantas, cordones, placas, granel, etc.

Este material presenta una enorme resistencia al choque térmico por lo que es muy apta para ciclos de calentamiento y enfriamiento. Son muy flexibles y ligeras lo que facilita la labor del montaje. Por otra parte, su conductividad térmica es muy baja. Cuando se hidratan, una vez secas recuperan sus propiedades iniciales. Son estancas al aluminio fundido, por eso se usan en hornos de fusión de este material para evitar la fuga si atraviesa el revestimiento refractario.

A diferencia del amianto, las fibras cerámicas no son tóxicas al menos según los ensayos clínicos en los que no se ha extraído ningún dato concluyente. Evidentemente son un producto fibroso existe el peligro latente de que alguna de las fibras que lo constituyen produzca daños en el sistema respiratorio.

I.III.II.-CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA CERÁMICA

En primer lugar la característica más destacada es la gran resistencia al choque térmico. Con lo que es adecuado para soportar ciclos de calentamiento/enfriamiento o zonas que presenten variaciones bruscas de temperatura.

Debido a su conformación, tienen una alta flexibilidad. Por lo tanto, se pueden adaptar a muy diferentes formas geométricas que tenga la zona a revestir. Por otro lado son

estructuras muy ligeras, del orden de $0,2 \text{ g/cm}^3$ lo que facilita la ejecución del revestimiento.

En cuanto a su conductividad térmica podemos decir que es muy baja, es decir muy buen aislante. Así mismo resisten adecuadamente la corrosión y su estabilidad a alta temperatura es buena.

Al contrario del resto de materiales refractarios y contra lo que se podía pensar, presentan contracción con el aumento de la temperatura en lugar de dilatación, idóneos para cierre de juntas de dilatación y sellado.

En cuanto a la resistencia mecánica podemos afirmar que es bajísima, por lo que no serán aptas para zonas en las que soporten esfuerzos mecánicos, esta característica hace que no sean buenos a fricción. Se destruye con relativa rapidez en presencia de atmósferas y es atacada por ácido fluorhídrico y fosfórico. Su resistencia a componentes básicos como sosa o potasa es bastante reducido.

Una de sus peores características es la modificación que sufre con el uso, que no es más que una recristalización. Así con su empleo, el material se vuelve frágil y es aquí donde además de perder su poca resistencia puede dar lugar a que las fibras que lo constituyen contaminen el ambiente, y por lo tanto a las personas que se encuentren en la unidad o manipulándola.

En cuanto a los diámetros de las fibras, se puede indicar a título orientativo, que para las fibras silico-aluminosas, oscila entre 2,2 y 3,3 micras. Para las fibras de circonia el diámetro aumenta, situándose entre 7 y 9 micras.

I.III.III.-NORMAS EN LA FIBRA CERÁMICA

La norma ASTM C167 indica el sistema de determinación de la densidad de la fibra, actualmente la fibra se fabrican según unas densidades normalizadas que indicadas en kg/m^3 son: 48, 64, 96, 128 y 192. Existen 3 temperaturas de clasificación: 1260°C , 1430°C y 1600°C .

La temperatura de clasificación se define como aquella a la cual la fibra sufre una contracción lineal permanente o shrinkage del 2% y del 4% para mantas, papeles, etc. Todo se normaliza según la norma ENV 1094-3. Esta temperatura no se corresponde con la temperatura de servicio, que puede estar situada unos 150°C por debajo de la anterior para trabajos en continuo e intermitente. No debemos hacer trabajar la fibra en temperaturas cercanas a las de clasificación.

En cuanto al contenido de enfibrados la norma ASTM C892 establece un porcentaje del 30% en peso para un diámetro mayor de 120 micras. El infibrado o shot se localiza en las fibras vítras y consiste en una partícula unida en general al extremo de las fibras, formada por el enfriamiento sufrido antes del fibrado.

Referente a la contracción y conductividades encontramos las normas ASTM C356, y ASTM C177, respectivamente.

I.III.IV.-PRESENTACIÓN DE LA FIBRA CERÁMICA

GRANEL: También llamada borra, es la base de todos los productos. Se manufactura todo el resto de presentaciones a partir de esta borra y mediante tejido, se elaboran las mantas.

GRANEL CORTADO: En ciertas ocasiones muy específicas se necesita un granel muy concreto. Posee una longitud máxima predeterminada de sus fibras. Se consiguen así fibras relativamente uniformes. Se usan como aditivo en hormigones, masas, o como relleno de grietas y juntas.

MANTA: Es la presentación por excelencia de la fibra, y se obtiene por el entrelazado de fibras de elevada longitud. El producto presenta gran flexibilidad y relativa facilidad de colocación.

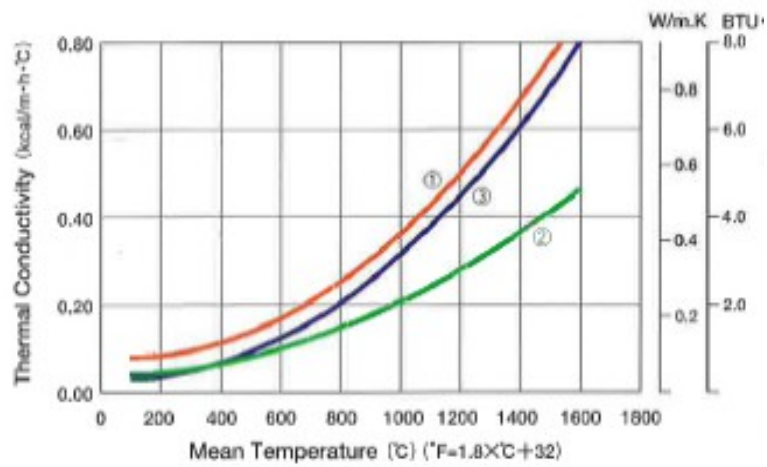


Figura 11: Conductividad térmica a diferentes temperaturas para Fibra cerámica refractaria.

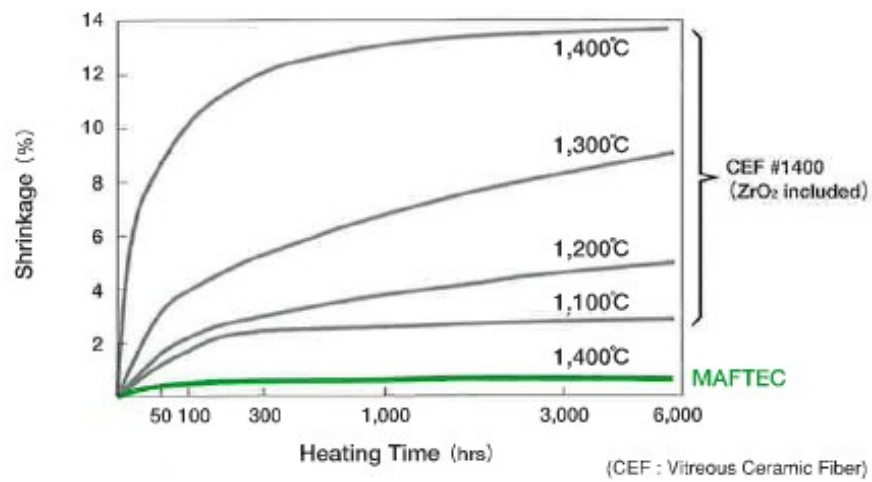


Figura 12: Dilatación lineal en función de la temperatura

I.IV.-ALEACIONES PARA RESISTENCIAS DE CALEFACCIÓN

Se utilizan en muchas aplicaciones de electrodomésticos pequeños y grandes sistemas industriales de procesos de calentamiento y hornos. En los aparatos de calefacción o de procesos industriales, las resistencias son por lo general, bobinas helicoidales de alambre montados en casquillos de cerámica o en un marco de metal adecuado, o cerrados de metal revestido. En los hornos industriales, éstos elementos a menudo deben operar continuamente a temperaturas tan altas como 1300 ° C (2350 ° F) para los hornos utilizados en el tratamiento de industrias de metal, 1700 ° C (3100 ° F) para los hornos utilizados para la cerámica de cocción, y, ocasionalmente, 2000 ° C (3600 ° F) o superior para aplicaciones especiales.

Los requisitos principales de los materiales utilizados para los elementos de calefacción son punto de fusión elevado, alta resistividad eléctrica, coeficiente térmico de resistencia reproducible, buena resistencia a la oxidación, la ausencia de componentes volátiles, y resistencia a la contaminación. Otras propiedades deseables son, buena resistencia a termofluencia y temperatura elevada, emisividad alta, baja expansión térmica, buena resistencia al choque térmico, y buena resistencia y ductilidad a temperaturas de fabricación.

En la tabla 10 se presentan algunas propiedades físicas y mecánicas para materiales de resistencias de calefacción para aplicaciones de horno. De los cuatro grupos de materiales enumerados en estas tablas, las aleaciones del grupo Ni-Cr y de Ni-Cr-Fe son las más ampliamente usadas.

Tabla 10. Propiedades de aleaciones para resistencia eléctrica.

COMPOSICIÓN BÁSICA (%)	RESISTIVIDAD	TCR	POT. TERMOELÉCTRICO CONTRA Cu	COEF. EXPANSIÓN TÉRMICA	RESISTENCIA TRACCIÓN	DENSIDAD
ALEACIONES RADIO						
98Cu-2Ni	50	1400	-13	16,5	205-410	8,9
94Cu-6Ni	100	700	-13	16,3	240-585	8,9
78Cu-22Ni	300	450	-25	16,1	240-515	8,9
MANGANIN						
87Cu-13Mn	480	+/-15	1	18,7	275-620	8,2
83Cu-13Mn-4Ni	480	+/-15	-1	18,7	275-620	8,4
85Cu-10Mn-4Ni	380	+/-10	-1,5	18,7	345-690	8,4
CONSTANTAN						
57Cu-43Ni	500	+/-20	-43	14,9	60-135	8,9
55Cu-45Ni	500	+/-40	-42	14,9	66-125	8,9
53Cu-44Ni-3Mn	525	+/-70	-38	14,9	410-930	8,9
ALEACIONES Ni-Cr-Al						
75Ni-20Cr-3Al-2(Cu,Fe o Mn)	1333	+/-20	1	12,6	825-1380	8,1
72Ni-20Cr-3Al-5Mn	1375	+/-20	1	13	690-1380	7,1
ALEACIONES BASE Ni						
78,5Ni-20Cr-1,5Si	1080	80	3	13,5	790-1380	8,3
76Ni-17Cr-4Si-3Mn	1330	+/-20	-1	15	900-1380	7,8
35Ni-20Cr-43,5Fe-1,5Si	1000	400	-1,1	15,6	585-1135	8,1
ALEACIONES Fe-Cr-Al						
73,5Fe-22Cr-4,5Al	1350	60	-3	11	690-965	7,25
73Fe-22Cr-5Al	1390	40	-2,8	11	690-965	7,15
72,5Fe-22Cr-5,5Al	1450	20	-2,6	11	690-965	7,1
81Fe-15Cr-4Al	1250	+/-50	-1,2	11	620-900	7,43
METALES PUROS						
Aluminio	26,55	4290	-3,4	23,9	50-110	2,7
Cobre	16,73	4270	0	16,5	115-130	8,96
Hierro	970	5000	12,2	11,7	180-220	7,87
Molibdeno	52	3300	6,9	4,9	690-2140	10,22
Níquel	80	6000	-22	15	345-760	8,9

A la vista de los datos de esta tabla las aleaciones hierro-cromo-aluminio, presentan altos niveles de resistividad y a su vez un bajo coeficiente de expansión térmica (a 20°C), también posee bajos valores de TCR (cambio de la resistividad en función de la temperatura).

Los coeficientes de expansión tanto de la resistencia y el aislante sobre el que se enrolla deben ser considerados, ya que se producen tensiones que provocan cambios en la resistencia y coeficiente térmico de resistencia.

Materiales como el Platino o el Oro no se han evaluado debido al alto coste que eso conlleva.

I.IV.I.-ALEACIONES DE COBRE-NÍQUEL

tienen resistividades muy bajas y moderados coeficientes de resistencia térmica (TCR), como se muestra en los cuatro primeros listados en la Tabla 10. La resistividad de aleaciones de radio aumenta, y disminuye TCR, como aumenta el contenido de níquel. La Emf térmica es negativa con respecto al cobre. Debido a sus altos contenidos de cobre, aleaciones de radio tienen baja resistencia a la oxidación y por lo tanto se limitan a aplicaciones que implican bajas temperaturas de funcionamiento.

I.IV.II.-ALEACIONES DE RESISTENCIA DE COBRE-MANGANESO-NÍQUEL

Generalmente se conoce como Manganin, han sido adoptados casi universalmente para resistencias de precisión, alambres deslizantes y otros componentes resistivos con valores de 1 nΩ o menos.

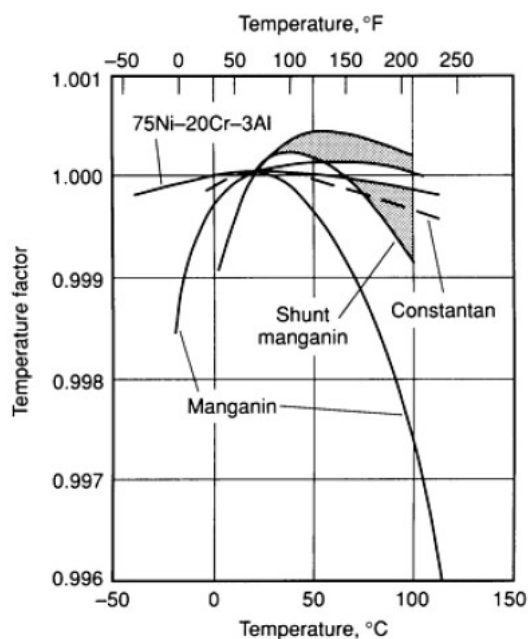


Figura 13: Factor de resistencia con la temperatura

Se observa que las aleaciones Hierro-Cromo-Aluminio poseen mayores conductividades y menor factor de cambio de resistencia con la temperatura, esto indica que son resistencias estables en un amplio rango de temperaturas y que pueden alcanzar valores altos en consecuencia a su alta resistividad.

Tabla 11: Temperaturas de fusión y de operación máxima, en aire para aleaciones Fe-Cr-Al.

COMPOSICIÓN BASICA	PUNTO FUSIÓN APROX. (°C)	MÁX. TEMPERATURA OPERANDO EN HORNO AL AIRE (°C)
83,5Fe-13Cr-3,25Al	1510	1050
81Fe-14Cr-4,25Al	1510	-
79,5Fe-15Cr-5,25Al	1510	1260
73,5Fe-22Cr-4,5Al	1510	1280
72,5Fe-22Cr-5,5Al	1510	1375

Las composiciones de Fe-Cr-Al son también aleaciones dúctiles. Ellos desempeñan un papel importante en los calentadores para los intervalos de temperatura más altas, que se construyen para proporcionar más eficacia sobre un soporte mecánico para el elemento calefactor.

Cabe reseñar que en nuestra cámara, la resistencia calefactora no estará en presencia de aire. De este modo, podemos utilizar la resistencia a mayor temperatura.

I.IV.III.-ALEACIONES NÍQUEL-CROMO Y DE NÍQUEL-CROMO-HIERRO

Las resistividades de Ni-Cr y aleaciones de Ni-Cr-Fe son altas, van desde 1000 hasta 1187 $n\Omega \cdot m$ a 25°C. La figura siguiente demuestra que la resistencia cambia más rápidamente con la temperatura para 35Ni-20Cr-45Fe que para cualquier otra aleación en este grupo. La curva de 35Ni-30Cr-35Fe (que ya no se produce) es similar, pero ligeramente inferior. Las otras cuatro curvas, que son las aleaciones de sustancialmente mayor contenido en níquel. Para estas aleaciones, la velocidad de cambio alcanza un pico alrededor de 540°C (1000°F), y pasa por un mínimo de aproximadamente 760 a 870°C (1400 a 1600°F) y luego vuelve a aumentar. Para las aleaciones de Ni-Cr, el cambio en la resistencia con la temperatura depende del tamaño de la sección y la velocidad de enfriamiento.

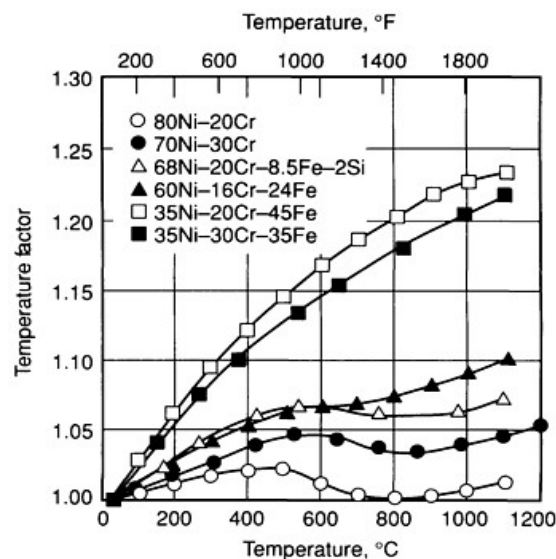


Figura 14: Coeficiente de resistividad en función de la temperatura para distintas aleaciones.

La figura 14 presenta algunos valores típicos de la aleación 80Ni-20Cr. La diferencia máxima (curva A) se produce con pequeñas secciones, que se enfrían rápidamente. El menor cambio se produce para perfiles pesados, que se enfrían lentamente.

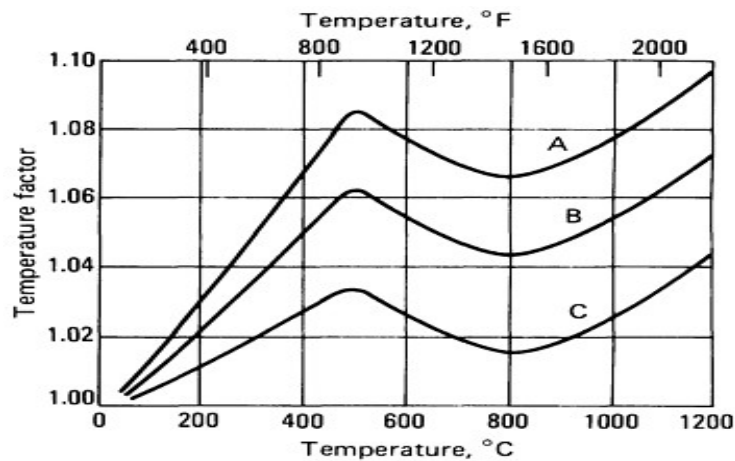


Figura 15: La curva media (curva B) es característico de las secciones de tamaño medio.

Para aplicaciones en las que la resistencia va a estar sometida a intervalos superiores a 1000 °C, se observan cambios significativos al aumentar la temperatura.

I.IV.IV.-ALEACIONES HIERRO-CROMO-ALUMINIO

Las aleaciones para calefacción son más altas en la resistividad eléctrica y de menor densidad que las de aleaciones Ni-Cr y Ni-Cr-Fe. La resistividad de Fe-Cr-Al aleaciones depende tanto de aluminio como del contenido de cromo.

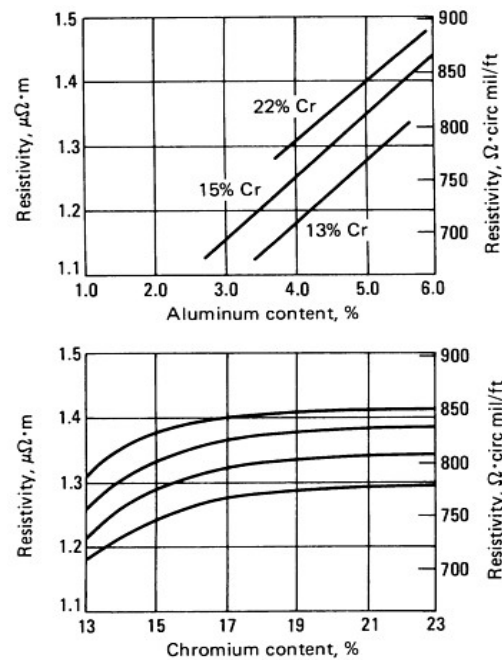


Figura 16: Dependencia de la resistividad frente al contenido de Al y de Cr.

Estas aleaciones tienen una excelente resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas debido a la reacción con el oxígeno atmosférico, forma una capa protectora de alúmina relativamente pura. A aproximadamente 1200 ° C (2200 ° F), este se compone de óxido de Al₂O₃ casi puro.

Este protector de la superficie (gris-blanco) tiene una fuerza dieléctrica extremadamente alta. La resistividad eléctrica de óxido de aluminio es 1012 nΩ·m a temperatura ambiente, y a aproximadamente 1100 ° C (2000 ° F), es todavía 104 nΩ·m.

En condiciones de funcionamiento normales, el deterioro de la capa superficial de óxido, y el agotamiento de aluminio, son bastante lentos, con la condición de que no haya contacto con ciertos materiales refractarios a temperaturas superiores a 980°C (1800 ° F). El tiempo requerido para un cambio del 10% en resistencia varía de 75 a 100% de la vida del calentador (tiempo de agotamiento), en función de la masa fundida particular, el tamaño del calentador y la temperatura de funcionamiento.

La resistencia a tracción de las aleaciones Fe-Cr-Al es relativamente baja. La vida de los calentadores de Fe-Cr-Al también se ve influida por el hecho de que estas aleaciones

muestran grandes aumentos en la resistencia con el tiempo como resultado de sus características de crecimiento de grano.

Tabla 12: Resistencia a tracción a diferentes temperaturas.

MATERIAL DE CALEFACCIÓN	RESISTENCIA TRACCIÓN (MPa)			
	425°C	650°C	870°C	1100°C
ALEACIONES Ni-Cr Y Ni-Cr-Fe				
68,5Ni-30Cr-1,5Si	735	675	205	75
68,5Ni-30Cr-1,5Si	715	620	170	75
68,5Ni-30Cr-1,5Si	760	655	195	75
ALEACIONES Fe-Cr-Al				
79,5Fe-15Cr-5,2Al	480	205	48	-
79,5Fe-15Cr-5,2Al	525	65	14	-
79,5Fe-15Cr-5,2Al	550	345	52	26
METAL PURO				
TUNGSTENO	560	525	395	295
MOLIBDENO	620	585	365	235

Las aleaciones Hierro-cromo-aluminio experimentan un cambio metalúrgico que causa fragilidad después de la exposición cíclica a altas temperaturas. Como resultado, la reparación es más difícil que con níquel-cromo. Sin embargo, los nuevos Fe-Cr-Al han sido desarrollados y superan algunos de los inconvenientes de los tradicionales Fe-Cr-Al. Estos nuevos Fe-Cr-Al se producen con las técnicas metalúrgicas de polvo y los resultados son una aleación que tiene mayor resistencia al calor, así como tener un cambio de resistencia a la temperatura con el tiempo mejor que Cr-Ni.

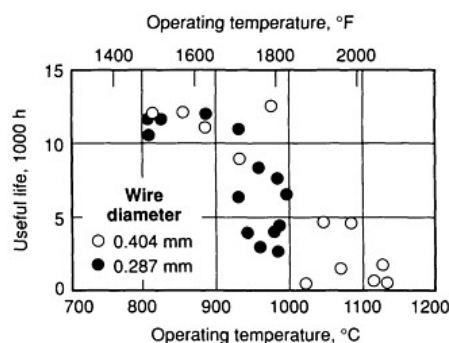


Figura 17: Vida útil (x1000 horas) en función de la temperatura de operación, para diferentes diámetros de alambre.

La Figura 17 presenta los datos sobre la vida de alambre de aleación de 74.5Fe-20Cr-5Al-0.5Co de 0,40 y 0,29 mm de diámetro a una serie de temperaturas. Con Fe-Cr-Al, como con las aleaciones de Ni-Cr, la vida de un calentador de tamaño dado disminuye a medida que la temperatura aumenta.

I.V.-SENSOR DE TEMPERATURA TERMOPAR

I.V.I.-INTRODUCCIÓN

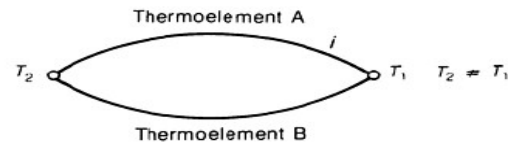
El sensor de temperatura "termopar" es, con mucho, el dispositivo más ampliamente utilizado para la medición de temperatura. Sus características incluyen una buena precisión, idoneidad sobre un amplio rango de temperaturas, resistencia térmica de respuesta rápida y de alta fiabilidad, bajo coste y gran versatilidad de aplicación.

Esencialmente, un termopar es un sistema que consta de un elemento de detección de temperatura, que produce una fuerza electromotriz (fem) que varía con la temperatura, un dispositivo para detección de esa fem, que puede incluir una escala impresa para la conversión de unidades de temperatura y fem equivalente, y para conductores eléctricos (cables de extensión) para conectar el termopar al dispositivo de detección.

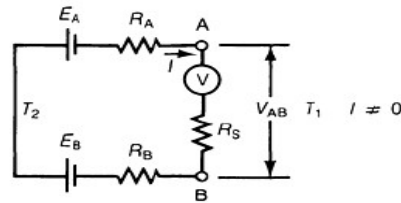
Aunque cualquier combinación de dos metales diferentes y/o aleaciones puede generar una fuerza electromotriz térmica, sólo siete termopares están en uso industrial común hoy en día. Estos siete han sido elegidos en base a sus propiedades mecánicas y químicas, la estabilidad de fem, la reproducibilidad y el costo.

I.V.II.-PRINCIPIOS DEL TERMOPAR

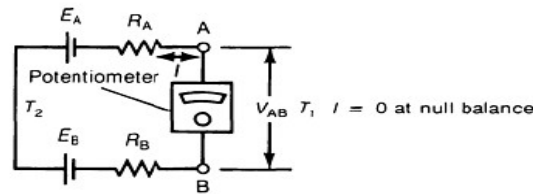
El principio en que se basan termopares fue descubierto por Seebeck en 1821, quien observó que cuando dos metales disímiles están unidos en un circuito cerrado, se genera fuerza electromotriz, si las dos uniones se mantienen a diferentes temperaturas. Esto induce una fem térmica. Esta corriente eléctrica que fluye continuamente a través del circuito, es la denominada fem Seebeck en honor a su descubridor.



(a)



(b)

**Figura 18:** Esquema de funcionamiento de termopares.

La Figura 18 (a) es un diagrama esquemático de dos conductores eléctricos, A y B, cuyas uniones están expuestas a diferentes temperaturas, T_1 y T_2 .

La fem térmica, E_{AB} es una magnitud vectorial. Su módulo y dirección dependen de las características del material de A y B así como la diferencia de temperatura entre las uniones calientes y frías, $T_2 - T_1$, siempre que A y B son de composición homogénea.

E_A es la salida fem de un termopar con referencia a un cierto nivel, y es R_A la resistencia del termopar A. De manera similar, E_B es la salida fem de termopar B con referencia a la misma estándar y R_B es la resistencia del termopar B.

La caída de tensión entre los terminales A y B está dada por la ecuación siguiente: $V_{AB} = E_A - E_B - I(R_A + R_B + R_S)$ donde R_S es la resistencia de una resistencia grande en serie con los elementos termoeléctricos para reducir al mínimo el efecto de la resistencia de

los elementos termoelectricos. Si $E_A - (E_A + V_{AB})$ es positivo, la corriente termoelectrica fluirá continuamente de A a B en la unión fría. En este caso, A se denomina el terminal positivo, y B el termoelemento negativo del termopar.

Con balance cero, no hay flujo de corriente. Todos los términos de la ecuación 2 IR se hacen nulos. Bajo esta condición:

$$V_{AB} = E_{AB} = E_A - E_B$$

Entonces, la fem medida en el potenciometro es la fem térmica del termopar AB. Se puede observar que la fem térmica es independiente de la resistencia, y por lo tanto del diámetro, del cable.

La propiedad termoelectrica de un conductor eléctrico se expresa generalmente en milivoltios contra una referencia común. Platinum 67, debido a su pureza y excelente resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas. Regido por la norma americana de termometría. Esta norma se puede obtener en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (Anteriormente NBS).

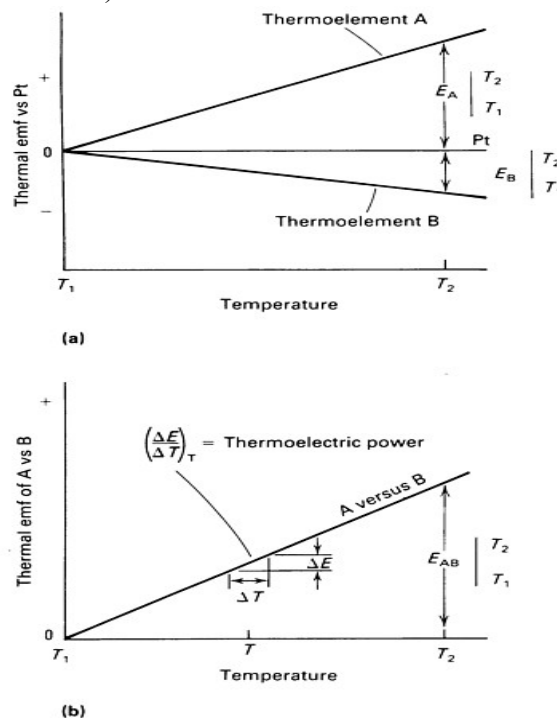


Figura 19: Potencial eléctrico en función de la temperatura.

El cambio en la fem con la temperatura para dos conductores eléctricos A y B, que son, respectivamente, positivo y negativo, con referencia al platino, se muestra. en la Figura 19 (a) Los valores de fem de ambos conductores cambian linealmente con la temperatura.

I.V.III.-MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA POR MEDIO DE TERMOPAR.

Una instalación para la medición de la temperatura mediante el uso de un termopar se ilustra esquemáticamente en la figura 20. La unión soldada de termopar PN se inserta en horno eléctrico (temperatura a medir). El punto de hielo es proporcionado por dos tubos de mercurio en U incorporados en un Frasco Dewar lleno de hielo picado. Las patas del termopar se insertan en tubos en U de mercurio y se conectan a los terminales positivo y negativo de un potenciómetro por medio de cables de cobre aislados. La temperatura del horno puede entonces obtenerse mediante la medición de la fuerza electromotriz generada por el termopar y se hace referencia a la tabla de fem establecidas para dicho termopar. Existen uniones automáticas disponibles comercialmente y compensadores de frío que se puede utilizar en lugar de los mencionados tubos de mercurio. Se puede construir un elemento externo de indicación o registro, utilizado para medir la fuerza electromotriz desarrollada por el termopar.

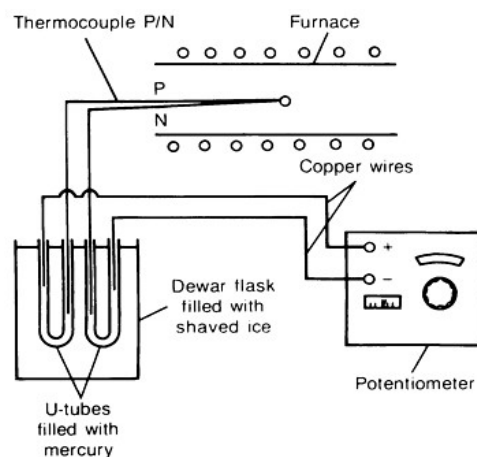


Figura 20 : Diagrama esquemático del montaje experimental para medir la temperatura

La temperatura ambiente de los terminales se mide mediante un termómetro y se convierte en fem en mili voltios. La fem total generada por la unión del termopar entre el calor y el punto de hielo es la suma de las fem Malthus. La temperatura de la junta caliente puede ser obtenida haciendo referencia a la tabla de esta fem total establecida.

I.V.IV.-PREPARACIÓN DE LA UNIÓN DE MEDICIÓN

Los dos elementos termoelectricos deben estar unidos a la temperatura de medición para formar el termopar. La junta debe tener buena conductividad térmica y eléctrica sin alterar las propiedades mecánicas y eléctricas de los cables del termopar.

Antes de ser unidos, los elementos termoelectricos se enderezan para facilitar la inserción en consumibles aislantes cerámicos. En esta operación, se debe tener cuidado para evitar el trabajo en frío excesivo de los alambres, que tiene un efecto perjudicial sobre la fem del par. Después de ser cortado a la longitud deseada, los cables del termopar se limpian cuidadosamente (para eliminar el lubricante residuo, huellas dactilares y otros contaminantes) con un disolvente adecuado examinado como metil etil cetona, Freon TF, o isopropilo alcohol.

Para aplicaciones por debajo de aproximadamente 500 ° C (alrededor de 1000 ° F), metales de base cables del termopar puede ser plata con soldadura fuerte utilizando bórax como fundente. Por encima de esta temperatura, las uniones de termopar se preparan normalmente mediante soldadura. Los termopares de metales nobles siempre deben ser unidos por soldadura. Los termopares son generalmente soldados usando gas, arco eléctrico, resistencia, T.I.G., y procesos de arco de plasma.

I.V.V.-MATERIALES DE TERMOPAR

Los tipos de termopares comercialmente disponibles se agrupan de acuerdo con las características del material (metal común o metal noble) y estandarización. En la actualidad, existen cinco metales de base estandarizados y tres termopares de metales nobles, y las

designaciones vienen dadas por el ANSI (American National Standards Institute), ASTM (American Society for Testing Materials) e ISA (Instrument Society of America). Entre los termopares restantes en uso, algunos no tienen asignada designaciones de la letra debido al uso limitado, y algunos están siendo considerados para ser estandarizados.

I.V.VI.-TERMOPARES ESTÁNDAR

Las composiciones de base, puntos de fusión, y resistividades eléctricas se presentan en la Tabla 13, temperaturas máximas de funcionamiento y los factores limitantes en el medio ambiente.

Sólo se han tenido en cuenta aquellos termopares capaces de medir al menos 1400°C.

Tabla 13: Propiedades de termopares estándar

TIPO	TERMOELEMENTO	COMP. BASE	PTO. FUSIÓN (°C)	RESISTIVIDAD (nΩxm)	SERVICIO RECOMENDADO	TEMP. MÁXIMA (°C)
R	RP	87Pt-13Rh	1860	196	Oxidante o inerte	0
	RN	Pt	1769	104		
S	SP	90Pt-10Rh	1850	189	Oxidante o inerte	0
	SN	Pt	1769	104		
B	BP	70Pt-30Rh	1927	190	Oxidante, vacío e inerte	1700
	BN	94Pt-6Rh	1826	175		

Tabla 14: Tolerancias para la calibración inicial de termopares.

TIPO	RANGO TEMPERATURA (°C)	CALIBRACIÓN ESTÁNDAR
R o S	0-1450	+/- 1,5°C o +/-0,25%
B	800-1700	+/-0,5%

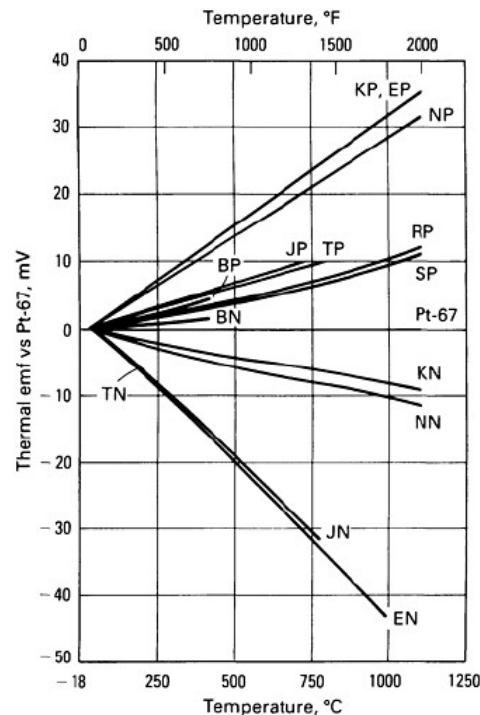


Figura 21: Fuerza electromotriz térmica frente a temperatura para diferentes termopares.

I.V.VII.-TERMOPAR TIPO S:

Se utiliza ampliamente en laboratorios industriales como un estándar para la calibración de los termopares de metal de base y sensor de temperatura. Se utiliza comúnmente para controlar el procesamiento de acero, vidrio, y muchos refractarios. Se debe utilizar en el aire o en atmósferas oxidantes o inertes. No debe ser utilizado en atmósferas reductoras sin protección de zinc. En presencia de óxidos se pueden reducir fácilmente, atmósferas que contienen vapores metálicos como plomo, arsénico, fósforo o azufre. No debe ser insertado directamente en tubos metálicos de protección y no se recomienda para servicio en vacío a altas temperaturas, excepto durante cortos períodos de tiempo.

I.V.VIII.-TERMOPAR TIPO R.

El tipo R termopar (Pt-13Rh/Pt) tiene características similares a las del tipo S. En 1922 fue encontrado que los británicos 10Rh aleación de Pt tenía una fem mayor que la versión de EE.UU. pero era inestable debido a la presencia de 0,34% Fe. Con el fin de producir la aleación libre de hierro (y por lo tanto estable) pero con una fem que reunió la calibración de los existentes instrumentos (en otras palabras, que tienen a la salida fem equivalente a la de la pareja usando Pt impuro y elemento 10Rh), fue necesario aumentar el contenido de rodio a 13%. La salida fem del termopar tipo R es ligeramente más alto que el del tipo S.

I.V.VIV.-EFECTO DEL AMBIENTE SOBRE TERMOPARES PT-RH.

Los Termopares Pt-10Rh/Pt, Pt-13Rh/Pt, Pt-30Rh/Pt-6Rh pueden ser utilizados con muy buenos resultados continuamente en el aire o en atmósferas oxidantes a 1500 °C, para los tipo S y R, a 1700 °C, los del tipo B, de forma intermitente a temperaturas próximas al punto de fusión del platino (1769 °C). Para estos pares en la atmósfera, la vida se rige por la temperatura de operación, presión parcial de oxígeno, las tasas de cambio de la atmósfera en las proximidades de la unión caliente, y el método de montaje del termopar.

La experiencia indica, que el platino rodio volatiliza en el aire, lo que resulta en una deriva negativa del par después de largos períodos de funcionamiento.

Los termopares de Pt-Rh pueden ser utilizados en atmósferas inertes como argón, helio, nitrógeno o con muy buenos resultados.

Hasta donde puede determinarse, la reducción de los gases analizados como monóxido de carbono y de hidrógeno han producido efectos adversos en los tipos S, R y B pero se sospecha que estos gases pueden reducir los óxidos de impurezas como sílice, generalmente presentes en alúmina. El silicio reducido de la sílice se sabe que se une con el platino para formar un eutéctico de bajo punto de fusión (830 °C). El contacto de estos pares con óxidos

fácilmente reducibles, no se debe permitir.

Se han reportado que los hidrocarburos inestables pueden provocar grietas, en contacto con agua caliente, a los metales del grupo del platino, causando daños a estos metales en la forma de un precipitado fino intergranular de carbono.

Los gases halógenos tienen efectos nocivos sobre los metales del grupo del platino a altas temperaturas.

El contacto directo entre los pares desnudos y compuestos fácilmente reducidos de metales como plomo, bismuto, antimonio, debe evitarse a altas temperaturas.

I.V.X.-CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE TERMOPARES PARA APLICACIONES INDUSTRIALES

Los siguientes criterios deben tenerse en cuenta durante la selección cuidadosa y el diseño del sistema de termopares:

Los requisitos de trabajo

- La precisión en la medición de temperatura
- EMF estabilidad
- Vida útil entorno de funcionamiento
- Rango de temperatura
- Tiempo a temperatura
- Temperatura de gradiente
- El ciclo térmico
- Efecto de la presión o de vacío
- Radiación Nuclear
- Composición química

Costo y disponibilidad

- El costo inicial y el reemplazo de termopar (piezas y mano de obra)
- El costo inicial y el reemplazo del cable de extensión de termopar (piezas y mano de obra)
- El costo inicial y el reemplazo de los accesorios del termopar (piezas y mano de obra)
- El tiempo de inactividad
- El tiempo de entrega (inmediata o extendida)

Diseño selección

- Termopares y cables de extensión (tipo)
- Temperatura / fem relación y rango de temperatura
- Sensibilidad de pareja
- Diámetro de cable disponible
- Aislamiento y protección (tipos)

I.VI.-MATERIALES CARBONOSOS (GRAFITO)

I.VI.I.-INTRODUCCIÓN

La tetravalencia del carbono y el silicio puede constituir la causa remota de sus características físicas y químicas especiales. Cuando no es el propio elemento que forma parte de la tetravalencia, tal y como puede ser el hidrógeno en el caso del carbono o el oxígeno en el silicio, se obtienen estructuras poliméricas tridimensionales (resinas y vidrios) o lineales (termoplásticos y amianto).

El carbono presenta, cuando se enlaza consigo mismo, dos tipos de estructuras cristalinas: El carbono-grafito y el carbono-diamante. La más estable termodinámicamente es la del carbono-grafito. Aunque en la naturaleza se encuentran depósitos de carbono-grafito, el carbono se presenta con estructuras desordenadas que, por calentamiento en atmósferas no oxidantes, derivan hacia la estructura termodinámicamente estable como la del carbono-grafito.

Un material carbonos utilizado como materia prima para la fabricación de productos terminados del carbón ha de alcanzar como mínimo las siguientes prestaciones:

- Carbono fijo total no inferior al 85%
- Cenizas sílico-aluminosas en torno al 10%
- Materias volátiles máximo 3%

Por otra parte, las materias primas normalmente utilizadas para la fabricación de materiales carbonosos son:

- El grafito natural o artificial
- La antracita desgasificada
- El choque de calidad metalúrgica o siderúrgica.
- El coque de petróleo procedente de las breas.

-Aglomerantes orgánicos (resinas termoendurecibles y breas termoplásticas)

Recientemente, se han identificado otras estructuras ordenadas del carbono, intermedias, entre las del grafito y las del diamante. Bajo la denominación de fullerenos (F) y los nanotubos (NT). Aunque no existen, por el momento datos termodinámicos precisos de estas estructuras, se puede pensar que sus valores se encuentren situados entre los del carbono-grafito y el carbono-diamante. Por tanto, cualquier estructura F o NT tiende a evolucionar, sobre todo con el aumento de la temperatura, en ambientes no oxidantes hacia la más estable de carbono-grafito.

Cuando se tiene que recurrir a un carbono de altas prestaciones químicas ($C > 99,5 \%$) sacrificando la estructura cristalina (deficientemente ordenada) se habla de carbono *pirolítico*. Su obtención se suele realizar desestabilizando termodinámicamente hidrocarburos gaseosos: CVD (Chemical Vapor Deposition).

En los tubos de descarga en los cuales se alcanza a desgasificar el grafito del ánodo, se pueden encontrar en las cercanías del cátodo estructuras de tipo F o NT, sobre todo cuando se trabaja en presencia de algún catalizador metálico (Fe, Co, Ni) Igualmente, aunque la cantidad sea muy pequeña se ha podido identificar estructuras tipo F y NT en productos y residuos de combustión de materiales carbonosos.

I.VI.II.-MATERIALES DE CARBONO-GRAFITO. PROPIEDADES Y APLICACIONES.

Se trata de un material libre de óxidos, están basados en el carbono. De forma natural o artificial, el contenido de cenizas ha de ser muy bajo, ya que hace bajar la refractariedad. Presenta la cualidad de ser un material que no es mojado por muchos metales fundidos, ni por sus escorias. Por otro lado, la resistencia mecánica aumenta con la temperatura.

La densidad es muy baja para tratarse de un refractario, tienen baja expansión térmica con lo que resisten bien contra el choque térmico. Se limita su uso en atmósferas oxidantes. Para evitarlo se añade magnesio o aluminio, perdiendo ciertas cualidades.

El grafito se oxida bajo su uso en aire, y por lo tanto encuentra su uso en aplicaciones inertes y vacío, tal como paquetes de aislamiento del horno y semiconductores. Este material tiene las mismas propiedades lubricantes como el nitruro de boro gracias a que posee la misma estructura de cristal. Se utiliza en atmósferas inertes, temperatura de uso puede ser más de 3500 ° C.

Debido a las características de aglomeración del Carbono dentro de la estructura del grafito, éste cristaliza formando capas hexagonales. Le confiere propiedades deslizantes, anisotropía de la conductividad eléctrica y térmica, así como el coeficiente de dilatación térmica, todas depende de la estructura de aglomeración del grafito.

Debido a los enlaces covalentes, dentro de la estructura del carbono, poseen elevada resistencia a la oxidación y a ataques químicos, ácidos o básicos.

La resistencia de uso solo está limitada por la presencia del oxígeno, en atmósferas oxidantes un carbón-grafito se puede usar hasta 350°C, mientras que los grafitizados por encima de los 650°C, que comienzan a oxidarse.

I.VI.IV.-PROPIEDADES DERIVADAS DEL PROCESO

Los materiales carbón-grafito poseen estructura poligranular y policristalina, dispuestos al azar.

La porosidad está profundamente afectada por las características del proceso, y puede variar hasta en un 50%. Porosidad abierta puede impregnarse y porosidad cerrada no.

Tabla 15: Propiedades del Grafito

PROPIEDADES	UNIDADES	PRUEBA	VALOR
FÍSICO			
Fórmula Química	-	-	C
La densidad, ρ	g / cm^3	ASTM C20	2,25
Crystal Structure	-	-	hexagonal
Dureza	Mohs	-	1,0 a 1,5
Dureza	Knoop (kg / mm^2)	Knoop 100g	-
Mecánico			
Resistencia a la compresión	MPa	ASTM C773	96
Módulo de Elasticidad (Young Mod).	GPa	ASTM C848	4,8
Resistencia a la flexión (MOR)	MPa	ASTM F417	50
Relación de Poisson, ν	-	ASTM C818	-
La tenacidad de fractura, K_{Ic}	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	Prueba del haz con muesca	-
TÉRMICO			
Max. Temperatura Uso (* Indica atm inerte.)	$^{\circ} \text{C}$	No hay carga cond.	3650
Resistencia al choque térmico	$\Delta T (^{\circ} \text{C})$	Enfriamiento	200 hasta 250
Conductividad térmica	W / mK	ASTM C408	24
Coefficiente de expansión térmica lineal, α_{v_1}	$\mu \text{m/m} \cdot ^{\circ} \text{C}$ ($\sim 25^{\circ} \text{C}$ hasta $\pm 1000^{\circ} \text{C}$)	ASTM C372	8,39
Calor específico, c_p	$\text{cal/g} \cdot ^{\circ} \text{C}$	ASTM C351	0,16
ELÉCTRICO			
Constante Dieléctrica	1MHz	ASTM D150	-
Rigidez dieléctrica	kV / mm	ASTM D116	-
Resistividad eléctrica	Ωcm	ASTM D1829	7×10^{-3}

I.VII.-POLÍMEROS (VITON®)

I.VII.I.-INTRODUCCIÓN

Los cauchos de fluorocarbono o fluoroelastómeros se designan como FKM según la norma ASTM D1418. En 1956, se hizo posible producir un polímero amorfo con una baja temperatura de transición vítrea (T_g) y un alto contenido en monómeros de flúor de fluoruro de vinilideno (VF2) y clorotrifluoroetileno (CTFE). El fluoelastómero Viton® fue presentado por DuPont en 1957 para satisfacer las necesidades de la industria aeroespacial, tanto para baja como alta temperatura, así como una resistencia superior a diversos productos químicos y disolventes. Debido a la excelente gama de propiedades producidas, el Viton® ha sido utilizado durante años en industrias como la automoción, química, y nuclear.

El Viton® es utilizado principalmente como material de sellado, particularmente en las áreas de separaciones debido su mayor resistencia a los ácidos como a la temperatura en comparación con otros elastómeros.

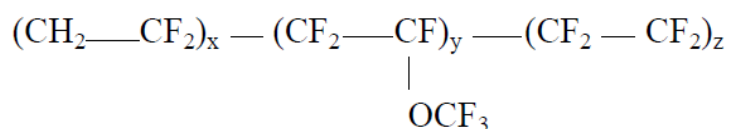
Lo habitual es llamar Viton® al tipo más usual que es el Viton® A. Sin embargo, existen tres familias principales o tipos de fluoroelastómero Viton® : A, B, y F, con cerca de 90 grados individuales disponibles. En el Viton® la familia A están compuestos por copolímeros de fluoruro de vinilideno (VF2) y hexafluoropropileno (HFP). Los tipos B y F son terpolímeros de VF2, HFP y tetrafluoroetileno (TFE), variando principalmente en el equilibrio específico entre los tres monómeros.

En general, la resistencia química aumenta con el contenido de flúor. Sin embargo la flexibilidad a baja temperatura, disminuye.

Para mejorar la flexibilidad a baja temperatura, se suele incluir un perfluoro o monómero PMVE (metil vinil éter) en la cadena principal del polímero. El Viton® GLT, introducido en 1976, fue el primer fluoroelastómero comercial en utilizar este monómero. Este polímero proporciona la misma resistencia al calor, productos químicos, y la radiación ionizante como el Viton® A. El Viton® GFLT también incluye el monómero de éter de vinilo

para proporcionar flexibilidad a baja temperatura, pero tiene otras propiedades típicas de Viton® F.

Fórmula general del Viton®:



where: x = 4 , y =1 z = trace

Tabla 16: Propiedades para Viton®

PROPIEDADES FÍSICAS			
PROPIEDAD		UNIDADES	VALOR
Color		-	Gris pálido
Viscosidad Mooney		-	(ML-10 at 121°C (250°F)) ≈ 90
Temp. Transición Vítrea (Tg)			-42°C
Coef. Expansión Térmica		mm/mm/°C	1.6 x 10-4
Punto fragilidad		°C	-51
Rigidez Torsional Clash-Berg 69 MPa		°C	-31
Temperatura de retracción (TR-10)		°C	-31
PROPIEDADES MECÁNICAS			
PROPIEDADES	UNIDADES	TEMPERATURA ENSAYO (24°C)	70 HORAS A 275°C
Módulo 100%	MPa	7,2	4,8
Resistencia Tracción	MPa	18,8	10,4
Elongación a rotura	%	185	170
Dureza	Durómetro A	67	63

Tabla 17: Porcentaje compresión para Viton® estándar y de baja formulación en función de la temperatura.

COMPRESIÓN (%) (70 HORAS A LA TEMP.)	VITON®GLT (STANDARD)	VITON® GLT (BAJA FORMULACIÓN)
232°C (450°F)	53	36
200°C (392°F)	30	21
0°C (32°F)	47	48
-20°C (-4°F)	77	77
-30°C (-22°F)	73	73

De la formulación o composición de las variables involucradas, la más importante es la reticulación o agente de curado utilizado para producir las propiedades físicas finales de un compuesto específico. Para fluoroelastómeros de Viton®, la mayoría de los compuestos están reticulados usando bisfenol AF. Desde 1957, se han utilizado agentes de curado de diamina para el tipo Viton® A, para aumentar la tasa de curación y mejorar la deformación por compresión, que generalmente está considerada como una de las propiedades más importantes del sello.

En la formulación de Viton® GLT, "G" indica curabilidad peróxido y "LT" la flexibilidad a baja temperatura .

I.VII.II.-EFECTOS GENERALES DE LA RADIACIÓN / TEMPERATURA

En general, los Viton ® fluoroelastómeros exhiben resistencia moderada a la radiación ionizante en comparación con otros elastómeros, con ajuste de compresión y otras propiedades mecánicas en general comparables a las del neopreno y el caucho de nitrilo (NBR) a temperaturas moderadas (hasta 200 ° F). Al igual que con otros elastómeros, tales propiedades son tan dependientes de la capitalización como de la composición del polímero base. A temperaturas más altas, sin embargo, el Viton ® y otros fluoroelastómeros tales como Fluorel® (FKM), Kalrez® (FFKM), y Afla ® (TFE-P) presentan un equilibrio superior de

propiedades mecánicas en relación con la exposición a radiación, dependiendo de otras condiciones ambientales. Los fluoroelastómeros Viton® y otros FKM no son recomendables para el vapor, servicio de agua caliente, o para soluciones alcalinas fuertes o aminas, donde se espera la exposición a ácidos diluidos y soluciones alcalinas fuertes, se recomiendan otros elastómeros tales como caucho de etileno-propileno (EPR) o EPDM.

Curiosamente, algunos materiales como Teflon PTFE (politetrafluoroetileno) son altamente susceptibles a la escisión de la cadena, y por lo tanto exhibir una resistencia limitada a la radiación ionizante, aunque la resistencia a la temperatura es superior a muchos otros termoplásticos. Otros polímeros como el polietileno tienden a formar enlaces cruzados, lo cual es un mecanismo que generalmente resiste a los daños de forma más gradual que permite que el material permanezca útil para radiaciones más altas, aunque la temperatura resistencia de polietileno es mucho menor que la de la mayoría de otros termoplásticos.

Predecir de vida útil del sello es complejo y difícil debido a la formulación del compuesto, la variación en el criterio de fallo y propiedades evaluadas.

I.VII.III.-RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Es una de las principales propiedades relevantes para el rendimiento del sellado, pero la importancia de los cambios en la deformación por compresión es altamente dependiente del servicio al que esté sometido, las condiciones y la estabilidad de los mismos durante la vida útil. El uso de un conjunto de compresión de prueba de fuga es muy práctico y los resultados se correlacionan bien para la predicción del funcionamiento del sello .

I.VII.IV.-OXIDACIÓN

En la ausencia de altas tasas radiación, el factor primario es el oxígeno en combinación con la temperatura elevada. En presencia de radiación ionizante, se produce tanto reticulación y escisión de la cadena, ya que la formación de radicales libres destruyen la cadena de polímero mediante la ruptura de enlaces primarios. En un ambiente controlado dada una tasa

de oxígeno los efectos de la oxidación en combinación con radiación y / o la temperatura se espera que sean significativamente reducidos. También se cree que el uso de lubricante de silicona durante la instalación del O-ring para reducir al mínimo la oxidación adicional al proporcionar una barrera de difusión.

Los cambios de propiedades tienden a ocurrir más rápidamente durante la exposición inicial debido a los efectos térmicos, con una tasa de disminución de daños, pero continua sobre el tiempo debido a la oxidación de difusión limitada y escisión lenta de la cadena.

I.VII.V.-DISEÑO DEL SELLO

En la figura 24 se muestra una sección transversal de una pieza con detalle del alojamiento del O-Ring. Todas las dimensiones con la excepción de diámetro total (s) designados como "A" y " B" en el dibujo son los mismos para ambos recipientes de contención primario y secundario. Sobre la base de una junta tórica diámetro exterior nominal de 0,25", la compresión por ciento o "% squeeze" se calcula para estar entre 21-28%, dependiendo de la brecha en el cierre. Este valor es típico para diseños de sellos que implican contacto metal-metal para equilibrar las propiedades tales como el % de compresión, la deformación permanente por compresión, la retención de la presión, y la expansión térmica, así como a minimizar la tensión interna en la junta tórica, que se ha demostrado que afectan a las tasas de fugas y la permeabilidad.

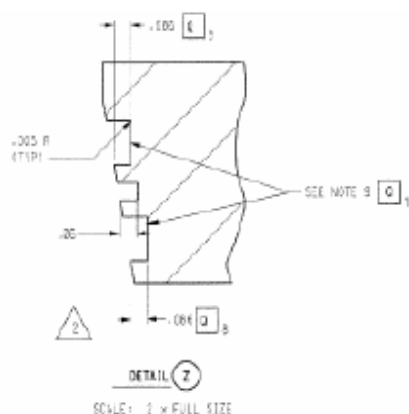
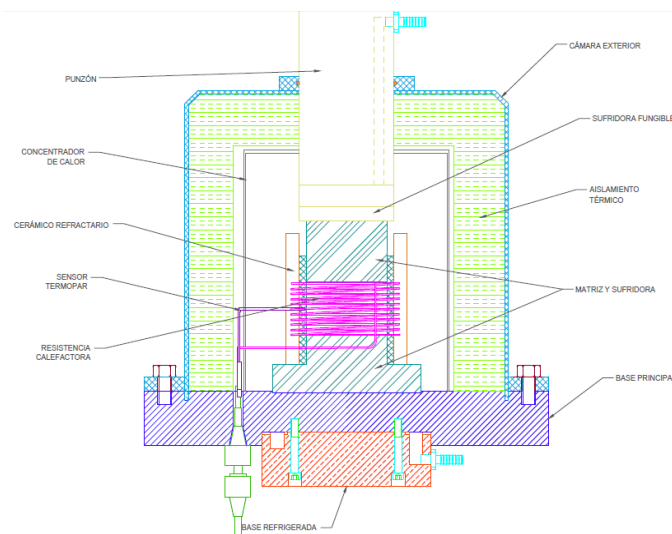


Figura 22: Vista transversal del diseño del alojamiento del O-Ring

El valor utilizado para determinar el % compresión en elastómeros por los estándares de prueba ASTM D395 y D1414 es del 25 % de compresión. El uso de un valor de deflexión constante, permite la comparación de elastómeros en igualdad de condiciones. Un fenómeno interesante que se ha observado en muchos elastómeros es que el valor de ajuste de compresión no es necesariamente constante para un material dado en diferentes niveles de deflexión. Materiales comprimidos mucho menos o más que el 25 % pueden presentar diferentes valores de deformación por compresión, y los valores también pueden cambiar con el tiempo bajo compresión. En este fenómeno entran en juego factores tales como la viscoelasticidad, histéresis de energía y realineación molecular.

- . BLOQUE II . -
DESCRIPCIÓN DETALLADA DE CADA PIEZA

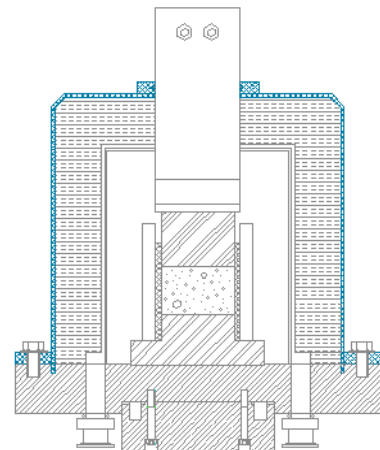


Sección del conjunto. Se indican las partes principales.

II.1.-CÁMARA EXTERIOR

La cámara exterior o cubierta del equipo es la parte que está en su interior a alta temperatura y vacío, y por la cara externa a temperatura y presión ambientales. Debe tener resistencia a la termofluencia, además de no deformarse para poder mantener la estanqueidad.

Alrededor de su perímetro se ha soldado una banda de 1cm de espesor con 4 taladros, de manera que esto sirva de acople y cierre de la cámara exterior con la base. A su vez se ha ranurado la parte inferior, que encaja sobre la base, para alojar un O-ring de Viton.



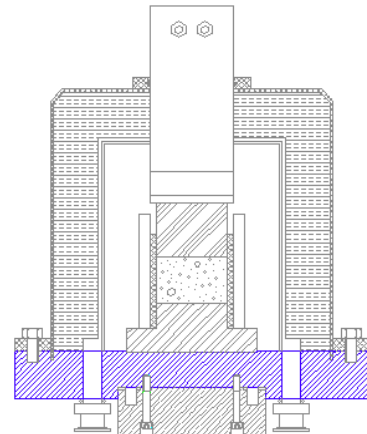
La parte superior de la cámara posee un agujero circular, a través del cuál accede el punzón a la matriz, comprimiendo así el metal en polvo. A su vez, sobre este orificio se ha soldado una pieza circular en la que se sitúa otro O-ring de manera que se asegure la estanqueidad de vacío en el interior.

Se ha seleccionado un acero inoxidable austenítico del tipo AISI -316L. Este tipo de acero inoxidable soporta mayores temperaturas de trabajo continuado de las que sufrirá durante su funcionamiento.

II.1.-BASE PRINCIPAL

Esta pieza debe tener resistencia a creep y alto módulo elástico ya que soporta la compresión ejercida por la máquina de ensayos y además está en la zona caliente (interior de la cámara).

Por otra parte la conductividad térmica y el coeficiente de dilatación térmica ha de ser bajo. También se ha de tener en cuenta que sobre esta pieza se monta prácticamente todo el conjunto del sistema con lo que el coeficiente de dilatación térmico debe ser muy similar al de las piezas que acoplan sobre ella.



Por todo ello se parte de un disco de 300 mm de diámetro y 40 mm de espesor de acero inoxidable austenítico tipo AISI-316L. Posee 4 agujeros roscados M10 a 90° cada uno para sendos tornillos de cabeza hexagonal que mantienen fija la cámara exterior sobre esta base.

Para el montaje del conjunto será necesario el mecanizado de los siguientes puntos:

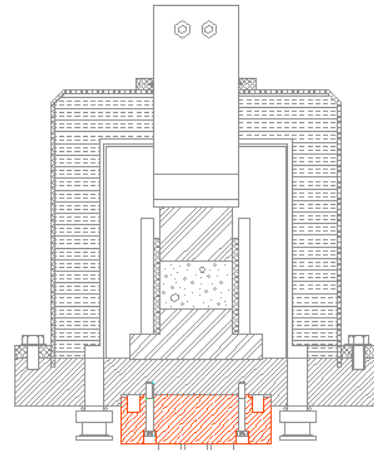
- Rosca M10 x 1,5 por la cara externa para un racor de vacío.
- Rosca M10 x 1,5 por la cara externa para un racor para una entrada de gas.
- Rosca 1/4" NPT cónica por la cara externa para un pasamuros eléctrico (termopar).
- 2 Roscas 1/4" NPT cónicas por la cara externa para dos pasamuros, embarrados de cobre para alta intensidad que conectan con la resistencia térmica.
- 4 agujeros roscados M10 x 1.5 L=20 para los tornillos de la solapa.

Sobre la parte superior de esta pieza o cara interna (zona caliente) deberá ir colocado el refractario de apoyo para la resistencia.

II.III.-BASE REFRIGERADA

Al igual que la pieza anterior y exactamente los mismos motivos se ha seleccionado para esta pieza un acero inoxidable austenítico del tipo AISI-316L de 125 mm de diámetro y de 40 mm de espesor.

En la parte inferior se ha hecho un ranurado de manera que el agua de refrigeración pueda circular y mantener a una temperatura inferior a los 100°C. Lo que se pretende de este modo es mantener la máquina de ensayos a una temperatura lo suficientemente baja para que no se produzcan deformaciones en ella.

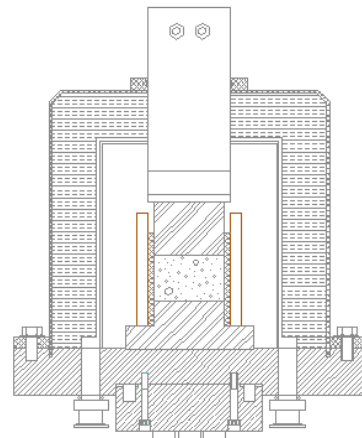


La superficie de contacto de la base refrigerada con la base principal deberá tener un alojamiento para una junta polimérica que proporcione estanqueidad y no se produzcan filtraciones.

II.IV.-CERÁMICO REFRACTARIO

El cometido de esta pieza no es más que de sistema de apoyo a la resistencia calefactora, además de transferir mediante conducción térmica el calor desarrollado por la resistencia y transmitirlo al polvo metálico de la probeta.

La temperatura máxima de trabajo es de 1400°C , no se necesita grandes capacidades mecánicas ya que no está expuesto a ningún esfuerzo o tensión.

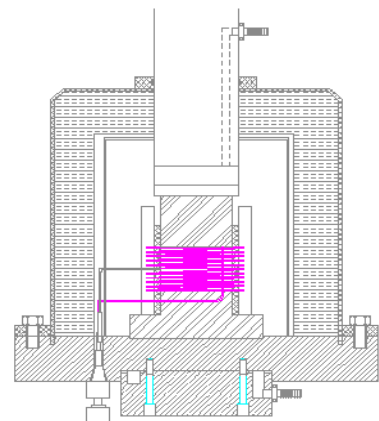


Por otro lado si debe tener un elevado coeficiente de transmisión de calor por conducción y que sea uniforme para que el material se conforme de manera más homogénea.

La resistencia calefactora estará enrollada sobre el cilindro refractario, todo esto a su vez estará recubierto de masilla refractaria para evitar las pérdidas, mejorar la fijación de dicha resistencia, así como para transmitir menos cantidad de calor hacia el exterior. Por eso se ha optado por un cilindro de Rescor ® (Alúmina mecanizable) que posee las cualidades físicas de la alúmina de alta pureza, pero fácilmente mecanizable con máquinas-herramientas convencionales. Con lo que se puede mecanizar sobre este cilindro la rosca que servirá se apoyo a la resistencia calefactora.

II.V.-RESISTENCIA CALEFACTORA

Se trata de un hilo de aleación Fe-Cr-Al (Kanthal A1) enrollado helicoidalmente sobre el cerámico refractario, sometido a una cierta intensidad con un alto valor de resistividad con el objetivo de que al ser atravesado por una corriente eléctrica, éste produzca un calentamiento por efecto Joule. La temperatura que debemos alcanzar como máximo es de 1400° C, todos los cálculos realizados se han formulado en base a esta temperatura; ha de concentrarse lo máximo posible para transferir a la probeta gran cantidad de calor. Por este motivo será una pequeña zona la que caliente exactamente el metal en polvo y no aportar calor a otros elementos.



Los requisitos principales para aleaciones de resistencia son resistividad uniforme, resistencia estable (sin efectos dependientes del tiempo de envejecimiento), coeficiente de temperatura de resistencia reproducible y de bajo potencial termoeléctrico frente al cobre. Una de las propiedades de importancia secundaria son el coeficiente de expansión, resistencia mecánica, ductilidad, resistencia a la corrosión y capacidad para ser unidos a otros metales por soldadura blanda, fuerte. La disponibilidad y el costo son también factores a tener en cuenta.

No obstante la conexión de la resistencia calefactora con el pasamuros eléctrico se realizará por medio de un borne cerámico. Para proteger de la alta temperatura.

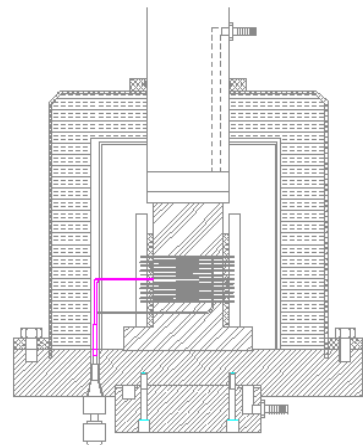
Las “patillas” (tramo de resistencia que va desde la zona útil hasta la conexión) irán envueltas en casquillos cerámicos de corindón, de baja conductividad térmica para aislarlos y no se irradie calor fuera de la zona útil.

II.VI.-TERMOPAR

Para aplicaciones al vacío y a la temperatura de 1400°C se encuentran en el mercado de forma estandarizada 3 tipos de termopares el R, el S y el B.

El del tipo B, aunque la temperatura máxima de operación es de 1700 °C, no es capaz de indicar temperaturas inferiores a 800 °C, con lo que para otras aplicaciones sería inútil.

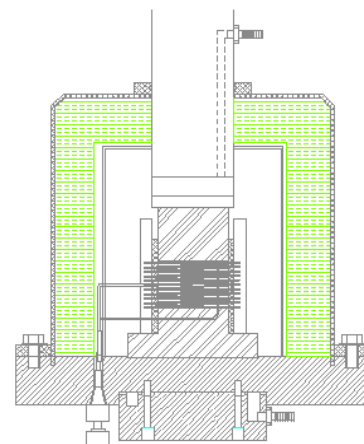
La elección se presenta entre el R y el S, ambos ofrecen unas características similares y pueden ser usados bajo las mismas condiciones. Se ha seleccionado uno del tipo R ya que debido a su reducido tamaño es más usual su utilización y por consiguiente se puede disponer de él en menos tiempo.



II.VII.-AISLAMIENTO

Para poder aislar el calor emitido por la resistencia de calefacción, se ha optado por elegir un aislamiento de fibra cerámica de alúmina policristalina.

Al ser flexible y liviana se adapta a las expectativas de este proyecto. Unos de los objetivos que se comentaban era la facilidad de montaje y bajo peso.



Se ha usado una capa de espesor 25mm, a la que se ha añadido una de 12.5 mm,

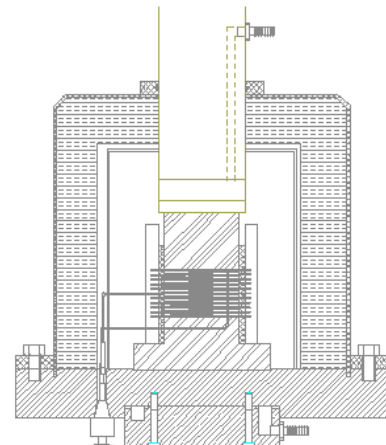
teniendo un espesor total de aislante de 37,5 mm.

Gracias a la fibra aislante concentramos el calor y reducimos las pérdidas térmicas, lo que se traduce en menor gradiente de temperaturas, y se aumenta el rendimiento térmico del sistema.

II.VIII.-PUNZÓN

La función de este componente es la de comprimir el metal en polvo. Por ello debe tener resistencia mecánica elevada, así como a la temperatura ya que estará en gran parte inmerso en la atmósfera interna de la cámara. En consecuencia debe ser resistente a creep.

Se ha seleccionado nuevamente como material para la realización de esta pieza, un cilindro macizo de acero inoxidable austenítico AISI-316L.



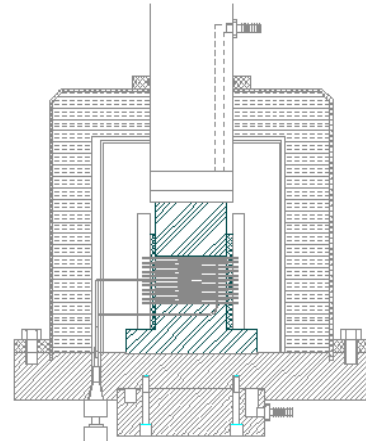
La cara inferior del punzón estará mecanizado de forma que en él se aloje una pieza de igual diámetro y de igual forma, de modo que al ser atornillado el uno sobre el otro, en el interior de ambos surge un hueco circular por el que circule agua para refrigeración.

Para evitar el contacto directo de las piezas de grafito calientes, se ha situado entre ésta y la parte inferior del punzón un pequeño disco de 20 mm de alto y 70 mm de diámetro de corindón. Contando así con otro nivel más de aislamiento.

II.VIV.-MATRIZ Y SUFRIDORA

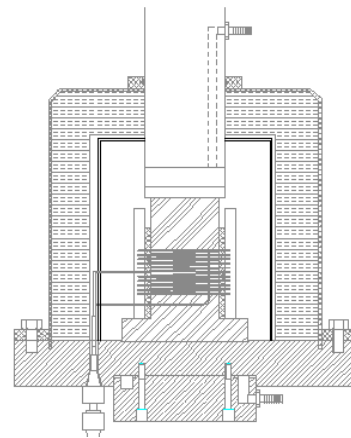
Se trata de un conjunto de piezas, intercambiables, que forman la matriz de la probeta, se fabricarán en forma de cilindros huecos, paralelepípedos, a diferentes medidas, para distintas probetas.

Se ha optado por grafito, ya que su resistencia a la alta temperatura y su resistencia a compresión lo hacen un material excelente para esta aplicación. En presencia de oxígeno el grafito no se puede usar a alta temperatura, pero debido a que el conjunto está dotado de sistema de vacío, no existe ningún motivo para descartar su uso.



II.X.-CÁPSULA CILÍNDRICA CONCENTRADORA DE CALOR

Para concentrar la radiación emitida por la resistencia y también para reducir en gran medida el calor transmitido al exterior, se ha instalado una lámina de 0,3 mm a 0,5 mm de espesor, para que se pueda manipular con facilidad y darle la forma necesaria. Con acabado espejo (BA) en su cara interna, (enfrentada a la resistencia), la otra cara tendrá un acabado normal de laminado, o en su defecto algún acabado de baja emisividad.



Por ello se ha seleccionado un acero inoxidable del tipo AISI-310S, usado en aplicaciones refractarias. No obstante por razones económicas sería aceptable el uso de AISI-316L.

II.XI.-CAJA DE CONTROLADORES

Se dispondrá de una caja de control, en los que se insertarán tanto el controlador de temperatura PID, como el de presión de vacío, así como un interruptor que pueda desconectar

de la alimentación los dos dispositivos.

Esta caja dispondrá de las tomas correspondientes para los diversos sensores y controladores:

- Conexión de fuerza (alimentación resistencia).
- Conexión sensor termopar .
- Salida vacío.
- Salida descarga vacío.
- Toma fuerza para bomba de vacío.
- Entrada sensor tipo “pirani”.

II.XII.-SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

Para el control de temperaturas, rampas, ciclos o procesos de tratamientos térmicos se ha usado un controlador de temperatura tipo PID.

El controlador de temperatura estará alojado en la caja de controladores, del controlador parten 2 cables que alimentan la resistencia calefactora; y entra en él, la toma de sensor termopar.

II.XIII.-SISTEMA DE CONTROL DE VACÍO

Se instalará en la caja de controladores el sistema de vacío medio (10^{-3} atm) , que consta de una entrada para realizar el vacío, una salida para descarga, y la toma del sensor.

Se ha instalado un sensor tipo “pirani”, además estará conectado a una bomba de vacío rotativa de paletas, regulada por el controlador.

II.XIV.-APORTE DE GAS INERTE

La entrada de gas inerte (Argón) estará controlada mediante manoreductor, contará con un manómetro así como válvulas de apertura, cierre y purgado, manuales.

II.XV.-O-RING

Para asegurar que el vacío es completamente estanco, se han de usar sellos en las juntas de las piezas. La temperatura estimada a la que estará sometido en la cámara externa será de unos 100°C aproximadamente, por ese motivo se ha optado por una junta tórica de fluorelastómero, resistente hasta 260 °C, sin perder sus propiedades elásticas.

III.-REFERENCIAS DE TABLAS

TABLA 1: “Euroinox Stainless Steel at High Temperature”

TABLA 2: “ASM Handbook Vol. 1. Elevated Properties of Stainless Steel Tabla 3”

TABLA 3: “ASM Handbook Vol. 1. Elevated Properties of Stainless Steel Tabla 9”

TABLA 4: “Acerinox Stainless Steel at High Temperature”

TABLA 5: “L.F. Verdeja, J.P. Sancho, A. Ballester. (2008) Materiales refractarios y cerámicos. Ed. Síntesis”

TABLA 6: “L.F. Verdeja, J.P. Sancho, A. Ballester. (2008) Materiales refractarios y cerámicos. Ed. Síntesis”

TABLA 7: “L.F. Verdeja, J.P. Sancho, A. Ballester. (2008) Materiales refractarios y cerámicos. Ed. Síntesis”

TABLA 8: “L.F. Verdeja, J.P. Sancho, A. Ballester. (2008) Materiales refractarios y cerámicos. Ed. Síntesis”

TABLA 9: “Resumen de propiedades de tablas 5, 6, 7 y 8”

TABLA 10: “ASM Handbook Vol. 2. Resistance Alloys Tabla 5”

TABLA 11: “ASM Handbook Vol. 2. Resistance Alloys Tabla 6”

TABLA 12: “ASM Handbook Vol. 2. Resistance Alloys Tabla 7”

TABLA 13: “ASM Handbook Vol. 2. Thermocouple Materials. Tabla 1”

TABLA 14: “ASM Handbook Vol. 2. Thermocouple Materials. Tabla 2”

TABLA 15: “L.F. Verdeja, J.P. Sancho, A. Ballester. (2008) Materiales refractarios y cerámicos. Ed. Síntesis”

TABLA 16: “ASTM D1418: Performance evaluation of O-Ring. Tabla 2”

TABLA 17: “*ASTM D1418: Performance evaluation of O-Ring. Tabla 2*”

IV.-REFERENCIAS DE FIGURAS

FIGURA 1: “Fotografía tomada en el laboratorio de Ingeniería Mecánica y de lo Materiales. E.P.S. (Sevilla)”

FIGURA 2: “Euroinox Stainless Steel at High Temperature””

FIGURA 3: “Euroinox Stainless Steel at High Temperature”

FIGURA 4: “ASM Handbook Vol. 1. Elevated Propierties of Stainless Steel Figura 17”

FIGURA 5: “ASM Handbook Vol. 1. Elevated Propierties of Stainless Steel Figura 17”

FIGURA 6: “ASM Handbook Vol. 1. Elevated Propierties of Stainless Steel Figura 17”

FIGURA 7: “ASM Handbook Vol. 1. Elevated Propierties of Stainless Steel Figura 4”

FIGURA 8: “ASM Handbook Vol. 1. Elevated Propierties of Stainless Steel Figura 13”

FIGURA 9: “L.F. Verdeja, J.P. Sancho, A. Ballester. (2008) Materiales refractarios y cerámicos. Ed. Síntesis”

FIGURA 10: “L.F. Verdeja, J.P. Sancho, A. Ballester. (2008) Materiales refractarios y cerámicos. Ed. Síntesis”

FIGURA 11: “R. Inoriza. (2007). Revestimientos refractarios en hornos industriales. Ed. Tellería.”

FIGURA 12: “R. Inoriza. (2007). Revestimientos refractarios en hornos industriales. Ed. Tellería.”

FIGURA 13: “ASM Handbook Vol. 2. Resistence Alloys. Figura 3”

FIGURA 14: “ASM Handbook Vol. 2. Resistence Alloys. Figura 4”

FIGURA 15: “ASM Handbook Vol. 2. Resistence Alloys. Figura 5”

FIGURA 16: “ASM Handbook Vol. 2. Resistence Alloys. Figura 6”

FIGURA 17: “*ASM Handbook Vol. 2. Resistance Alloys. Figura 7*”

FIGURA 18: “*ASM Handbook Vol. 2. Thermocouple Materials. Figura 1*”

FIGURA 19: “*ASM Handbook Vol. 2. Thermocouple Materials. Figura 2*”

FIGURA 20: “*ASM Handbook Vol. 2. Thermocouple Materials. Figura 3*”

FIGURA 21: “*ASM Handbook Vol. 2. Thermocouple Materials. Figura 4*”

FIGURA 22: “*ASTM D1418: Performance evaluation of O-Ring. Figura 17*”

V.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- *“L.F. Verdeja, J.P. Sancho, A. Ballester. Materiales refractarios y cerámicos. Ed. Síntesis Madrid (2008) ISBN:978-84-975655-9-2”.*
- *“R. Inoriza.. Revestimientos refractarios en hornos industriales. Ed. Tellería. Madrid. (2007) ISBN : 978-84-81290639.”*
- *“ASM Handbook Vol. 1 (2005). Elevated Properties of Stainless Steel.*
- *“ASM Handbook Vol. 1 (2005). Elevated Properties of Stainless Steel.”*
- *“ASM Handbook Vol. 2 (2005). Resistance Alloys.”*
- *“ASM Handbook Vol. 2 (2005). Thermocouple Materials.”*
- *“ASTM D1418: Performance evaluation of O-Ring.”*
- *“Euroinox Stainless Steel at High Temperature. <http://www.euro-inox.org/>”*

