

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

**Diseño de un sistema para la caracterización de
propiedades termomecánicas en materiales de horno
alto.**

**Autor: RAQUEL LÓPEZ CASTAÑO
Tutor: FRANCISCO ORTEGA FERNÁNDEZ**

Oviedo, Junio de 2018

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, dar las gracias a Francisco Ortega por guiarme y enseñarme tanto, estoy segura de que no hay dos sin tres.

A mis padres y hermana por estar siempre a apoyándome.

Gracias a Isaac por su inestimable ayuda y conocimiento.

A Manuel por tu apoyo durante todos estos años.

Y demás familia, amigos y compañeros, sin todos vosotros no estaría escribiendo estas líneas.

Gracias a todos.

Raquel López Castaño



ÍNDICE

Índice de figuras	3
Índice de tablas.....	5
Índice de acrónimos	6
1. ANTECEDENTES.....	7
2. OBJETO	8
3. ALCANCE	9
4. EL PROCESO SIDERÚRGICO	10
4.1. Extracción de materias primas	10
4.2. El proceso integral	12
4.3. Proceso de sinterización.....	13
4.4. Proceso de coquización.....	14
4.5. Horno alto	15
4.6. Planta de desulfuración de Arrabio.....	17
4.7. La acería.....	17
5. REFRACTARIOS EN HORNO ALTO.....	20
5.1. Zonificación del horno alto.....	22
5.2. Tipos de refractario en horno alto	24
5.2.1. Refractarios carbonáceos.....	24
5.2.2. Refractarios cerámicos	28
6. NORMATIVA DE ENSAYOS A REFRACTARIOS DE HORNO ALTO	32
6.1. Principales normas	34
7. DISEÑO DEL EQUIPO	38



7.1.	Requisitos del experimento.....	38
7.2.	Diseño	39
7.2.1.	Cámaras de temperatura	40
7.2.2.	Tamaños de muestras de bloques de carbono	42
7.2.3.	Estudios previos	43
7.2.4.	Sistema de calentamiento	54
7.2.5.	Sistema de refrigeración.....	55
7.2.6.	Sensores.....	56
7.3.	Modo de funcionamiento	61
8.	PRESUPUESTO	64
9.	CONCLUSIONES E IDEAS DE FUTURO.....	66
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	67
11.	ANEXO I.....	70
12.	ANEXO II	85
13.	ANEXO III.....	87
14.	ANEXO IV.....	92



Índice de figuras

Figura 1: Vista aérea parque almacenamiento de minerales. Fuente: (Topf , 2016)	11
Figura 2: Esquema del Proceso Siderúrgico Integral. Fuente: (del Olmo Roales, 2008).....	12
Figura 3: Sinter en funcionamiento. Fuente: (Equipo Técnico del Centro de Formación ArcelorMittal Asturias (La Toba), 2007)	13
Figura 4: Esquema del mineral de hierro, de extracción a horno alto. (Fuente: Elaboración propia)	14
Figura 5: Coque formado. Fuente (Historias Virgen del Romeral, 2015)	15
Figura 6: Esquema horno alto. Fuente: (Carolina Perrino, 2017)	16
Figura 7: Convertidor volcando arrabio en una acería: Fuente: (DiarioMotor, 2013)	18
Figura 8: Esquema Horno alto dividido por zonas. Fuente: (Cerameet).....	22
Figura 9: Bloques de Carbon Graphite conformados con forma de crisol. Fuente: (Luoyang Yilong Refractory Co.,Ltd).....	27
Figura 10: Ladrillo refractario de base Alúmina. Fuente: (Mr. Thomas Yi)	29
Figura 11: Esquema de la estructura de las cámaras de la planta piloto. Fuente: Elaboración Propia	41
Figura 12: Esquema bloque de carbono. Fuente: Elaboración propia	43
Figura 13: Esquema geométrico de un bloque de refractario y sus ejes X, Y, Z..	44
Figura 14: Calentamiento 4000 W para muestra 1.....	46
Figura 15: Calentamiento 6000 W muestra 2	46
Figura 16: Refrigeración 4000 W muestra 1	48
Figura 17: Refrigeración 9000 W muestra 2.....	48



Figura 18: Proceso combinado muestra 1	50
Figura 19: Proceso combinado muestra 2	50
Figura 20: Esquema de las resistencias Moly-D. Fuente: (Heating elements)	55
Figura 21: Esquema interior termopar. Fuente: (WIKA, 2016).....	57
Figura 22: Representación de la tensión termoeléctrica frente a la temperatura para termopares B, E, J, K, N, R, S, T. Fuente: (WIKA, 2016).....	58
Figura 23: Esquema propuesta posición de los termopares. Fuente: Elaboración Propia.....	58
Figura 24: Esquema funcionamiento medidos de oxígeno LDO de HACH LANE. Fuente: (Inter empresas).....	59
Figura 25: Esquema de posibles posiciones sensores LVDT. Fuente: Elaboración propia.....	61



Índice de tablas

Tabla 1: Secciones del horno y sus principales daños y ataques. Fuente: (Dzermejko, y otros pág. 18).....	23
Tabla 2: Cambio de las características de los aditivos en refractarios carbonáceos. (Llatas, 2013 pág. 13).....	25
Tabla 3: Propiedades y composición de ladrillos de refractario base alúmina (Brosnan).....	30
Tabla 4: Crushing temperatura.....	31
Tabla 5: Propiedades y las muestras 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.....	44
Tabla 6: Conductividad térmica en función de la temperatura para las muestras 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.....	45
Tabla 7: Resumen potencias de calentamiento y refrigeración. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 9: Dilataciones máximas y mínimas muestra 1.....	52
Tabla 10: Simulación de la muestra 1 en los ejes X, Y, Z.....	53
Tabla 11: Dilataciones máximas y mínimas muestra 2.....	53
Tabla 12: Simulación de la muestra 2 en los ejes X, Y, Z.....	54
Tabla 8: Temperatura de las resistencias en función de la atmósfera. Fuente: (Heating elements).....	55



Índice de acrónimos

- Belly: Vientre (en referencia al horno alto)
- Blinder: Ligante
- Bosh: Etalaje (en referencia al horno alto)
- Carbon: Carbono
- Cold Crushing Strength: Resistencia a la compression en frío
- Creep: fluencia
- Graphite: Grafito
- Hearth: Crisol
- High heat duty: Servicio a altas temperaturas
- Hot-pressed: Prensado en caliente
- Hot-pressed Carbon: Carbono prensado en caliente
- Know-how: Saber hacer, experiencia
- Low heat duty: Servicio a baja temperatura
- LVDT: Lineal variable diferencial transformer (EN) Transductor diferencial de variación lineal (ES)
- Medium heat duty: Servicio a media temperatura
- PC: Ordenador personal
- Permanent linear change: Cambio Lineal Permante
- PLC: Programmable Logic Controller (EN) Controlador Lógico Programable (ES)
- Semi-graphite: Semi-grafito
- Semi-graphitized: Semi-grafitado
- Stack: Cuba (en referencia al horno alto- Upper, Middle y Lower)
- Super duty: Servicio a muy elevadas temperaturas
- Taphole: Piquera (en referencia al horno alto)
- U.N.E.: Una Norma Española



1. ANTECEDENTES

Actualmente para una óptima y continua operación en los hornos altos se necesita un mantenimiento continuo del refractario.

Esto es debido a que un cambio de refractario de un horno alto, se realiza gracias a las tecnologías actuales aproximadamente cada 10 años, por ello resulta crítica su correcta definición en función del uso al que va a ser sometido, temperatura, geometría y agentes que provocan ataques químicos y que estarán en contacto a lo largo de la vida del refractario.

Los ciclos de mantenimiento de un refractario de horno alto son muy complicados, debido a que están sometidos a diferentes ataques químicos y físicos en ciclos de altas temperaturas, por ello sus propiedades pueden ir variando a lo largo de su vida útil.

Actualmente la consistencia y rendimiento de los materiales están por debajo de sus objetivos, manteniendo un buen rendimiento solo tras ciclos de mantenimiento.

Por ello tiene tanta importancia los trabajos y el tiempo de operación y mantenimiento de los refractarios, así como la previsión de la duración y comportamiento en servicio.



2. OBJETO

El objeto principal de este TRABAJO FIN DE MÁSTER es el diseño de un equipamiento específico para la realización de ensayos de resistencia termo-mecánica de materiales refractarios a utilizar en hornos altos, con el fin de determinar su durabilidad en fase de uso.



3. ALCANCE

El conocimiento acerca del comportamiento de los refractarios recae mayoritariamente en los suministradores de refractario y no en los clientes y usuarios finales de los productos.

En el caso de este TRABAJO FIN DE MÁSTER se desarrollará acerca del comportamiento termo-mecánico de los refractarios de horno alto, en concreto en los situados en el crisol del horno alto, de carácter carbonáceo y se propondrá un diseño para su caracterización de manera independiente.

El fin será el de proponer un sistema de caracterización y comparación de refractarios con el objeto de investigar acerca de los mismos.



4. EL PROCESO SIDERÚRGICO

Se entiende por proceso siderúrgico la generación de acero a partir de otros materiales, ya sea mineral (en el caso de la denominada siderurgia integral) o chatarra. Este trabajo se va a centrar de forma exclusiva en siderurgia integral para la producción de aceros al carbono y los refractarios que se utilizan en las aplicaciones del proceso siderúrgico.

El proceso siderúrgico integral consta de dos etapas inicialmente separadas: la extracción de los elementos necesarios (fundamentalmente mineral de hierro, caliza y carbón) y el proceso industrial.

4.1. Extracción de materias primas

El acero es una aleación compuesta mayoritariamente por hierro, con una pequeña cantidad de carbono (entre un 0,008% y un 2%). El hierro necesario para su fabricación no se presenta como elemento puro en la naturaleza, sino en forma de óxidos, sulfuros, silicatos complejos y carbonatos en los yacimientos.

En función del contenido en hierro de los minerales se distinguen minerales pobres (menor al 30%) de riqueza media (entre el 30% y el 55%) y minerales ricos (contenido superior al 55%). Para la fabricación de acero los minerales de interés son los minerales ricos, con la excepción de la siderita, también interesante, cuyo contenido en hierro es del 48,2%.



Figura 1: Vista aérea parque almacenamiento de minerales. Fuente: (Topf, 2016)

Los minerales de hierro usados en el proceso siderúrgico integral son tres óxidos:

- **Magnetita** (Fe_3O_4). Con una riqueza del 72,4% en hierro. La ley de sus yacimientos oscila entre el 55 y 65%.
- **Hematites** (Fe_2O_3). El más abundante y útil para el proceso de sinterización y horno alto por sus propiedades. Riqueza en hierro de un 70% y en los yacimientos en torno al 60%.
- **Limonita** ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Con un contenido en hierro de entre un 52 y 66%. La ley en los yacimientos ronda el 30 y 55%. La ganga puede ser siliciosa (SiO_2) o calcárea (CaCO_3).

Menos frecuentemente se utiliza la siderita (carbonato) y la wustita (óxido), esta última no se encuentra en la naturaleza, sino que aparece en el sínter y alto horno.



4.2. El proceso integral

Se denomina proceso siderúrgico integral al proceso mediante el cual se obtienen los distintos productos de acero utilizando como materias primas el mineral de hierro, carbón y los fundentes.

- **Mineral de hierro.** Previamente pretratado y concentrado.
- **Carbón.** Tendrá las funciones de agente reductor de los óxidos de hierro y de combustible y soporte físico de la carga en el horno alto.
- **Fundentes.** Son compuestos con una doble finalidad: atrapar las impurezas del mineral y rebajar su punto de fusión para formar la escoria.

Para poder fundir el mineral de hierro en el horno alto, es necesario someterlo a un proceso de sinterización mediante el cual se consiguen unas propiedades físicas adecuadas

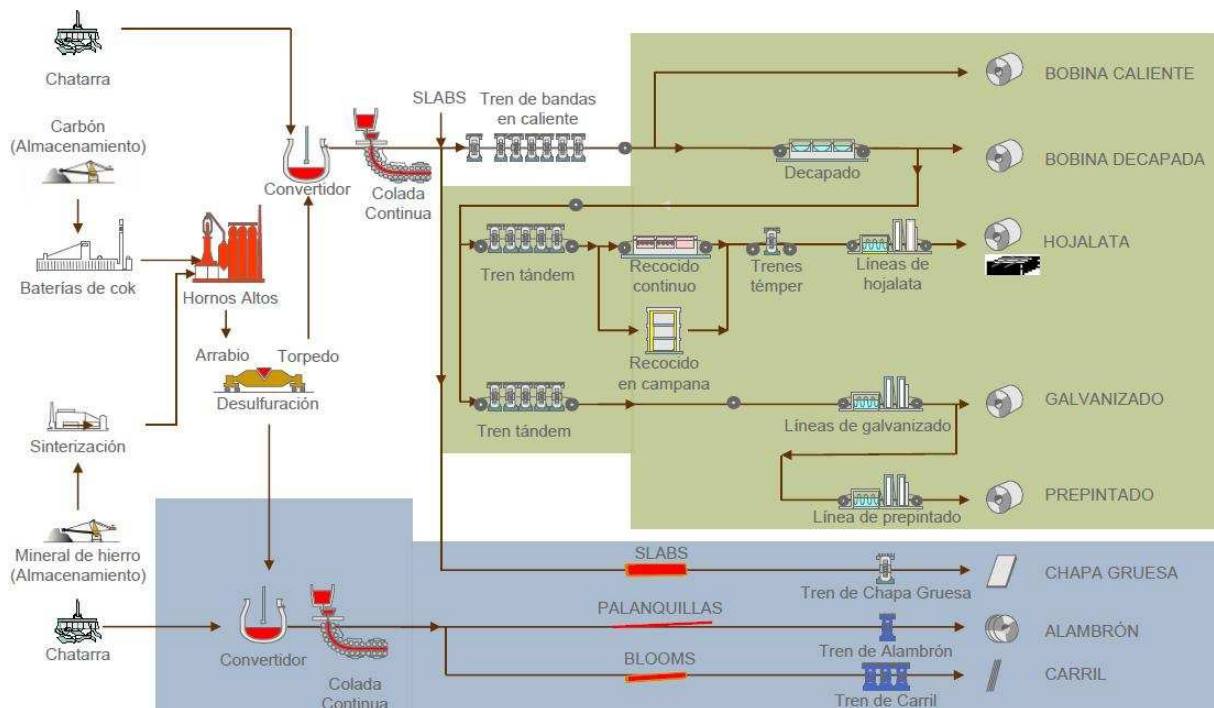


Figura 2: Esquema del Proceso Siderúrgico Integral. Fuente: (del Olmo Roales, 2008)



4.3. Proceso de sinterización

El primer paso en el proceso siderúrgico es la sinterización. Se trata de una etapa en la que se realiza la aglomeración del mineral de hierro por calentamiento. Su objetivo es lograr que su tamaño sea el adecuado para favorecer las reacciones que tienen lugar en el horno alto.

El proceso de sinterización se realiza depositando los materiales sobre una parrilla móvil y provocando una combustión controlada de los mismos. En el frente de combustión los materiales alcanzan una gran temperatura, haciendo que los finos de hierro se fundan. Este frente de combustión no es paralelo a la parrilla, sino que se forman capas oblicuas de material en distintos estados térmicos.

El control de la instalación asegura que todo el material pasa por el frente de combustión, formándose así una torta continua de material sinterizado. Esta torta finalmente se fractura y se enfría para obtener el material de entrada adecuado para el horno alto.



Figura 3: Sinter en funcionamiento. Fuente: (Equipo Técnico del Centro de Formación ArcelorMittal Asturias (La Toba), 2007)



El sinter está compuesta por mineral de hierro, finos de coque, fundentes (caliza y dunita principalmente), finos de factoría (procedentes de la limpieza en las instalaciones, cribados de hornos altos, chatarra de acería, lodos de depuradora...), finos de retorno (procedentes del propio proceso de sinterización) y agua.



Figura 4: Esquema del mineral de hierro, de extracción a horno alto. (Fuente: Elaboración propia)

4.4. Proceso de coquización

Debido a que el carbón no puede ser utilizado directamente en el horno alto como agente reductor por su elevado contenido en volátiles y falta porosidad y resistencia mecánica, se emplea coque en su lugar. El coque es el producto resultante de la acción de altas temperaturas (por encima de 1200°C) sobre una pasta de carbón en una cámara cerrada en ausencia de oxígeno. Esta pasta de carbón es una mezcla de diferentes carbones de hulla que han sido molidos y homogeneizados en el parque de carbones.



Es un proceso extremadamente contaminante, pero al ser base carbono no resulta de aplicación para la búsqueda o aprovechamiento de elementos metálicos.



Figura 5: Coque formado. Fuente (Historias Virgen del Romeral, 2015)

4.5. Horno alto

El horno alto, junto con las baterías de cok y la acería conforman las instalaciones de cabecera en la ruta de la siderurgia integral ya que en ellas se producen los principales cambios desde el hierro hasta la obtención del acero.

En el horno alto es donde tiene lugar las distintas reacciones químicas (principalmente reducción de óxidos de hierro) y fundición de los minerales de hierro los cuales transforma junto con las materias primas y el cok dando lugar entonces al arrabio líquido. El arrabio por lo tanto es una aleación de hierro y carbono en estado líquido.

El horno alto es un reactor vertical en el que por su parte superior se carga el mineral de hierro junto con el coque, los fundentes (caliza, dunita, etc...) y ferroaleaciones en algunas ocasiones. El coque que actuará como combustible de la reacción y a su vez de agente reductor, comienza a arder debido a los flujos de aire calientes procedentes de unas estufas exteriores al horno alto.

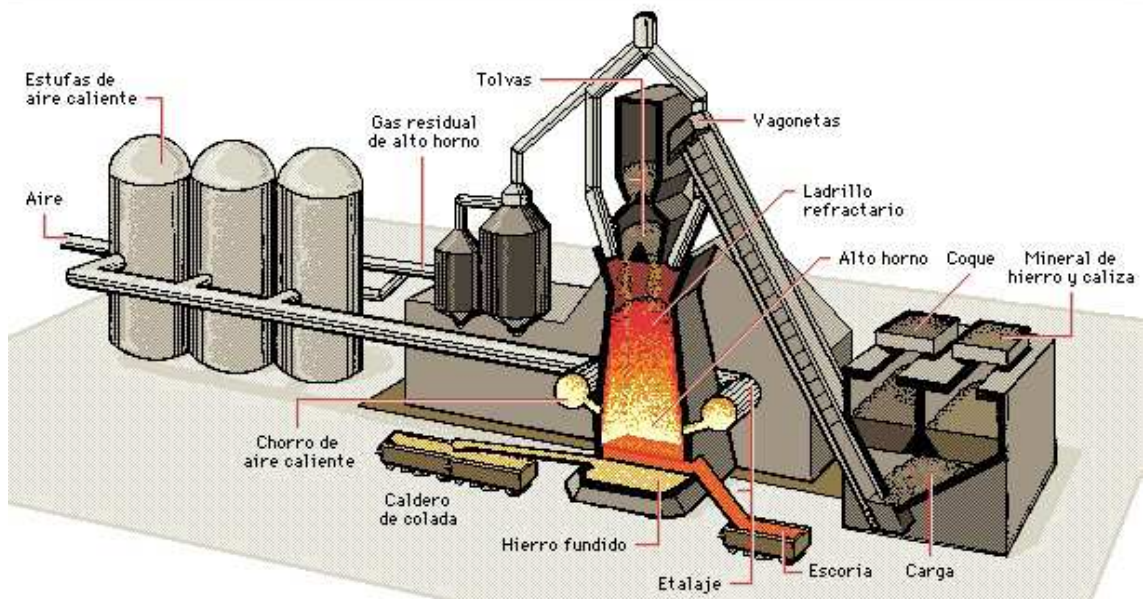


Figura 6: Esquema horno alto. Fuente: (Carolina Perrino, 2017)

El carbono del coque combinado con el oxígeno del aire genera monóxido y dióxido de carbono, el carbono de estos gases reaccionará entonces con el oxígeno presente en los óxidos de hierro reduciéndolos y generando hierro puro.

El hierro puro se combinará con el carbono restante del coque dará lugar al arrabio, sobre el cual flota la escoria formada gracias a fundentes como la caliza, que han permitido separar el hierro de otros componentes como los óxidos de elementos no deseados.

La composición química del arrabio debe estar encajada dentro de unos límites, ya que cada uno de sus elementos influye en el proceso de conversión y en la composición final del acero.

- El silicio afecta a la temperatura del baño debido a su alto efecto termógeno y también incide sobre el volumen de escoria.
- El manganeso influye en la eliminación del azufre y el fósforo y en la formación de escoria.
- Se deben controlar también los contenidos de azufre y fósforo por lo complicado que resulta eliminarlos.



- El arrabio procedente del horno alto tiene un contenido de carbono de entre el 3,5 y el 4,5%.

Finalmente, el arrabio se carga en los torpedos, unos vagones cuyo interior está recubierto de material refractario, que transportarán el arrabio hasta la acería. Cada torpedo suele tener aproximadamente una capacidad de hasta 250 t.

4.6. Planta de desulfuración de Arrabio

Debido al alto contenido en azufre del arrabio, es necesario proceder a la reducción de este antes de convertirlo en acero, por ello los torpedos procedentes del alto horno deben pasar por la planta de desulfuración de arrabio antes de ser enviados a la Acería.

En la planta de desulfuración de Arrabio se inyecta en el torpedo cal magnesia y carburo cálcico. De esta manera el azufre pasa a formar parte de la escoria que se retirara entonces para evitar una resulfuración.

4.7. La acería

En esta instalación se transforma el arrabio de los Hornos Altos en acero, se ajusta su composición y a continuación se solidifica en la colada continua, normalmente en productos de sección constante. Aquí el acero líquido se transforma en productos semiterminados sólidos (desbastes) que serán enviados posteriormente a las líneas de laminación.

La composición química deseada del acero líquido se consigue mediante el proceso LD. Este proceso consiste en la inyección de oxígeno puro en el arrabio del convertidor mediante unas lanzas para lograr disminuir su contenido en carbono hasta el 0'04 % y a su vez oxidar y reducir otros elementos no deseados en el acero. En esta etapa también se añaden diferentes ferroaleaciones necesarias para ajustar la composición química requerida.



Figura 7: Convertidor volcando arrabio en una acería: Fuente: (DiarioMotor, 2013)

A partir de aquí los productos que salen de la acería pueden ser enviados a diversas instalaciones para su transformación según cuál sea el producto final deseado desde el tren de bandas en caliente, tren de chapa gruesa, tren de carril...

Tal y como hemos visto a lo largo del punto 4, el horno alto presenta una especial importancia en el proceso siderúrgico, dado que es la instalación más crítica en el funcionamiento. Sus paradas y mantenimientos son largos y tediosos y exigen una alta planificación (en el caso de los cambios de refractarios requieren de varios años para lograr un óptimo suministro).

Una parada no programada de esta instalación provoca la interrupción del resto de instalaciones del proceso por falta de material con el que seguir desarrollando los productos. Instalaciones como la desulfuradora, la acería, hasta los trenes de laminación quedarían desabastecidos y sin productos conforme se agote el stock. Así mismo, aunque



sea una parada breve, el arranque de un horno alto dura varios días donde la producción de una planta de siderurgia integral seguiría gravemente afectada.



5. REFRACTARIOS EN HORNO ALTO

En la construcción de hornos altos se utilizan una gran diversa cantidad de productos refractarios, todos ellos sometidos a altas temperaturas donde no se disponen de aleaciones de acero que puedan resistir las condiciones de temperatura.

Estos contenidos en una gran coraza de acero, la cual actúa de estructura del horno alto, protegen la misma de:

- Ataques químicos
- Ataques mecánicos
- Fluctuaciones de temperaturas
- Estrés térmico
- Erosión debido al contacto con la escoria y arrabio

En concreto la parte más crítica que protegen los materiales refractarios es el crisol del horno, esta zona es la única en la cual el material refractario no puede ser reparado ni reemplazado durante el funcionamiento del mismo y marca la su buena elección marca la vida útil del mismo.

Independientemente de sus características, el producto ha de ser seleccionado con un criterio básico y fundamental para que su rendimiento sea el proyectado:

- Adecuada selección del material que haga frente a las circunstancias locales a las que estará sometido el producto
- Seguir el protocolo de instalación de los materiales tal y como especifica el diseñador y fabricante de los productos
- Buena definición de las condiciones de operación. Es muy importante que el material opere entre los límites especificados durante la fase de diseño para que cumpla y se conserve según lo proyectado. Por ello es importante anticipar las condiciones extremas de trabajo en la fase de diseño.



- Calidad del material fabricado, comprobar que las características del material cumplan con las cuales se diseñó gracias a controles de calidad entre los extremos de diseño.

Los aspectos detallados en el apartado anterior cobran mucha relevancia cuando se califica un material de buena calidad y alto precio como “malo”, normalmente es porque no se ha definido bien su uso y no va acorde a las características de operación o su instalación ha sido deficitaria. Siguiendo las pautas anteriores en la gran mayoría de los casos, podemos esperar que el material dure tanto como se proyectó en su definición inicial.

Así mismo, al seleccionar los materiales a comprar, el coste tiene una gran influencia en la decisión final, si bien se plantea una disminución de costes por ello, normalmente no se tiene en cuenta el riesgo de parada de una instalación de producción por fallo del material refractario. Los costes de una parada no programada, son muy superiores a la selección de un material más costoso en el proceso de compra.

A pesar de que los principios básicos de funcionamiento son iguales en todos los hornos, los diseños de refractarios en los hornos altos, cambian de unas instalaciones a otras en todo el mundo. Esto es debido no solo al *know-how* de la empresa productora, sino que también a las singularidades de cara horno, teniendo unas variaciones muy grandes de unos a otros en concreto en:

- Tamaño del horno
- Geometría y disposición interna
- Tipo de materias primas que se utilizan en el proceso
- Sistemas de enfriamiento y refrigeración
- Modelos y modos de producción



5.1. Zonificación del horno alto

Estos factores enumerados en el punto anterior dan lugar a que se caracterice de manera particular cada sección del horno alto, con su correspondiente refractario. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de división del horno alto en 8 zonas diferentes.

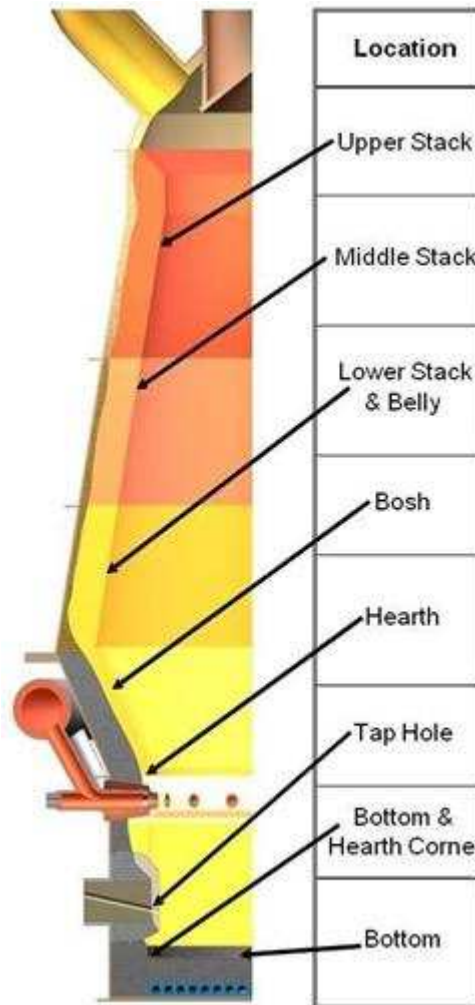


Figura 8: Esquema Horno alto dividido por zonas. Fuente: (Cerameet)



NORMATIVA DE ENSAYOS A REFRACTARIOS DE HORNO ALTO

Tabla 1: Secciones del horno y sus principales daños y ataques. Fuente: (Dzermejko, y otros pág. 18)

ZONA	PRINCIPALES ATAQUES	DAÑOS CAUSADOS	OBJETIVO DEL DISEÑO
Upper Stack	<ul style="list-style-type: none">▪ Impactos▪ Abrasión▪ Fluctuaciones de temperatura moderadas	<ul style="list-style-type: none">▪ Desgaste abrasivo▪ Pérdida de ladrillos	<ul style="list-style-type: none">▪ Alta resistencia al impacto y la abrasión▪ Preservación en todo el perfil
Middle Stack	<ul style="list-style-type: none">▪ Abrasión▪ Oxidación▪ Ataque alcalino▪ Fluctuaciones de temperatura moderadas	<ul style="list-style-type: none">▪ Resquebrajamiento▪ Deterioro de los ladrillos	<ul style="list-style-type: none">▪ Refrigeración para combatir las altas fluctuaciones de temperatura▪ Aumento de la resistencia ante el ataque alcalino, la oxidación y la abrasión
Lower Stack & Belly	<ul style="list-style-type: none">▪ Oxidación▪ Ataque alcalino▪ Fatiga térmica▪ Fluctuaciones de temperatura altas	<ul style="list-style-type: none">▪ Resquebrajamiento severo▪ Deterioro de los ladrillos▪ Fatiga térmica	<ul style="list-style-type: none">▪ Revestimiento resistente al resquebrajamiento▪ Alta resistencia química frente a densas refrigeraciones
Bosh	<ul style="list-style-type: none">▪ Ataque alcalino▪ Ataque de la escoria▪ Alta carga térmica	<ul style="list-style-type: none">▪ Deterioro de los ladrillos▪ Resquebrajamiento por estrés	<ul style="list-style-type: none">▪ Alta densidad de refrigeración▪ Refrigeración de la corteza mediante un recubrimiento de alta conductividad
Hearth	<ul style="list-style-type: none">▪ Oxidación▪ Ataque alcalino y por zinc▪ Ataque del metal caliente y la escoria▪ Fluctuaciones de temperatura altas	<ul style="list-style-type: none">▪ Desintegración del refractario▪ Aparición de capas frágiles▪ Finos de hierro	<ul style="list-style-type: none">▪ Protección frente a la oxidación▪ Alta resistencia química▪ Margen para la expansión▪ Refrigeración controlada
Taphole	<ul style="list-style-type: none">▪ Erosión por el metal caliente y la escoria▪ Fluctuaciones extremas de la temperatura	<ul style="list-style-type: none">▪ Resquebrajamiento▪ Desintegración del refractario▪ Aparición de capas frágiles▪ Finos de hierro	<ul style="list-style-type: none">▪ Alta resistencia al resquebrajamiento▪ Alta resistencia química
Bottom / Heath Corner	<ul style="list-style-type: none">▪ Erosión por ataque alcalino y por zinc	<ul style="list-style-type: none">▪ Finos de hierro	<ul style="list-style-type: none">▪ Margen para la expansión▪ Alta resistencia química



	<ul style="list-style-type: none">Alta temperatura y estrés térmico	<ul style="list-style-type: none">Abombamiento del refractario	<ul style="list-style-type: none">Alta refrigeración
Bottom	<ul style="list-style-type: none">ErosiónAtaques de Zinc y PlomoPresión ferrostáticaAlta temperatura y estrés térmico	<ul style="list-style-type: none">Resquebrajamiento por estrésPenetración del hierro en los porosFormación de una masa de hierro sólida	<ul style="list-style-type: none">Eliminación el estrésBaja porosidad

5.2. Tipos de refractario en horno alto

Las configuraciones de los crisoles de los hornos altos son muy variables a lo largo del mundo. Los materiales refractarios instalados en los crisoles pueden ser de tipo carbonáceo o cerámicos, siendo los primeros, de tipo carbonáceo los más usados (Dzermejko, y otros).

5.2.1. Refractarios carbonáceos

Tradicionalmente los materiales refractarios de base carbón son los más usados. La clasificación que se mostrará a continuación muestra familias enteras de materiales describiendo brevemente sus características y usos en el horno alto. Estas familias a su vez tienen variaciones en su composición, proceso y resultados en la operación de los mismos de acuerdo con A.J. Dzermejko y otros.

1. Carbon

Los materiales refractarios de tipo carbón son generalmente grandes bloques pre-conformados por moldeo o extrusión con y tras ello calentados en hornos con temperaturas de entre 800 a 1400°C para carbonizar el material. Según se va calentando el material, la materia se volatiliza dejando huecos que marcan su alta porosidad y permeabilidad, estas características les permiten absorber elementos en el ambiente al que



están sometidos, como los álcalis. Una vez en funcionamiento, el ataque químico al que es sometido, realiza los mismos caminos a través de su estructura y poros que la materia que se volatilizó en su fabricación

Los bloques pueden ser densificados, disminuyendo el tamaño de poro e incrementándose por ello el coste del producto, mediante un impregnado del bloque con *blinder* y sometiendo el bloque a un tratamiento de vacío y carbonización. Se repite la operación (impregnación del bloque y calentamiento del mismo) las veces que se requiera hasta alcanzar la porosidad y permeabilidad deseada (Dzermejko, y otros).

Algunos fabricantes añaden otras materias primas a la masa inicial o antes de la carbonización para mejorar las propiedades físicas y químicas del bloque (Dzermejko, y otros), los más comunes son Silicio, Sílice, Carburo de Silicio y Aluminio (Llatas, 2013).

Tabla 2: Cambio de las características de los aditivos en refractarios carbonáceos. (Llatas, 2013 pág. 13)

Aditivos		Características
Sílice/Silicio	+	Resistencia a la abrasión
	+	Resistencia al choque térmico
	-	Tamaño de poro
	-	Permeabilidad
Grafito	+	Conductividad térmica
Aluminio		Antioxidante
	+	Conductividad térmica
	-	Tamaño de Poros
Al₂O₃	+	Resistencia a la erosión
MgO		
Al₂SiO₅		



2. *Hot-pressed Carbon*

El prensado en caliente de refractarios de carbón fue desarrollado por un único fabricante. Es conocido como el proceso BP o prensado en caliente (*hot pressing*). Este método igual que en el anterior las partículas de carbón y *binders* son mezcladas e introducidas en un molde especial. En dicho molde mediante un ariete hidráulico se presuriza la mezcla anterior, mientras que simultáneamente se somete el molde a una corriente eléctrica que carboniza el *blinder* haciendo que los carbones que normalmente tardan semanas en carbonizar realicen esa acción en solo unos minutos (Dzermejko, y otros).

La presión ejercida permite que los líquidos se volaticen mientras se cierran los poros, de esta manera el bloque final presenta una permeabilidad 100 veces inferior y una conductividad térmica superior que los refractarios que hemos enunciado en el punto anterior (Dzermejko, y otros).

Para aumentar la resistencia a álcalis, se añaden como aditivos Sílice y Cuarzos que reaccionan con el Sodio y Potasio del horno alto evitando así que estos reaccionen con el carbono del bloque (Dzermejko, y otros).

Debido a las características de su fabricación (bajo moldes a alta presión) el tamaño de dichos bloques no suele ser superior a 500x250x1200 mm (Dzermejko, y otros).

3. *Graphite*

La diferencia entre este material y los anteriores suele partir de que este es sometido a tratamientos de calentamiento entre 2400 y 3000°C. El proceso de grafitización cambia completamente la estructura cristalina del carbono, así como sus propiedades físico-químicas.

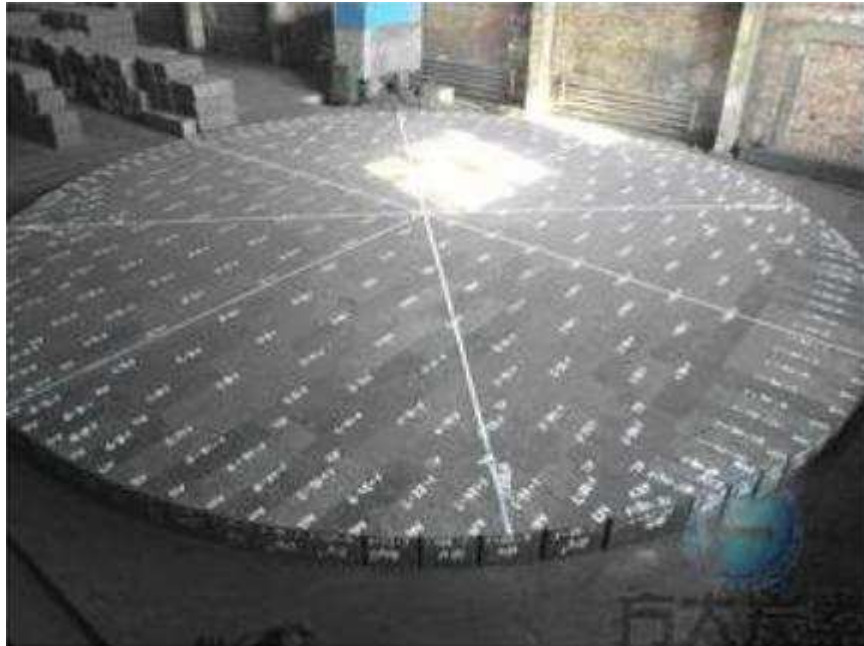


Figura 9: Bloques de Carbon Graphite conformados con forma de crisol. Fuente: (Luoyang Yilong Refractory Co.,Ltd)

4. Semi-graphite

Está compuesto por una mezcla cuya base son partículas de grafito artificial mezcladas con *binders* de base carbono como breas, todo se carboniza a una temperatura que oscila entre los 800 y los 1400°C.

Las partículas de grafito artificial son previamente calentadas hasta aproximadamente 3000°C mientras que los *binders* solo son horneados entre 800 y 1400°C. Respecto a las características resultantes de la mezcla, se muestra una conductividad superior a los carbonos gracias al *binder* a pesar de no ser tan alta como la de grafito puro.

Las conductividades térmicas varían en función de la temperatura de carbonización alcanzada siendo posible la recarbonización para aumentar la conductividad (Dzermejko, y otros), aumentando por ello también el coste de producción y disminuyendo su densidad porosidad.

Estos refractarios están normalmente instalados en la zona del *bosh* y *stack*, ver Figura 8.



5. *Hot-pressed Semi-graphite*

Los semi-grafitos prensados en caliente son un producto menos permeable y con una mayor conductividad térmica que los semi-grafitos del punto anterior.

Están compuestos por partículas de *blinder* y grafito añadiendo como compuesto partículas de sílice y cuarzo, de esta manera se da lugar a un producto con una mayor resistencia a la abrasión y menor permeabilidad.

Debido a su proceso de fabricación del prensado en caliente, el material resultante suele tener unas dimensiones exteriores máximas de 500 x 250 x 120 mm (Dzermejko, y otros pág. 243)

6. *Semi-graphitized*

Se entiende cómo *semi-graphitized* (semi-grafitado) a los materiales de carbón que han sido ya tratados térmicamente y se les aplica un nuevo tratamiento térmico entre 1600 y 2400°C. Este segundo tratamiento térmico, afecta a la estructura del carbono alterando sus propiedades físicas y químicas, pero al realizarse a una temperatura por debajo de la temperatura de grafitización, el producto se denomina semi-grafitizado. Se distingue de un semi-grafito porque este si contiene partículas grafitizadas con *blinder*.

Estos productos tienen una mayor conductividad y resistencia al ataque químico que los refractarios de *carbon* y *semi-graphite* (Llatas, 2013) también son fabricados en grandes bloques que han de ser cortados a medida para cada finalidad para convertirlos en ladrillos de refractario (Dzermejko, y otros).

5.2.2. Refractarios cerámicos

Dado que el alcance de este TRABAJO FIN DE MÁSTER se centra en los refractarios de tipo carbonáceos comentaremos brevemente los de tipo cerámico.

Según la norma UNE 61001 los refractarios aluminosos pueden clasificarse en función del porcentaje de alúmina en 5 rangos:



- 30-35%
- 35-39%
- 39-41%
- 41-43%
- 43-45%

Los ladrillos de base arcillosa se clasifican en función de su refractariedad o capacidad de resistencia sometidos a altas temperaturas sin padecer una contracción ni astillarse. En E.E.U.U. realizan esa clasificación según los trabajos sean

- "Low heat duty"
- "Medium heat duty"
- "High heat duty"
- "Super duty"

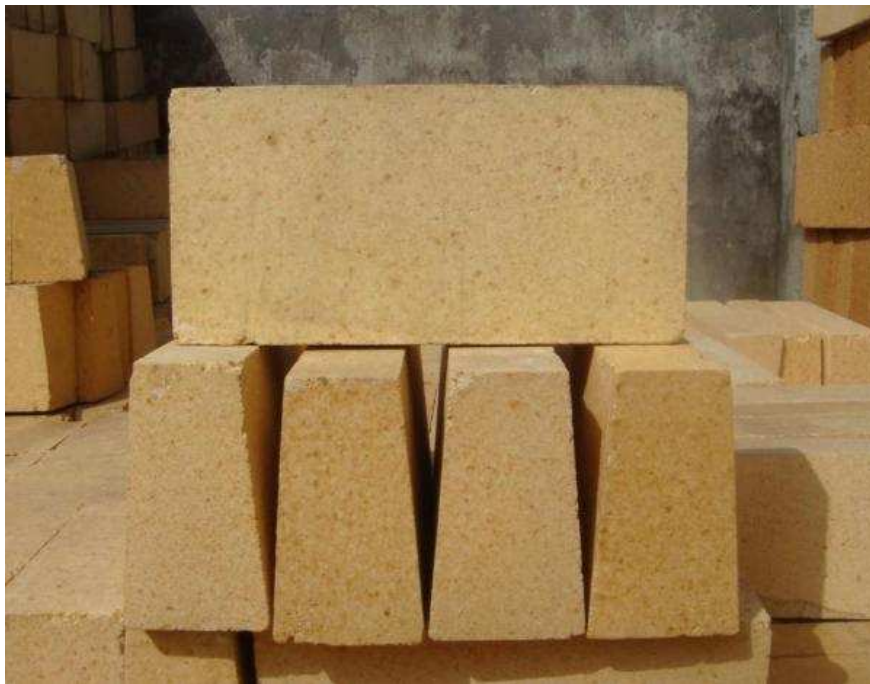


Figura 10: Ladrillo refractario de base Alúmina. Fuente: (Mr. Thomas Yi)

La composición general y las propiedades típicas se dan en Tabla 3: Propiedades y composición de ladrillos de refractario base alúmina. Una medida de refractariedad es el Cambio lineal Permanente (PLC): es decir, la contracción (o expansión) con carácter



permanente tras el calentamiento del material hasta una temperatura especificada por tiempo específico sin estar sometido a cargas.

	Low Duty 1000°C Max.	Medium Duty 1200°C Max.	High Duty 1400°C Max.	Super duty 1600°C Max
Análisis Químico				
Al ₂ O ₃	25.4	29.3	37.0	41.9
SiO ₂	68.1	62.9	57.8	53.2
Fe ₂ O ₃	1.5	2.3	1.3	1.0
TiO ₂	1.5	2.9	2.3	2.2
Na ₂ O + K ₂ O	1.5	1.5	1.3	1.2
Propiedades Físicas				
Densidad Aparente (g/cm ³)	2.00	2.10	2.11	2.35
Porosidad Aparente (%)	19.0	20.5	18.0	12.5
Módulo de rotura (MPa)	5.2	3.8	9.7	8.5
Resistencia a la compresión (MPa)	28	32	35	22
PLC, 5 hr. 1400°C			-0.2 a +0.2	
PLC, 5 hr. 1600°C				0.0 a -1.2
Prueba de carga, 172 kPa y 1.5 hr.			0.5 a 1.5 1350°C	1.5 a 3.0 1450°C

Tabla 3: Propiedades y composición de ladrillos de refractario base alúmina (Brosnan)



Entre las características generales de estos refractarios se podrían destacar las siguientes (Llatas, 2013):

- Su refractariedad aumenta al aumentar el contenido en alúmina y se ve disminuida al aumentar el contenido de fundentes e impurezas. Así mismo tienen una moderada resistencia a los esfuerzos térmicos y baja expansión térmica.
- Sus propiedades mecánicas están relacionadas con la composición química de las materias primas.
- Los refractarios de base alúmina son susceptibles a los ataques químicos por alcálisis y CO, fallando rápidamente a altas temperaturas frente a materiales básicos.

En los crisoles de horno alto en concreto, se emplean en algunas ocasiones refractarios aluminosos tipo “super-duty” con un contenido en Al₂O₃ superior al 42%

En la siguiente tabla se reflejan de los diferentes materiales refractarios desarrollados en los puntos anteriores su temperatura crítica de rotura, así como su expansión térmica y comprensibilidad

	Temperatura crítica de rotura		Expansión térmica	Compresibilidad
Silicon Carbide	160°C	320°F	0.3%	0.05%
High Duty	200°C	392°F	0.5%	0.10%
High Alumina	130°C	286°F	0.7%	0.10%
Micropore Carbon	580°C	1076°F	0.8%	0.20%
Amorphous Carbon	800°C	1500°F	0.5%	0.40%
Semi-Graphite	2500°C	4500°F	0.4%	1.00%
Graphite	3300°C	5972°F	0.3%	1.00%

Tabla 4: *Crushing temperatura*



6. NORMATIVA DE ENSAYOS A REFRACTARIOS DE HORNO ALTO

El material refractario utilizado en hornos altos se ve sometido a condiciones extremas durante su servicio, las principales solicitaciones al material desde un punto de vista térmico son tanto temperaturas elevadas como cambios bruscos de temperatura (grandes choques térmicos y gradientes elevados).

Desde un punto de sollicitación mecánica las principales son los esfuerzos de compresión, flexión y tracción, así como elevadas vibraciones y abrasión y erosión causado por el material dentro del horno.

Las sollicitaciones químicas son provocadas por el contacto con las escorias, productos fundentes, así como gases, vapores y ácidos (Blanco).

Tal y como se hace referencia en la norma española UNE (150 R836-68), materiales refractarios son aquellos productos naturales o artificiales cuya refractariedad (Resistencia pirosfópica) es igual o superior a 1500°C.

Así mismo, el concepto de resistencia pirosfópica es: resistir a esas temperaturas sin fundir o reblandecer y los ensayos para su determinación vienen reflejado en la UNE 61042 (AENOR, 1971).

De las anteriores definiciones se concluye que 1500°C es la temperatura mínima que ha de soportar para considerarse refractario, pero hay otros factores que le hacen apto, como la resistencia de sus propiedades mecánicas en el tiempo y la oposición a la corrosión y desgaste debido a ataques químicos manteniendo sus propiedades.

Por otra parte, a partir de las diferentes normativas se podrían clasificar los test que pueden realizar en función de la sollicitación que se quiere analizar, a continuación, se compilan los ensayos por temáticos, donde se incluyen todos los que marca la UNE 61.009 y otros fuera de esta norma.



A. TÉRMICAS

1. Conductividad térmica y difusión
2. Expansión térmica lineal (UNE-EN 993-19)
3. Dilatación térmica lineal reversible (UNE-EN 993-10)
4. Choque térmico (en agua)
5. Resistencia a los cambios bruscos de temperatura
6. Contracción de secado
7. Ruptura a fluencia (*Creep*) (UNE-EN 993-9 e ISO3187)
8. Refractariedad bajo carga constante y temperatura creciente
9. Refractariedad bajo carga constante y temperatura creciente.
Método diferencial
10. Refractariedad (cono pirométrico equivalente)
11. Resistencia a los cambios bruscos de temperatura

B. MECÁNICAS

1. Módulo de Young
2. Resistencia a la compresión en frío *Cold Crushing Strength* (CCS) (UNE-EN 993-5, ISO 4700 y ASTM E 382)
3. Resistencia a la flexión en frío
4. Resistencia a la tracción en frío
5. Ensayo de adherencia
6. H-MOR (UNE-EN 993-7)

C. QUÍMICAS Y FÍSICAS

1. Análisis químico
2. Humedad higroscópica
3. Humedad total
4. Resistencia al ataque químico
5. Determinación de las sales solubles
6. Densidad aparente y real (UNE-EN 993-1 y UNE-EN 993-2)
7. Porosidad abierta y total (UNE-EN 993-1)
8. Permeabilidad (UNE-EN 993-4)



9. Distribución del tamaño de poro (DIN 66133)
10. Resistencia a la abrasión (ASTM C 704)

D. DESGASTE Y ATASQUES DE:

1. Alkalís (ASTM C454)
2. Zinc
3. CO (ASTM C288)
4. H²
5. Vapor
6. Arrabio
7. Solubilidad en Fe
8. Escoria

6.1. Principales normas

Las principales normas de refractarios que están bajo los estándares de las normas U.N.E., ASTM, DIN, e ISO.

Gracias a ellas se pueden realizar comparativas de diferentes productos y fabricantes y valorar que producto es mejor para cada caso bajo unas mismas circunstancias de trabajo.

Las normas U.N.E. relacionadas con el alcance de este TRABAJO y que han sido analizadas para ello son las siguientes:

- U.N.E 61.005: COMPROBACIÓN DE FORMAS Y DIMENSIONES, TOLERANCIAS, CRITERIOS DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO
- U.N.E 61.038: REFRACTARIEDAD BAJO CARGA CONSTANTE Y TEMPERATURA CRECIENTE
- U.N.E 61.042: Ensayo de resistencia Piroscópica (REFRACTARIEDAD)



A continuación, se extraen las principales indicaciones, conclusiones e ideas que se extraen de las normas U.N.E. descritas en el punto anterior.

– U.N.E 61.005:

En esta norma se define el modo de comprobación de la forma y de las dimensiones de las piezas y ladrillos refractarios, determinando si cumplen las tolerancias fijadas, así como cuales son los criterios de aceptación y rechazo.

En relación con el alcance de este TRABAJO FIN DE MÁSTER, los puntos más relevantes de la UNE 61.005 son los siguientes:

- 1) Comprobación de formas y dimensiones de piezas o ladrillos refractarios
 - a. Se realizarán las mediciones por cualquier cara de la pieza que se considere, utilizando para ello una regla de acero graduada en milímetros y medios milímetros
 - b. Las tolerancias para los refractarios de carbono son de $\pm 1\%$ (Una Norma Española, 1969 pág. 200). Teniendo en cuenta que para cotas inferiores a 100mm se considerará un mínimo en valor absoluto de 1 mm para las tolerancias del 1%.

– U.N.E 61.038:

En esta norma se define un ensayo para el estudio de los refractarios densos sometidos a una carga constante y a una elevación progresiva de temperatura.

Define por refractariedad bajo carga (Una Norma Española, 1970 pág. 197) como la temperatura a la cual una probeta de material refractario sometida a una carga constante y a un determinado régimen de calentamiento, sufre un porcentaje de deformación determinado.

Los tamaños de las probetas (50 mm de diámetro por 50 mm de altura) son escasos para buscar una representatividad a escala industrial en la comparativa que queremos realizar para refractarios de horno alto.



Sin embargo, los puntos más interesantes de esta norma se podrían resumir en los siguientes:

- 1) El horno tendrá una uniformidad de temperatura en un margen de $\pm 10^{\circ}\text{C}$.
- 2) Control de temperatura:
 - a. Velocidad de $4^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ hasta los 900°C , realizando comprobaciones de la velocidad cada 5 minutos y con una tolerancia de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
 - b. Para estudios de refractariedad bajo carga superior a 1500°C : Velocidad de $10^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ hasta los 1200°C , realizando comprobaciones de la velocidad cada 5 minutos y con una tolerancia de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
- 3) Propuestas para la medida de la temperatura
 - a. Termopar introducido en tubo de alúmina recristalizada con aisladores del mismo material incluyendo un indicador de temperaturas perfectamente contrastado (Una Norma Española, 1970 pág. 200)
 - b. Pirómetro óptico de radiación parcial enfocado directa o indirectamente al fondo de un tubo cerrado altamente refractario
- 4) Dilataciones
 - a. El ensayo se considerará terminado cuando la probeta haya experimentado una contracción real, con respecto a su dilatación máxima de 10mm.
- 5) Informe de los resultados
 - a. En el informe se anexará la curva original registrada de mediciones por el aparato
 - b. Para analizar los datos y se trazará la tangente al punto máximo de dilatación y se medirán las variaciones de altura a partir de dicha tangente. Así mismo se indicarán las temperaturas respectivas a las que la probeta ha sufrido una contracción de:
 - i. 0,6% (contracción real, 0,30 mm): temperatura T0,6
 - ii. 1,0% (contracción real, 0,50 mm): temperatura T1
 - iii. 5,0% (contracción real, 2,50 mm): temperatura T5
 - iv. 10,0% (contracción real, 5,00 mm): temperatura T10
 - v. 20,0% (contracción real, 10,00 mm): temperatura T10
- 6) Observaciones



- a. En caso de ensayos contradictorios se realizarán dos medidas por lo menos sobre otras tantas probetas sacadas de la misma pieza y dirección de refractario



7. DISEÑO DEL EQUIPO

A partir de la información anterior, se propone un diseño de planta piloto para poder estudiar y caracterizar en servicio el comportamiento de los refractarios de base carbono que se sitúan en el crisol de hornos altos.

En base a la información recopilada anteriormente, con este diseño de planta piloto se busca:

- Poder determinar y conocer el comportamiento de los refractarios y con ello estimar su vida útil desde un punto de vista termo-mecánico.
- Estudiar las mejores formas, dimensiones y combinaciones de materiales.
- Comparativa independiente y real de diferentes materiales y suministradores, tanto nuevos como actuales
- La realización de controles de calidad comparables y medibles entre sí
- Simular la influencia de las atmósferas corrosivas en los bloques de refractario
- Estudiar los mejores materiales para las condiciones de servicio de cada horno alto

Así mismo se tratará de ensayos en base a sus propiedades termo-mecánicas, es decir bajo los criterios de servicio de un Horno Alto, como afecta a las dilataciones y comportamientos de los bloques de refractario (en este caso en concreto, bloques de carbono).

Una de las características en las que se tendrá más interés de estudio será la refractariedad bajo carga (Una Norma Española, 1970 pág. 197), la cual se entiende tal que una muestra es sometida a una carga constante y a un determinado régimen de calentamiento por el cual sufre un porcentaje de deformación determinado.

7.1. Requisitos del experimento

Para que se asemeje a las condiciones a las que realmente se ve sometido en servicio, se han de cumplir al menos los siguientes puntos:



- Gradiente de temperatura real
 - En un horno alto los refractarios de carbono están sometidos a un gradiente de más de 1300°C. Esto es debido a que su cara caliente se encuentra sometida a unos 1500°C y su cara fría (refrigerada) está entre 50 y 200°C)
- Generar una atmósfera similar a la que está sometido el bloque de refractario instalado en el horno alto
 - Es decir, ha de tratarse de una atmósfera inerte de manera que no interactúen otro tipo de condiciones atmosféricas con el bloque de carbono a altas temperaturas.
- Capacidad de toma de datos para:
 - Medición del calor disipado (control de temperaturas)
 - Medición de las dilataciones
 - Medición de la atmósfera inerte por seguridad

7.2. Diseño

Para ello se pretende reproducir de una manera fiel tanto las condiciones atmosféricas como de gradiente térmico al que está sometido un bloque de carbono. Dividiremos los requisitos en varios apartados:

- 1) Cámaras de temperatura
- 2) Tamaños de muestras de bloques de carbono
- 3) Simulación por elementos finitos
- 4) Sistema de calentamiento
- 5) Sistema de refrigeración
- 6) Sensores
 - a. De temperatura
 - b. De medición de dilataciones
 - c. De O₂ para adecuar la inertización



7.2.1. Cámaras de temperatura

Se dividiría la planta piloto en 3 zonas distintas, esto es debido a que han de ser completamente independientes para preservar las condiciones de cada zona.

A continuación, se propone un esquema representativo que muestre la similitud que se trataría de lograr entre las acciones sometidas al bloque de refractario en un horno alto y las de una posible planta piloto que simule dichas acciones.

- 1) Cámara de calentamiento: En esta cámara es donde se instalarán los elementos calefactores, los cuales incrementarán la temperatura de la cara caliente de la muestra a testear hasta un mínimo de 1.500°C. El poder calífico deberá ser regulable para ajustar la temperatura y las curvas de calentamiento bajo demanda en el ordenador de control.
- 2) Cámara de muestra: es la cámara en la cual se sitúa la muestra. Esta cámara no puede ser anclada de manera fija a las otras dos cámaras para poder permitir las dilataciones. Esta cámara constará de una tapa superior para permitir la introducción de las muestras y su retirada de manera sencilla y operacional. Este punto puede ser muy crítico si el sellado de esta tapa no es óptimo, introduciéndose aire por lo tanto oxígeno durante un ensayo en la planta piloto. Adicionalmente el carbono es inflamable al reaccionar con el oxígeno, por ello, esta cámara se inertizará de manera continua, así como un sistema de barrido de nitrógeno (inerte) para evitar las posibles fugas.
- 3) Cámara de refrigeración: En esta cámara se instalará un sistema de refrigeración que reducirá y disminuirá la temperatura de la “cara fría” hasta los 50°C. El poder de refrigeración deberá tener una temperatura ajustable bajo demanda.

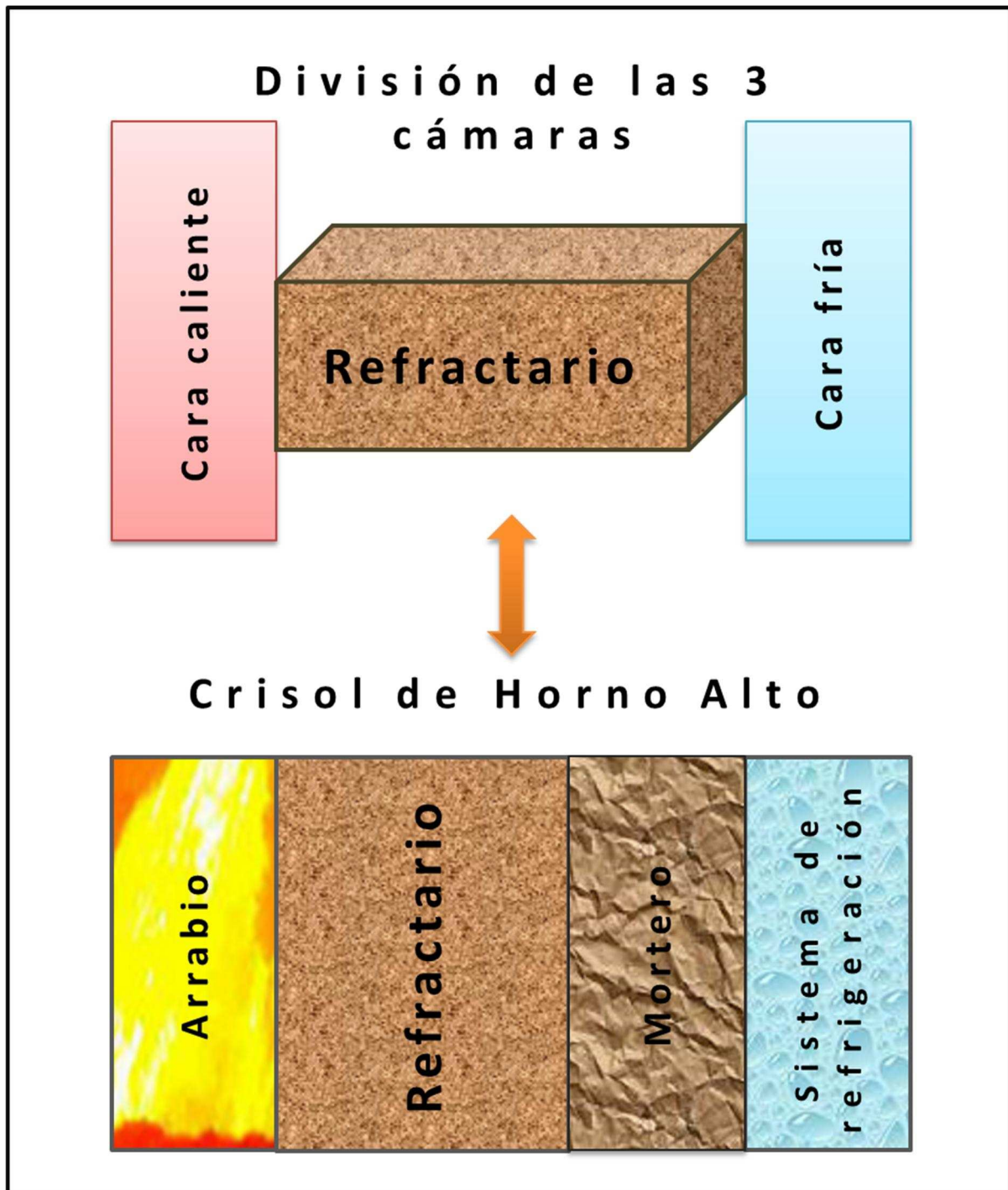


Figura 11: Esquema de la estructura de las cámaras de la planta piloto. Fuente: Elaboración Propia

Estas tres cámaras, entre ellas han de ir completamente aisladas y selladas, por lo que el gradiente térmico solo se propagará en el eje longitudinal y a través del bloque de refractario. De esta manera, se tratará de un gradiente real por la acción del calentamiento de una de sus caras.



El sistema de sellado de la cámara, deberá garantizar que sea estanco a nivel térmico y de fugas, esto puede lograrse mediante dos pasos:

- 1) Una junta doble formada por un cordón de fibra de vidrio grafitada, este material es muy resistente a altas temperaturas, así como un elastómero de silicona térmica que, colocado en la parte inferior, garantizará el perfecto contacto entre la fibra de vidrio grafitada y la superficie superior de la planta piloto.
- 2) El segundo paso, consiste en el sellado de la junta mediante un elastómero de silicona térmica similar al primero.

7.2.2. Tamaños de muestras de bloques de carbono

Es importante definir el tamaño de muestra desde muchos puntos de vista. No solo por su representatividad, sino también por el coste de la construcción y por su operatividad.

En caso de la elección de un tamaño de muestra excesivo, conllevaría asociados unos altos gastos operativos a la planta piloto. Forzando la instalación de un polipasto para su maniobrabilidad o de personal extra para su manejo, lo que encarecería el coste por ensayo.

Tal y como se indica en la pág.24 al definir las características de los refractarios carbonáceos, en concreto lo de base carbono, en su proceso de fabricación se busca una alta porosidad con el objeto de que eso ayude en la dispersión y aislamiento de la temperatura.

Por ello, la densidad de estos refractarios es de entre 1,61 a 1,86 g/cm³ en función del fabricante, siendo su densidad real como material de entre 2,03 y 2,43 g/cm³.

Desde un punto de vista operativo 400 x 400 x 1000 mm es una medida razonable, y manejable, por ello para una densidad de 2,03 g/cm³ siendo el peso del bloque por lo tanto las muestras serán de entre 324'8 kg y 388'8 kg.



- X= 400mm
- Y= 400mm
- Z= 1000mm (variable)

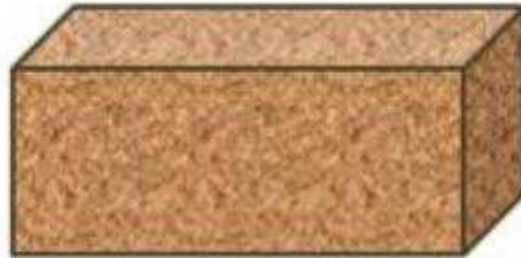
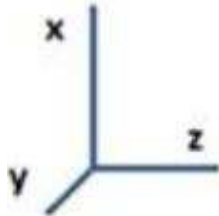


Figura 12: Esquema bloque de carbono. Fuente: Elaboración propia

7.2.3. Estudios previos

Los objetivos de este punto son por una parte la determinación de la distribución de temperatura y por otra las deformaciones del bloque de refractario en función de los ejes (X, Y, Z). Por lo tanto, gracias a ello se podrán acotar tanto los requerimientos de la potencia de calentamiento y enfriamiento como el modo de identificar las dilataciones y que tipo de sistema se necesita para llevar a cabo dichas mediciones.

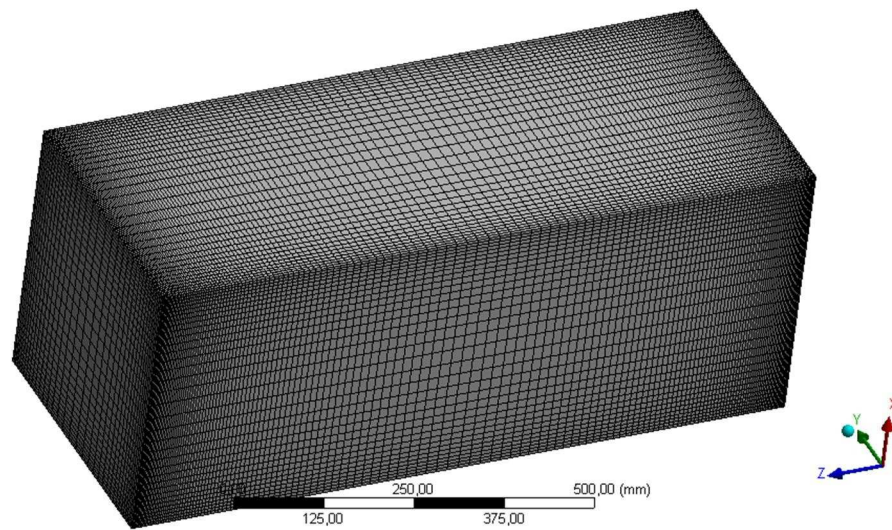


Figura 13: Esquema geométrico de un bloque de refractario y sus ejes X, Y, Z

Para ello, se ha recurrido a un estudio mediante elementos finitos queriendo comparar las características de dos tipos de refractarios diferentes.

Para la realización de una simulación por elementos finitos que nos permita caracterizar y escalar el comportamiento del bloque en una planta piloto frente al de un horno alto, se requieren unos datos de partida.

Los datos de partida se han tomado de dos suministradores de bloques de carbono cuyos valores son los extremos a comparar y son los siguientes:

Tabla 5: Propiedades y las muestras 1 y 2. Fuente: Elaboración propia

Propiedad	Muestra 1	Muestra 2
Densidad	2030 kg/m ³	2430 kg/m ³
Módulo de Young	4.905x10 ⁹ Pa	4.630x10 ⁹ Pa
Coefficiente de expansión térmica	3.67x10 ⁻⁶ °C ⁻¹	4.80x10 ⁻⁶ °C ⁻¹



Calor específico	567.6 J/kg°C	578.1 J/kg°C
------------------	--------------	--------------

Tabla 6: Conductividad térmica en función de la temperatura para las muestras 1 y 2. Fuente: Elaboración propia

Temperatura (°C)	Conductividad Térmica (W/m°C) Muestra 1	Conductividad Térmica (W/m°C) Muestra 2
20	9,30	42,95
600	10,50	31,10
900	10,30	24,60
1200	10,60	34,20

Sistema de calentamiento

El caso de estudio ha sido comparar dos potencias de calentamiento bajo el mismo patrón de calentamiento con las dos muestras de características de refractario.

Es decir, se ha de alcanzar los 1500°C en la cara caliente con margen suficiente, partiendo de una temperatura ambiente de laboratorio que se estima en 20°C.

Se ha limitado el tiempo de calentamiento a una curva de 12 horas de duración.

- Caso I:
 - o Muestra 1.
 - o Simulación de 12 horas de análisis transitorio.
 - o Caso más desfavorable: comenzando a 20 °C hasta que la cara caliente alcanza los 1500 °C.



Figura 14: Calentamiento 4000 W para muestra 1

- Caso II:
 - Muestra 2.
 - Simulación de 12 horas de análisis transitorio.
 - Caso más desfavorable: comenzando a 20 °C hasta que la cara caliente alcanza los 1500 °C.



Figura 15: Calentamiento 6000 W muestra 2

Con el objetivo de alcanzar las condiciones del proceso de calentamiento en un tiempo inferior a 12 horas:



- 4 kW de poder de calentamiento es suficiente para el caso de la muestra 1.
- 6 kW de poder de calentamiento es suficiente para el caso de la muestra 2.

Sistema de refrigeración

El caso de estudio ha sido comparar dos potencias de refrigeración bajo el mismo patrón de enfriamiento con las dos muestras de características de refractario.

Mientras en el apartado anterior buscábamos la curva de calentamiento de 12 horas y de 20 a 1500°C en este caso nos centraremos en el lado opuesto de la muestra, en la cara fría.

Es decir, nos pondríamos en el hipotético caso de que dejásemos calentar toda la muestra hasta 1500°C y se pretendiese enfriar la misma hasta 50°C. Mientras se refrigera la cara fría, en la cara caliente se siguen aplicando 1500°C.

Se ha limitado el tiempo de refrigeración a una curva de 12 horas de duración.

- Caso III:
 - o Muestra 1
 - o Simulación de 12 horas de análisis transitorio.
 - o Caso más desfavorable: comenzando a 1500°C hasta que la cara opuesta alcanza los 50°C y esa se mantiene a 1500°C.

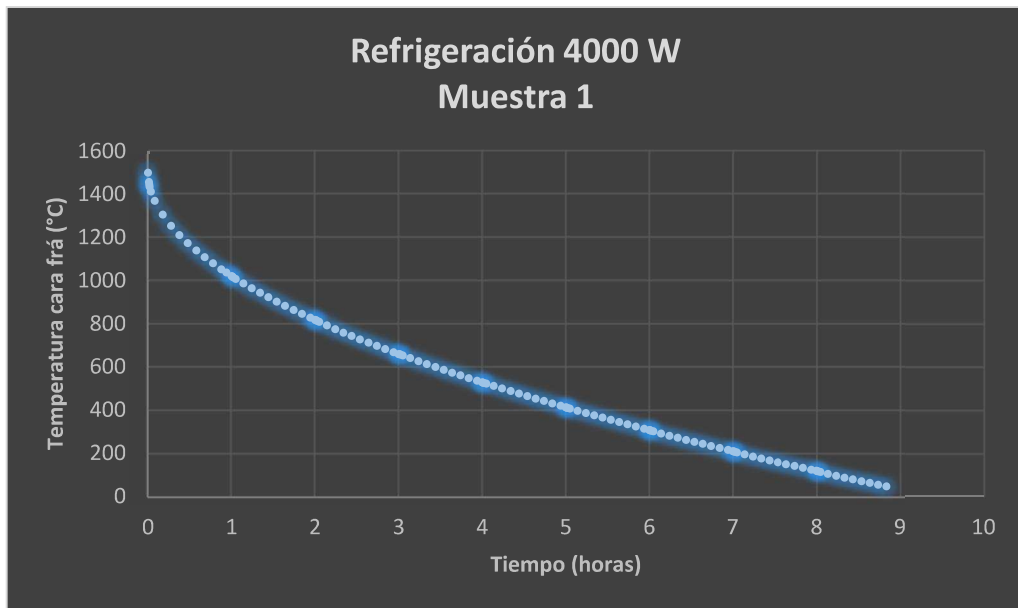


Figura 16: Refrigeración 4000 W muestra 1

- Caso IV:
 - Muestra 2
 - Simulación de 12 horas de análisis transitorio
 - Caso más desfavorable: comenzando a 1500°C hasta que la cara opuesta alcanza los 50°C y esa se mantiene a 1500°C

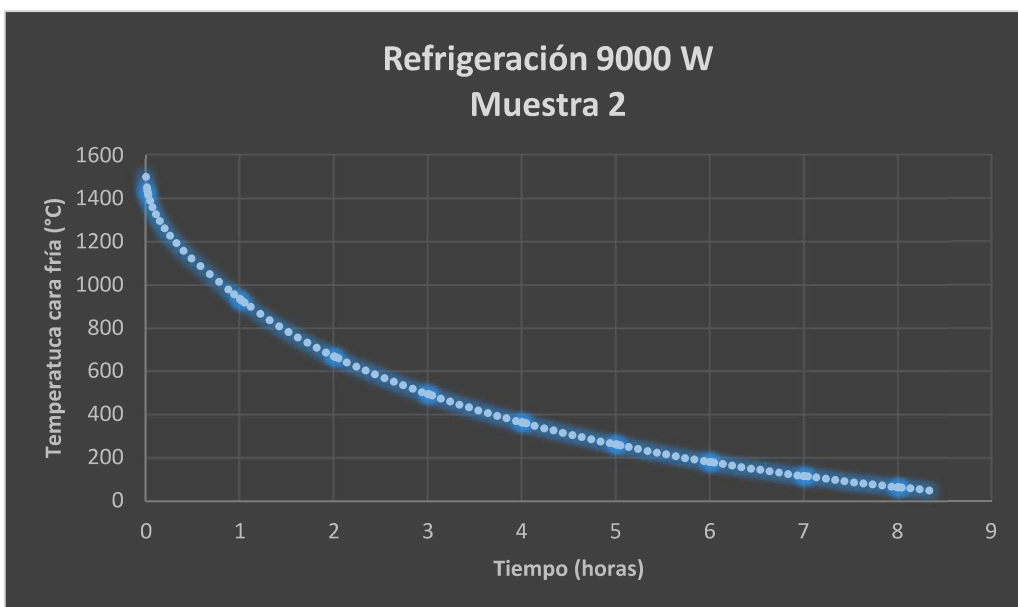


Figura 17: Refrigeración 9000 W muestra 2



- Con el objetivo de alcanzar las condiciones del proceso de refrigeración en un tiempo inferior a 12 horas:
 - 4000 W de potencia de refrigeración es necesario para la muestra 1.
 - 9000 W de potencia de refrigeración es necesario para la muestra 2.

Sistema de calentamiento + refrigeración

Tras abstraer las conclusiones de los casos I, II, III, IV, se combinan los casos de sistemas de enfriamiento y de calentamiento, dando lugar a un ciclo completo de ensayos.

En este paso buscamos la combinación del avance entre el calentamiento y la refrigeración de manera conjunta.

- Condiciones de contorno:
 - Análisis de simulación tipo transitorio de 24 horas.
 - Calentamiento de una de las caras hasta 1500°C y manteniéndolos, refrigeración de la cara opuesta manteniendo un máximo de 50°C
 - Calentamiento desde el comienzo del análisis, por parte de la refrigeración, este sistema requerirá una menor demanda, está solo se dará cuando sea requerido para mantener la cara fría a no más de 50°C.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes con el análisis y estudio en el ciclo de 24 horas con sistemas de refrigeración y calentamiento entrando en servicio a la vez según la muestra 1 y la muestra 2.

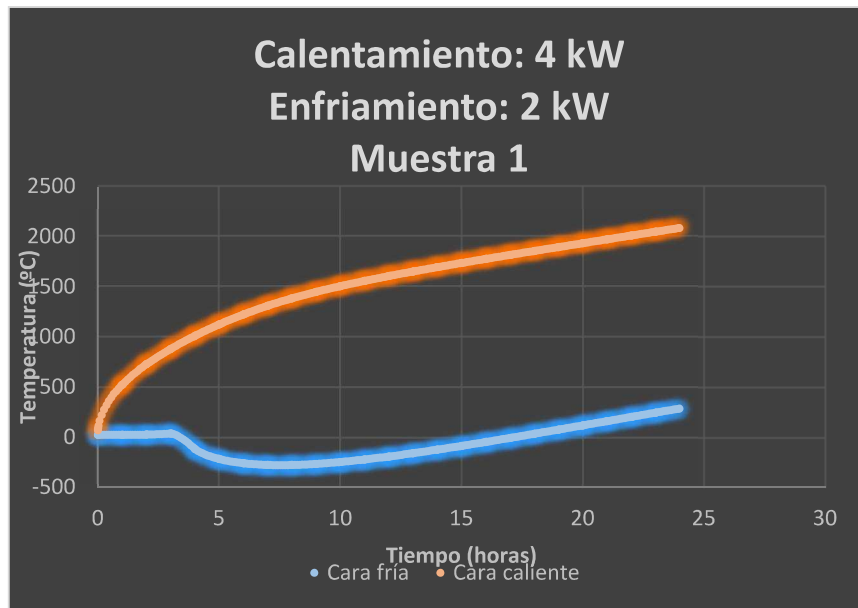


Figura 18: Proceso combinado muestra 1

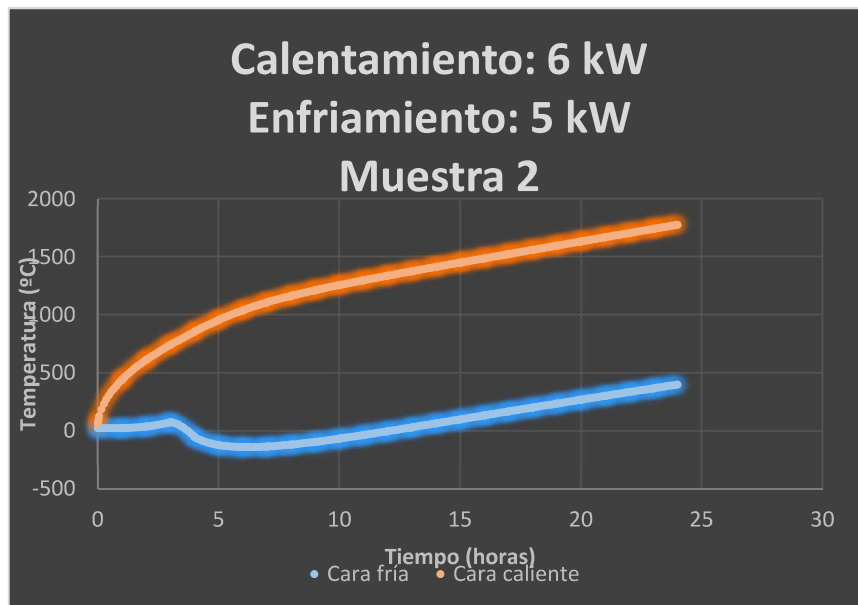


Figura 19: Proceso combinado muestra 2

En la Figura 18 y Figura 19 se muestran los resultados del proceso combinado. Por las características del refractario de la muestra 1 sus condiciones de refrigeración y calentamiento son inferiores que los de la muestra 2. Siendo las siguientes:



Nº Muestra	Potencia Calentamiento (kW)	Potencia Refrigeración (kW)
1	4	2
2	6	5

Tabla 7: Resumen potencias de calentamiento y refrigeración. Fuente: Elaboración propia

Por ello, se toma como mínimas las potencias de 6 kW para el sistema de calentamiento y 5 kW para el sistema de refrigeración.

Todo ello en condiciones ideales, por ello será necesario estimar un cálculo de la potencia disipada y de factor de seguridad desde el punto de vista de que dichos sistemas:

- 1) Buscando que este equipo no trabaje al 100% de su capacidad (prolongando así su vida útil y servicio).
- 2) Previendo la disipación de calor que puede haber en la cámara, no prevista mediante las simulaciones.
- 3) Previsión de futuro. Para que no se vea limitado en el futuro el sistema queda ya previsto para los ensayos refractarios de mayores exigencias térmicas esta planta piloto para garantizar la utilidad de la planta piloto y adaptarla a futuras necesidades de ensayos. Entre otros puntos pueden darse los siguientes 3 casos:
 - a. Aumento del tamaño y las muestras (y por tanto se necesitará más potencia al ser un mayor volumen y superficie a calentar).
 - b. Cambio de las conductividades térmicas de los materiales.
 - c. Nuevos requerimientos de temperatura y gradiente (caso en el que se refrigere más la cara fría o que se necesite calentar la caliente a una temperatura superior a la actual).

Por ello se ha seleccionado una potencia mínima de 18,5 kW para el sistema de calentamiento y una potencia mínima de 10 kW para el sistema de enfriamiento.

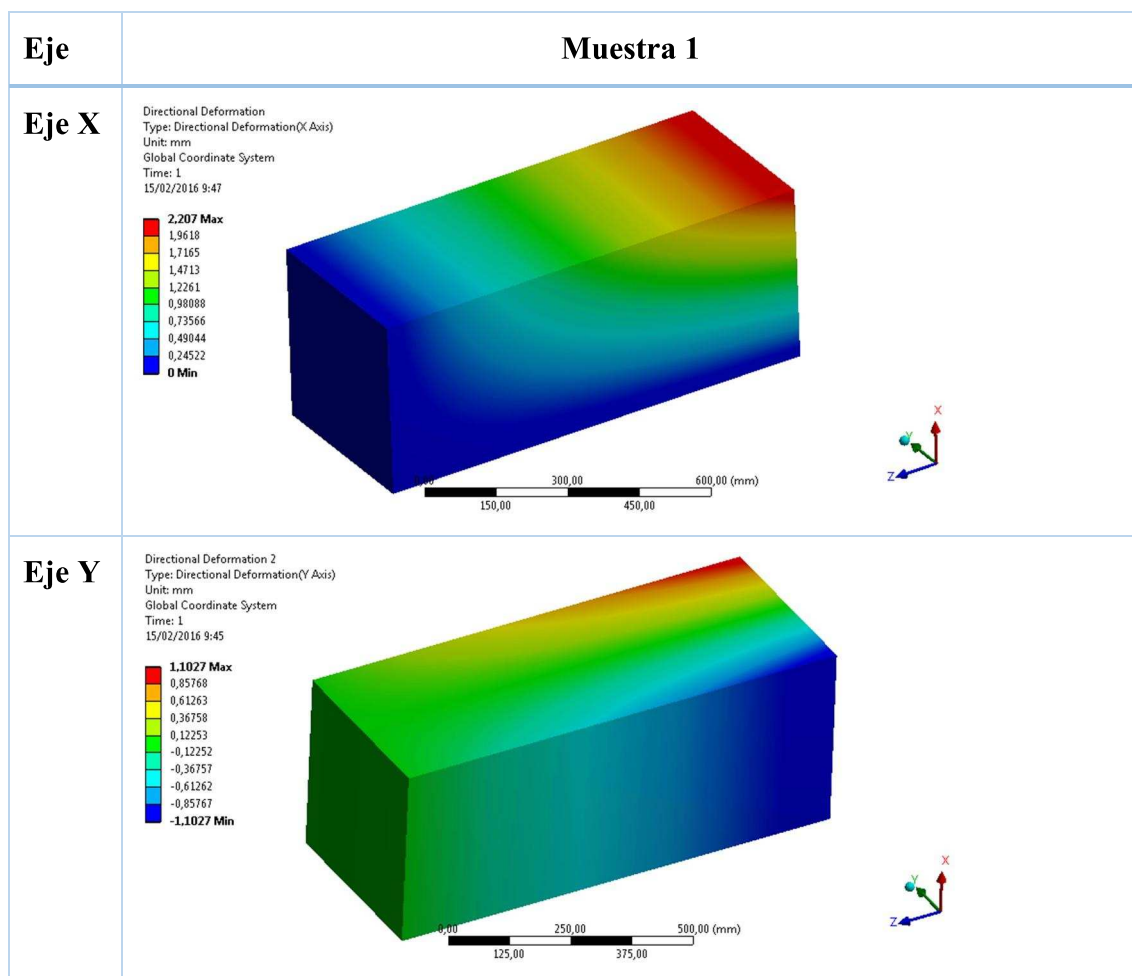


Sistema de medición de las dilataciones

Según los pre-estudios anteriores de temperatura, se muestran a continuación las dilataciones según los ejes X, Y, Z de las muestras 1 y 2 para el caso más desfavorable en cada uno.

Muestra 1			
Δx_{max} (mm)	2.2070	Δx_{min} (mm)	0
Δy_{max} (mm)	1.1027	Δy_{min} (mm)	-1.1027
Δz_{max} (mm)	1.6528	Δz_{min} (mm)	-1.7492

Tabla 8: Dilataciones máximas y mínimas muestra 1



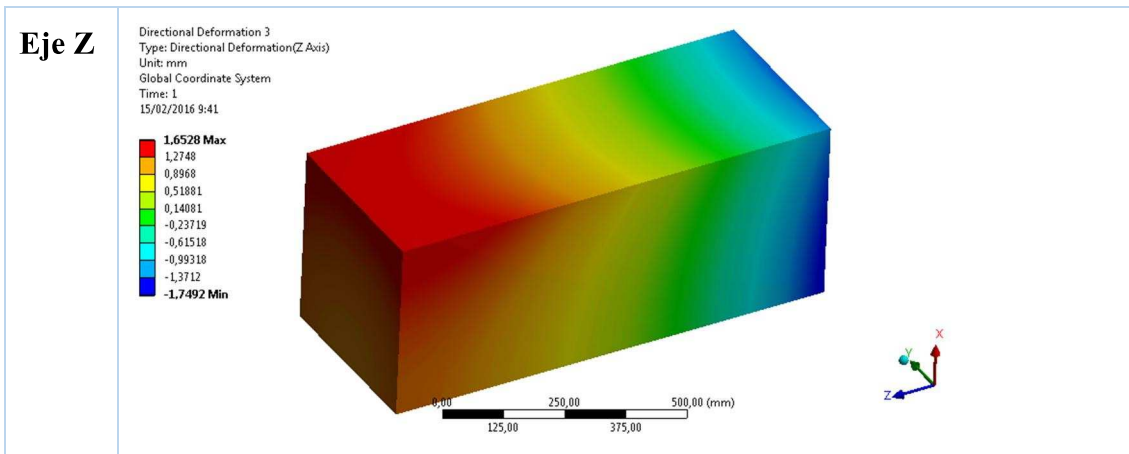
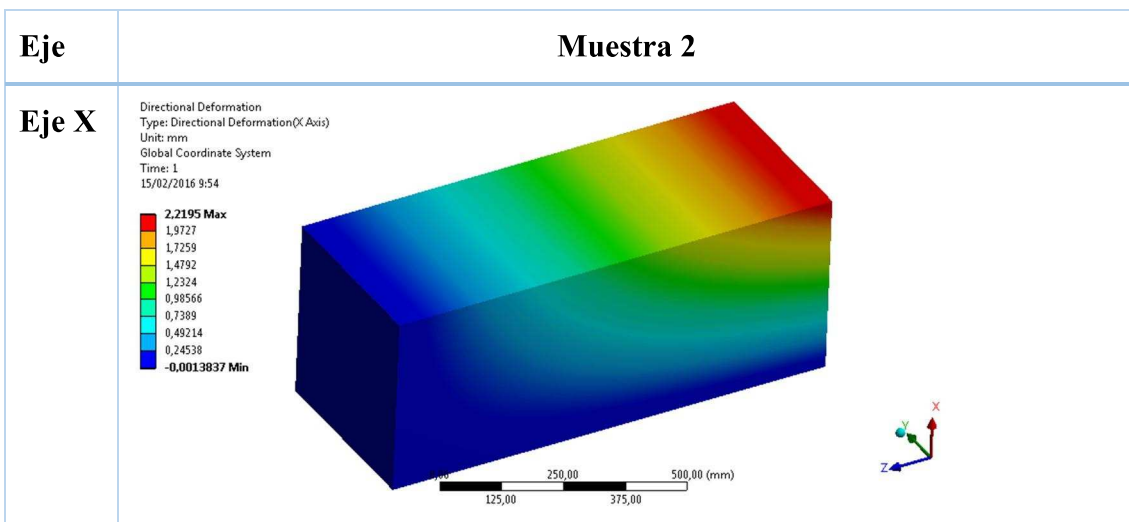


Tabla 9: Simulación de la muestra 1 en los ejes X, Y, Z

Muestra 2			
Δx_{max} (mm)	2.2195	Δx_{min} (mm)	-0.0014
Δy_{max} (mm)	1.1042	Δy_{min} (mm)	-1.1043
Δz_{max} (mm)	1.5511	Δz_{min} (mm)	-1.6794

Tabla 10: Dilataciones máximas y mínimas muestra 2

A continuación, se muestran los resultados de las dilataciones según los ejes para la muestra 2.



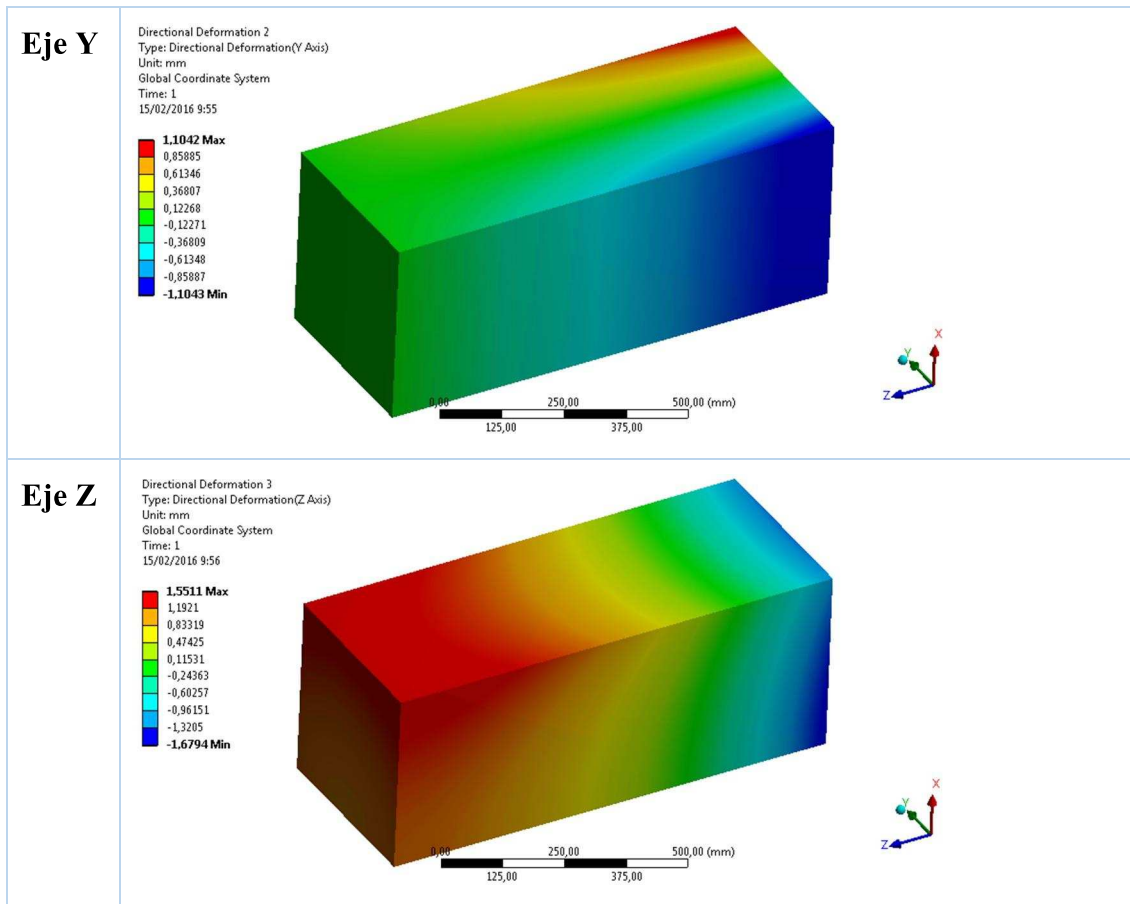


Tabla 11: Simulación de la muestra 2 en los ejes X, Y, Z

7.2.4. Sistema de calentamiento

En el ANEXO I se recoge la ficha técnica de un modelo de resistencias de calentamiento que cumple con los requisitos de este ensayo. Es decir, son capaces de trabajar en distintas atmósferas, resisten las temperaturas de calentamiento, gran capacidad de disipación térmica, y pueden trabajar en serie con otras resistencias si en el futuro se deseara ampliar la instalación de las mismas.

Tal y como se muestra en la Tabla 12 para una atmósfera de nitrógeno, estas resistencias pueden alcanzar los 1600°C.



TABLE A				
MAXIMUM RECOMMENDED ELEMENT TEMPERATURES IN ATMOSPHERES				
Atmosphere	MD-31		MD-33	
	°C	°F	°C	°F
Air	1700	3090	1800	3270
Nitrogen	1600	2910	1700	3090
Argon, helium	1600	2910	1700	3090
Dry Hydrogen, dewpoint -80°C (-112°F)	1150	2100	1150	2100
Moist hydrogen, dewpoint 20°C (68°F)	1450	2640	1450	2640
Exogas (e.g. 10% CO ₂ , 5% CO, 15% H ₂)	1600	2910	1700	3090
Endogas (e.g. 40% H ₂ , 20% CO)	1400	2550	1450	2640
Cracked and partially converted ammonia (=8% H ₂)	1400	2550	1480	2650

Tabla 12: Temperatura de las resistencias en función de la atmósfera. Fuente: (Heating elements)

A continuación, se muestra un esquema de las resistencias, el n° total de las resistencias a instalar, será en función de la resistencia comercial que se decidiese seleccionar.

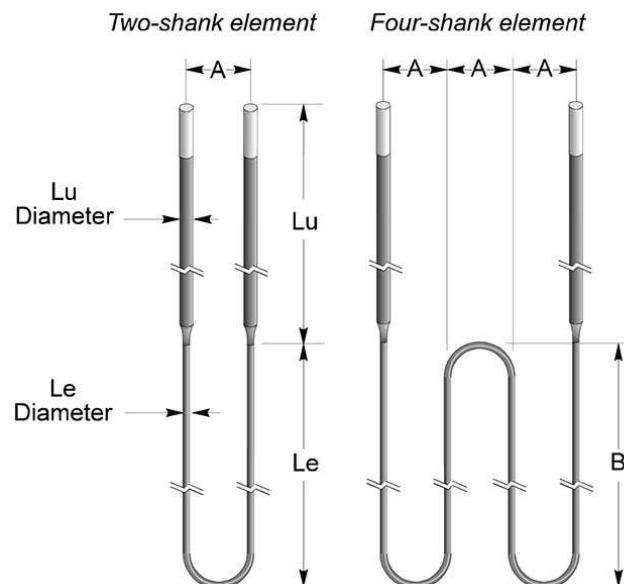


Figura 20: Esquema de las resistencias Moly-D. Fuente: (Heating elements)

7.2.5. Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración como se ha enunciado en el punto 7.2.3 será de 10 kW. La cámara de refrigeración ira unida a un cilindro neumático para su aproximación a la muestra de manera controlada desplazándose por al menos 2 barras de guiado. Dicho sistema podrá ejecutarse mediante una cámara de cobre refrigerada en la zona fría de la



muestra con un sistema de evacuación de calor y las barras de guiado deberán ser de acero inoxidable.

La cámara de refrigeración que solidaria a la zona de guiado de la muestra de refractario podrá ponerse en contacto con el refractario de manera directa o unida mediante un composite para de esta manera no alterar las características del refractario debido al contacto directo. El sistema de refrigeración se completa con un depósito de mínimo 1m³ de agua, preferiblemente desmineralizada, una bomba de recirculación y un equipo de intercambio de calor para garantizar el mantenimiento de la temperatura deseada durante todo el proceso de ensayo.

7.2.6. Sensores

La instrumentación y sensórica son parte clave en el diseño. Una mala selección de estos componentes puede derivar en los siguientes fallos principales:

- Errores de medida debidos a que en el rango de temperaturas de funcionamiento el sensor seleccionado tenga desviaciones de medida o quede inutilizado.
- Error de medición de la atmósfera: produciendo un alto riesgo de que la muestra de carbón se inflame al contacto con el oxígeno.

Por ello se han dividido en al menos 6 bloques de sensores de medición para un correcto funcionamiento de la planta piloto

- Termopares

Un termopar es un sensor de temperatura formado por dos hilos de materiales y propiedades físicas distintas y conocidas unidos por un único extremo, siendo el punto de unión el punto de medición de la temperatura.



Figura 21: Esquema interior termopar. Fuente: (WIKA, 2016)

Al calentarse el punto de medición, se mide en los dos extremos separados una tensión que es proporcional a la temperatura del punto de medición. Dicha tensión se genera entre los hilos debido a la diferente densidad de electrones en ambos materiales metálicos y por la diferencia de temperatura entre el punto de medición y el otro extremo de ambos hilos (WIKA, 2016).

Por ello para el diseño, se valora la inclusión de los siguientes termopares:

- 1 termopares para medir el calor evacuado por el sistema de enfriamiento
- 2 termopar para medir la temperatura en la cámara central (en el caso de que se metiesen dos ladrillos de refractario para ver su conductividad térmica)
- 1 termopar para medir en la cara caliente (y controlar la curva de calentamiento)

Para la selección del termopar se puede acudir a gráficas como la que se muestra a continuación, donde se ve la temperatura de lectura frente a la tensión termoeléctrica.

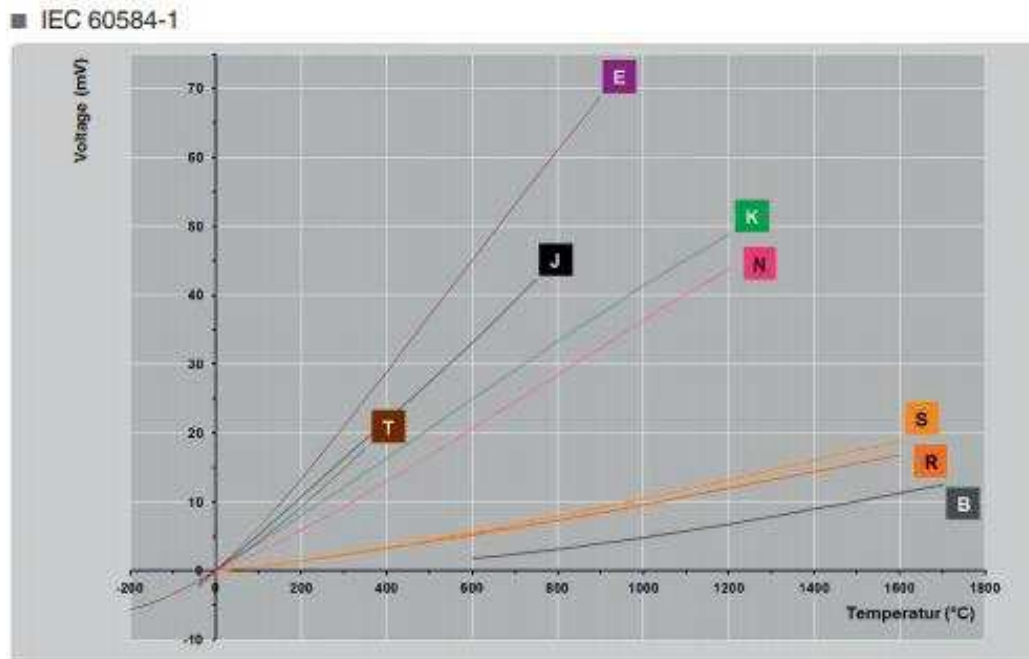


Figura 22: Representación de la tensión termoeléctrica frente a la temperatura para termopares B, E, J, K, N, R, S, T. Fuente: (WIKA, 2016)

Dichos termopares se seleccionarán mediante una ficha técnica similar a la del ANEXO II, siendo para la cara caliente seleccionado un termopar tipo R dadas las altas temperaturas de medición ($>1500^{\circ}\text{C}$) y siendo las máximas de este tipo de termopar cerámico 1600°C .

Así mismo, se instalarán de una forma similar al esquema inferior.

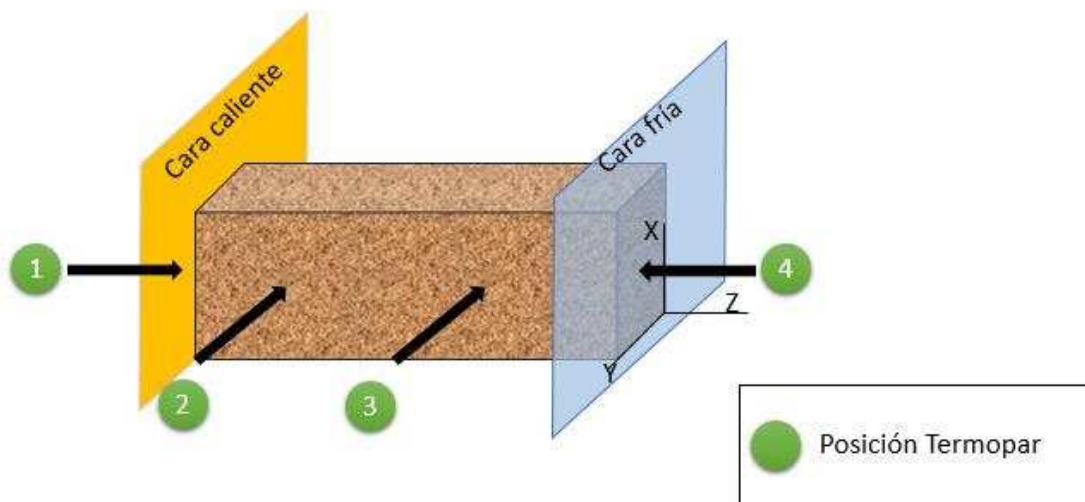


Figura 23: Esquema propuesta posición de los termopares. Fuente: Elaboración Propia



- 1 sensor de presión para medir la presión en la cámara central

Con el objeto de conocer en todo momento la presión dentro de la cámara, es necesario incluir un sensor de presión. Un sensor de presión capacitivo está compuesto por dos láminas metálicas separadas una distancia determinada formando un condensador. Cuando una de las dos láminas metálicas se somete a una presión, la distancia entre ambas láminas disminuye y por lo tanto varía la capacidad del condensador. Esta variación de la capacidad se puede medir obteniendo así la medida de la presión aplicada (SMAR, 2012)

- 1 sensor de O₂ para medir la concentración de O₂ en la cámara central

Para el propósito de funcionamiento de este test, parece adecuado el método óptico para la medida de oxígeno disuelto. Su ventaja es que elimina las desventajas relativas al método que presentan otros métodos tradicionales. El principio LDO está basado en el fenómeno físico de la luminiscencia, que se define como la propiedad de algunos materiales (luminóforos) de emitir luz cuando son excitados por un estímulo diferente del calor; en el caso del principio LDO, el estímulo es la luz (Häck).

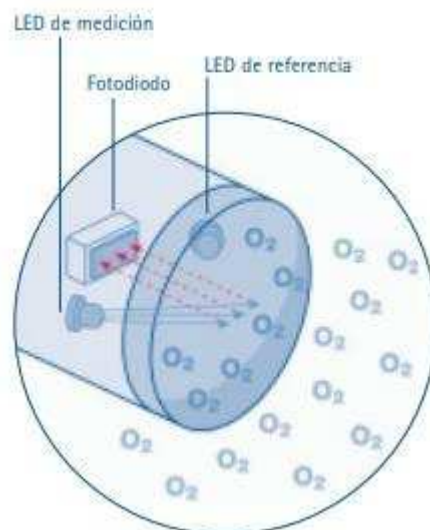


Figura 24: Esquema funcionamiento medidos de oxígeno LDO de HACH LANE. Fuente: (Inter empresas)



- Sensores LVDT (Transductor diferencial de variación lineal)

Con estos sensores se puede medir el desplazamiento y por tanto las dilataciones de las muestras de refractario. Dichos sensores están compuestos normalmente de tres bobinas, la bobina primaria (centro), y las secundarias en los extremos superior e inferior, al desplazarse el émbolo empujado por la dilatación del refractario, este conectado al núcleo ferromagnético cilíndrico provoca una variación en el campo magnético del interior del sensor, esta variación depende de la distancia del material y linealizada y amplificada suministra una tensión proporcional al desplazamiento (Guemisa).

Dado que se busca para medir las dilataciones en los 3 ejes, se propone la colocación de 8 sensores LVDT a lo largo de la muestra. No se sitúan dos en el eje Z debido a que los desplazamientos de la cara fría son ínfimos respecto a la cara caliente y a que no se permite la dilatación al situar esa cara con el sistema de refrigeración.

El modelo propuesto se puede ver en el ANEXO I

La implantación de los sensores puede ser tal que así:

- El cilindro neumático que se aproxima a la muestra para la medición de las dilataciones hace contacto con el refractario, ha de ajustarse y tomar ese punto como “CERO” para las mediciones de las dilataciones. Las dos barras de guiado serán esos puntos de contacto.
- Así mismo, se instalarán en la estructura de la zona caliente barras de contraste para corregir y dar mayor fiabilidad a las medidas de dilatación

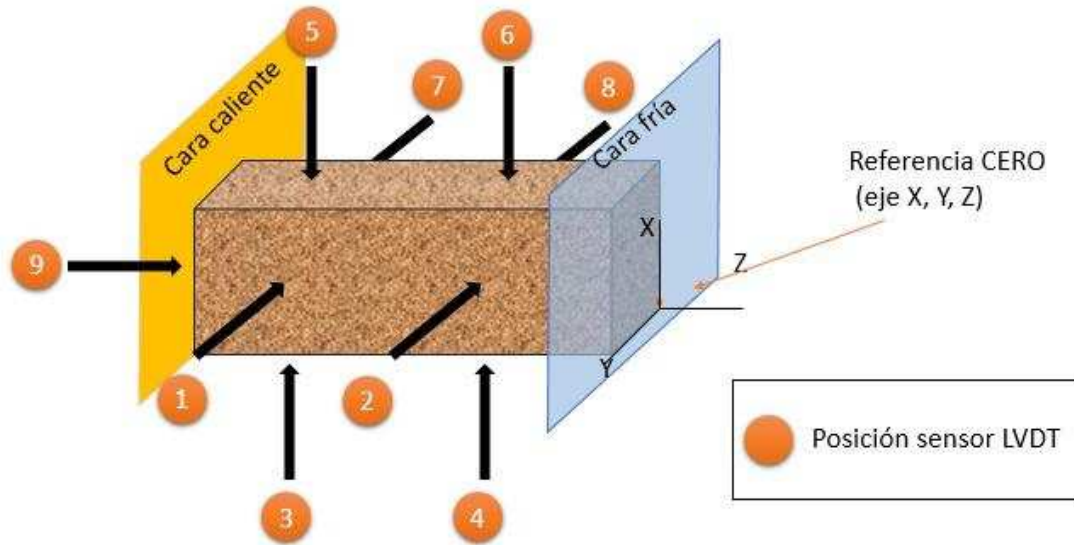


Figura 25: Esquema de posibles posiciones sensores LVDT. Fuente: Elaboración propia

7.3. Modo de funcionamiento

A continuación se describe la operativa según el diseño propuesto.

En un primer paso, con la tapa abierta y el sistema de enfriamiento totalmente recogido, el operador introduce la muestra hasta apoyarla en el soporte del sistema de calefacción, activando el control del cilindro neumático y desplazando la muestra otra vez para introducirla en la cámara de calentamiento hasta que haga tope con el lado situado en la boca de la cámara

Una vez colocada la muestra, se cierra la cámara para que quede aislada completamente. A continuación, se deberá activar el sistema de inertización, que consiste en un barrido por nitrógeno con un caudal elevado para expulsar el aire de la cámara, una vez inertizado, el caudal de nitrógeno durante los ensayos disminuirá, aunque se mantendrá por precaución.

Una vez el medidor de oxígeno, indique que los niveles son inferiores a los marcados por seguridad, el ensayo podrá pasar a la fase de calentamiento de la muestra según la curva de calentamiento indicada por el operador.



Durante esta fase según lo indicado a la planta piloto, se seguirá una curva de calentamiento y un modo de refrigeración según:

- 1) El gradiente a simular
- 2) Tiempo de ensayo a simular
- 3) Condiciones de trabajo

Durante el ensayo se podrán observar, registrar y visualizar al menos los siguientes datos del proceso en tiempo real. Adicionalmente estas variables, generan avisos y alarmas de ensayo por si ocurriese alguna situación de emergencia.

- Temperatura en la cara caliente
- Temperatura en la cara fría
- Dilatación en el eje X
- Dilatación en el eje Y
- Dilatación en el eje Z
- Potencia de refrigeración
- Control de junta (proyectado para el caso en el que se introduzcan dos refractarios de diferentes características y observar los cambios en la zona de unión)
 - o Dilatación en el eje X
 - o Dilatación en el eje Y
 - o Dilatación en el eje Z
 - o Temperatura en el eje X
 - o Temperatura en el eje Y
 - o Temperatura en el eje Z

Una vez se decida concluir el ensayo, ha de hacerse de manera progresiva, es decir, primero se hará una curva de calentamiento inversa (no se apagará directamente para evitar un choque térmico al refractario que impida una caracterización mediante ensayos destructivos en el futuro).

Cuando se haya disminuido la temperatura, se detendrá también el barrido de nitrógeno hasta llegar a una temperatura considerada de “apertura de tapa” en la cual se finalizará la refrigeración a su vez.



Cuando la temperatura será inferior a 50°C se procederá a retirar el ladrillo mediante medios de izado y elevación debido a su peso.

Posteriormente, se generará un informe en el que estarán recogidos todos los datos numéricos de las variables que han intervenido en dicho ensayo. Estas variables analógicas se habrán ido recibiendo en un PLC conectado a su vez con un PC que controla el proceso.

Así mismo el sistema (PC) almacenará este informe en una carpeta destinada a histórico de ensayos y fallos.

8. PRESUPUESTO

A continuación, se propone un resumen de presupuesto según las partidas descritas a lo largo de este TRABAJO. En el ANEXO IV.

Dicho presupuesto (impuestos incluidos) asciende a 90.863,30€ en Junio de 2018.

RESUMEN PRESUPUESTO			
Capítulos			
1.1	Ejecución material		33.140,00 €
1.2	Presupuesto contrata		13.114,3 €
1.3	Presupuesto de ejecución	1.1+1.2	46.254,38 €
%			
1.4	Gastos generales (%)	13	6.013,07 €
1.5	Beneficio industrial (%)	7	3.237,81 €
1.6	Total	1.3+1.4+1.5	55.505,26 €
%			
1.7	Revisión y visado del proyecto (%)	1,2	666,06 €
1.8	Ingeniería		18.900,00 €
1.9	TOTAL sin impuestos	1.6+1.7+1.8	75.071,32 €
%			
1.10	Impuestos- IVA (%)	21	15.764,98 €
1.11	TOTAL (impuestos incluidos)	1.9+1.10	90.836,30 €

Pudiéndose actualizar estos precios según mercado y según la siguiente fórmula para cada partida o grupos de partidas según la documentación de la Escuela de Ingenieros Agrónomos. Universidad de Castilla-La Mancha, 2009.

$$P_t = P_o \left[A_o + \sum_{i=1}^{i=n} \left(A_i \frac{P_{it}}{P_{io}} \right) \right]$$

En la fórmula anterior, se considera n como el número de partidas o conceptos que influyen en el presupuesto. Siendo el resto de factores:

- P_t = Precio previsto en la fecha de ejecución o de entrega t .
- P_o = Precio presupuestado en la fecha de redacción del proyecto, 0.
- A_o = Fracción del precio total que mantiene fijo.
- A_i = Coeficiente de ponderación o peso del correcto coste i en el precio total.
- p_{it} y p_{io} = Precio unitario del concepto i en las fechas t y o respectivamente.

Las fórmulas de revisión de precios han sido aprobadas por el Decreto 3650/1970, el Real Decreto 2167/81, y el Decreto 2341/75.



9. CONCLUSIONES E IDEAS DE FUTURO

El horno alto es una instalación especialmente crítica en la ruta del proceso siderúrgico integral, por ello cobra importancia su funcionamiento. Las paradas más largas y económicamente costosas de este, están directamente relacionadas con los cambios de refractarios, debido a una mala elección o ejecución en su instalación.

Por lo tanto, en este TRABAJO se ha propuesto el diseño de una planta piloto que pueda caracterizar diversos tipos de refractario bajo unas condiciones de servicio y trabajo semejantes a las de un horno alto en funcionamiento, por medio de ensayos termomecánicos en los que observar la respuesta del material y sus dilataciones.

Se trata del diseño de un equipamiento ligero que permite llevar esta caracterización a plantas industriales o a instalaciones de suministradores para garantizar que lo especificado es lo suministrado.

El coste estimado para este diseño es de **90.863,30 €** frente a una operación como el refractariado de un horno alto que oscila entre los 92 y 127 millones de euros.

La ejecución de una planta piloto de este tipo implicaría menos del 0,08% de la inversión total, pudiendo aportar conocimiento y certeza sobre los materiales antes de su puesta en servicio.

Con más estudios futuros se podría valorar la implicación de los siguientes puntos:

- Prueba de refractarios de diferentes características y ver la interacción entre ellos
- Adaptación de la planta piloto para otro tipo de refractarios (rangos de temperatura y tamaños)
- Adaptación de la atmósfera de la planta piloto para simular el interior de hornos altos, hornos de recalentamiento o de otras industrias.



10. BIBLIOGRAFÍA

AENOR. 1971. UNE 61042- Materiales refractarios. *Ensayo de resistencia pirosfópica*. Madrid : s.n., 1971. Vol. 61042.

Blanco, Francisco. www6.uniovi.es. [En línea] [Citado el: 2018 de Abril de 4.] <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion1.Refractarios.Introduccion.pdf>.

Brosnan, Denis A. Refractories Handbook. New York : Clemson University.

Carolina Perrino. 2017. Culturacientífica. [En línea] Abril de 2017. [Citado el: 2018 de Junio de 7.] <https://carolinaperrinoblog.wordpress.com/2017/04/03/proceso-del-alto-horno/>.

Cerameet. Cerameet. [En línea] [Citado el: 13 de Mayo de 2018.] http://cerameet.com/images/article_images/43_1.png.

del Olmo Roales, Amparo. 2008. “Desarrollo Sostenible en la utilización de materias primas” V Jornadas Quinta la Vega “Las Industrias Siderúrgicas, Energéticas y Cementeras. El Aprovisionamiento”. 2008.

DiarioMotor. 2013. Diariomotor.com. [En línea] 29 de Octubre de 2013. [Citado el: 2018 de Junio de 29.] <https://www.diariomotor.com/2013/10/29/hyundai-nos-ensena-como-se-ensambla-un-automovil-desde-el-mineral-de-hierro-hasta-su-primer-arranque/hyundai-steel-aceria-04/>.

Dzermejko, A J, Bared, D F y Hubble, D H. Ironmaking Refractory Systems Chapter 4. *The Making, Shaping and Treating of Steel*.

Equipo Técnico del Centro de Formación ArcelorMittal Asturias (La Toba). 2007. *El proceso siderúrgico*. s.l. : ArcelorMittal, 2007.

Escuela de Ingenieros Agrónomos. Universidad de Castilla-La Mancha. 2009. previa.uclm.es. [En línea] Octubre de 2009. https://previa.uclm.es/area/ing_rural/AsignaturaProyectos/Tema%208.pdf.



Guemisa. Guemisa. [En línea] [Citado el: 16 de Junio de 2018.] <http://www.guemisa.com/articul/pdf/ttd.pdf>.

Häck, Michael. Interempresas.net. [En línea] [Citado el: 16 de Junio de 2018.] https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/87050/Tecnologia_optica_LDO_para_medicion_de_OD.pdf.

Heating elements. [En línea] [Citado el: 30 de Mayo de 2018.] <http://heatingelements.isquaredrelement.com/Asset/Moly-D-technical-brochure.pdf>.

Historias Virgen del Romeral. 2015. Historiasdelromeral2015. [En línea] 17 de Diciembre de 2015. [Citado el: 28 de Junio de 2018.] http://historiasdelromeral2015.blogspot.com/2015/12/carbon-de-coque-vs-carbon-vegetal.html?_sm_au_=iVVtjt4nTjQsr4s6.

Llatas, Elvira Saab. 2013. *Análisis del revestimiento refractario del crisol del Horno Alto. Desgaste y diseño.* s.l. : Universidad de Oviedo, 2013.

Luoyang Yilong Refractory Co.,Ltd. lushanyaxing.en.ec21.com. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2018.] https://lushanyaxing.en.ec21.com/Carbon_Graphite_Brick_Block_for--8768303_8768304.html.

Metfusion. [En línea] [Citado el: 14 de Abril de 2018.] <https://metfusion.files.wordpress.com/2013/08/24-08-2013-0-33-30.jpg>.

Mr. Thomas Yi. cimmgroup.en.made-in-china.com. [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2018.] <https://cimmgroup.en.made-in-china.com/productimage/kKBQVhZJXrYW-2f1j00lZmaDuNUfAge/China-High-Alumina-Brick.html>.

SMAR. 2012. SMAR. [En línea] Marzo de 2012. [Citado el: 2018 de Junio de 16.] <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/LD290MS.pdf>. LD290.

Topf, Andrew . 2016. mining.com. [En línea] 28 de Agosto de 2016. [Citado el: 2018 de Junio de 29.] <http://www.mining.com/dont-go-long-on-iron-ore-aussie-bank/>.

Una Norma Española. 1969. *UNE 61005. Normas de refractarios.* Madrid : Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo, 1969. Normas de refractarios.



—. **1969.** *UNE 61006.* Madrid : Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo, 1969. Normas de refractarios.

—. **1969.** *UNE 61007.* Madrid : Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo, 1969. Normas de refractarios.

—. **1969.** *UNE 61008.* Madrid : Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo, 1969. Normas de refractario.

—. **1970.** *UNE 61038. Normas de refractarios.* Madrid : Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo, 1970. Normas de refractarios.

—. **1971.** *UNE 61042. Normas de refractarios.* Madrid : Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo, 1971. Normas de refractarios.

WIKA. 2016. wikapolska.pl. [En línea] Septiembre de 2016. [Citado el: 15 de Junio de 2018.] https://www.wikapolska.pl/upload/DS_IN0023_es_es_62452.pdf. Hoja técnica WIKA IN 00.23 .



11. ANEXO I

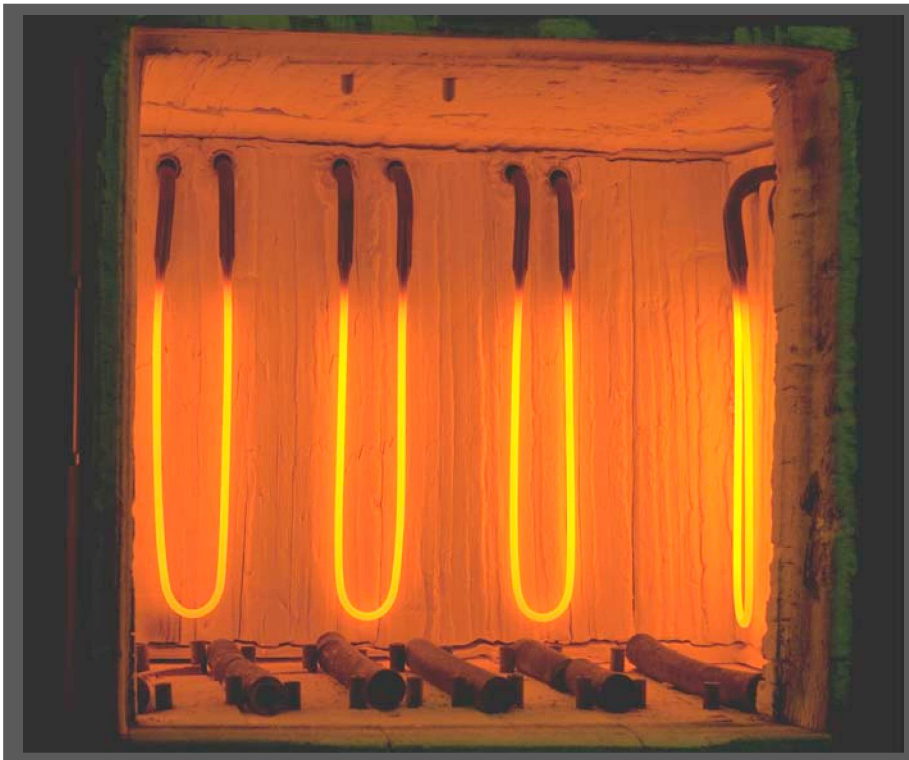
A continuación, se adjuntas las hojas de características técnicas de elementos comerciales que han sido tanto analizados como seleccionados en el diseño de la planta piloto para el sistema de calentamiento.

Moly-D[®]

TECHNICAL HANDBOOK

*High Temperature
Heating Elements
for Electric Furnaces*

Custom made in the U.S.A



I Squared R Element Co., Inc.
12600 Clarence Center Road, Akron NY 14001
Phone: (716) 542-5511, FAX: (716) 542-2100
www.isquaredrelement.com

 **Moly-D[®]**

**Molybdenum
Disilicide
Heating Elements**



I SQUARED R ELEMENT CO., INC.

TABLE OF CONTENTS

General description _____	2
Properties _____	2
First Firing _____	2
Maximum element temperature in various atmospheres _____	3
Maximum element temperature in a vacuum _____	3
Mechanical and physical characteristics of Moly-D material _____	3
Maximum amperes _____	3
Resistance characteristics _____	4
Obtaining hot zone length (Le) _____	5
Maximum hot zone lengths _____	5
Calculating power _____	5
Calculating total length _____	5
Standard “a” dimension _____	5
Calculating hot zone surface area _____	5
Calculating watt loading _____	6
Calculating element power _____	6
Calculating hot zone resistance _____	7
Cold end length outside furnace _____	7
Cold end taper length inside furnace _____	7
Calculating cold end resistance _____	8
Calculating total element resistance _____	8
Calculating distance to wall parallel _____	8
Calculating distance to wall perpendicular _____	9
Calculating bowing distance of hot zones _____	8
Calculating distance to the floor _____	9
Calculating distance between parallel elements _____	10
Calculating the wall length _____	10
Calculating the number of elements along the wall _____	10
Calculating resistance and length of multishank elements _____	11
Elements with bend in Le or Lu _____	11
Recommendations for wiring connections _____	12
Element holders and straps _____	13

GENERAL DESCRIPTION

The Moly-D element is a dense cermet material consisting of molybdenum disilicide (MoSi_2) and a glassy phase silicon dioxide (SiO_2). They can be operated at element temperatures up to 1775°C.

The elements are U shaped and are most frequently used suspended with the bottom of the "U" down. The element consists of two cold ends (Lu) and a U-shaped hot section (Le). The cold ends are twice the diameter of the hot section and are attached by a weld. The extremities of the cold ends are metallized with aluminum to provide a low-resistance contact surface to which the electrical connections are made with flat braided aluminum straps.

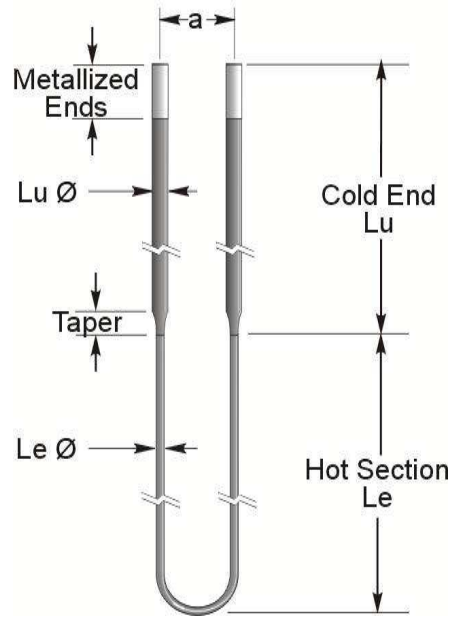
The Moly-D elements are described by the grade MD-31 or MD-33, the diameter of the hot section, the diameter of the cold end, the length of the cold end (Lu), the length of the hot zone (Le) and the distance between the two legs (a). The dimensions are in millimeters (mm). Example: MD-33 3/6 Lu=150 Le=180 a=25 completely describes the element.

The Moly-D element is a resistance type heating element that converts electrical energy to heat energy (Joules Law $W = I^2R$).

PROPERTIES

1. Manufactured to industry established diameters and resistance values in the following diameters: 3/6, 4/9, 6/12, 9/18 and 12/24 and hot zone lengths up to 1400mm long.
2. Moly-D elements may be used at surface temperature up to 1775°C (3230°F), at control furnace temperatures up to 1750°C (3182°F) in oxidizing atmospheres. Lower temperatures are recommended in reducing atmospheres.
3. They provide long service life, ease of replacement, and low maintenance costs.
4. New and old elements can be operated in the same control group.
5. Multiple elements can be connected in series.
6. They have a high power rating, example 22.6 watts per square centimeter at 1450°C (2642°F) furnace temperature.
7. The high power makes possible rapid increases in furnace temperature.
8. They can be used continuously or intermittently.

U-Shape Element



STANDARD ELEMENT SIZE

Element Le/Lu Ø	"a" Distance between legs		Le Ø	Lu Ø	"g" taper Length mm	Metal- lized Ends mm
	mm	mm				
	Min	Std				
3/6	20	25	3	6	15	25
4/9	20	25	4	9	18	40
6/12	40	50	6	12	25	40
9/18	50	60	9	18	30	75
12/24	60	80	12	24	40	100

TWO GRADES ARE OFFERED

Type MD-31 - Maximum element temperature – 1700°C (3090°F).

Type MD-33 - Maximum element temperature – 1800°C (3270°F).

The MD-33 is a higher temperature material and is recommended only when the element temperature exceeds 1700°C. The MD-33 costs more than the MD-31 and there is no increase in element life for the MD-33 if operated below the 1700°C element temperature.

FIRST FIRING

When the elements are new (first used) they must be brought to an element temperature of 1200°C or higher quickly in air. If operated at a surface temperature in the 500°C to 700°C range for any length of time, the elements will be destroyed. After the glaze is formed, the element may be operated at low temperatures as long as the glaze is intact.

ELEMENT OPERATING TEMPERATURES

Moly-D elements can be operated at temperatures up to 1800°C in an oxidizing atmosphere. They can be used in reducing and neutral atmospheres at lower element temperatures.

Table A shows the maximum recommended element temperature for various atmospheres.

Table A MAXIMUM RECOMMENDED ELEMENT TEMPERATURES IN VARIOUS ATMOSPHERES		
Atmosphere	MD-31	MD-33
	°C	°C
Air	1700	1800
Nitrogen	1600	1700
Argon, helium	1600	1700
Dry Hydrogen, dewpoint -80°C	1150	1150
Moist hydrogen, dewpoint 20°C	1450	1450
Exogas	1600	1700
Endogas	1400	1450
Disassociated ammonia	1400	1400
Any members of the Halogen group will attack the silicon dioxide on the element, therefore should be avoided.		
<i>For any special atmospheres, please contact the factory.</i>		

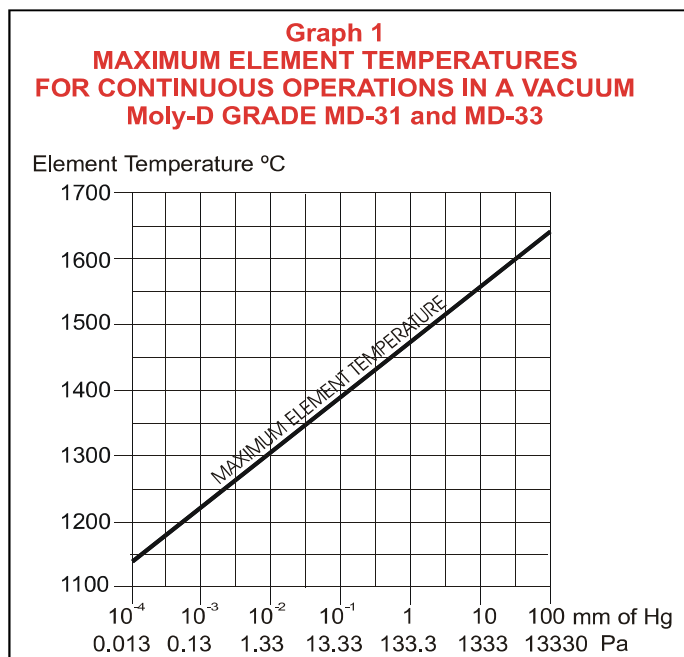
Prior to operating the element in neutral or reducing atmospheres, it is important that they be operated over 1200°C in air to build up the silicon dioxide protective coating. Thirty minutes is usually a sufficient time. For longer life in reducing or neutral atmospheres, the element should be operated periodically at 1200°C or higher in air to replace and insure a strong protective SiO₂ coating.

MECHANICAL AND PHYSICAL CHARACTERISTICS OF MOLYBDENUM DISILICIDE

Density:	5.6 g/cm ³
Porosity:	~1%
Thermal conductivity:	
20-600°C	30 W/m-°K 208 BTU/hr-ft ² -°F/in
601-1200°C	15 W/m-°K 104 BTU/hr-ft ² -°F/in
Coefficient of linear expansion: . .	7.5 x 10 ⁻⁶ °C 4.1 x 10 ⁻⁶ °F
Specific heat capacity at 20°C: . .	420 J/kg-°K 0.10 BTU/lb-°F
Emissivity:	0.70 - 0.80
Resistivity of Moly D material: . . .	page 4, graph 2

VACUUM

Graph 1 shows the maximum recommended element temperature under various vacuum conditions. Pure molybdenum or graphite is usually a better choice of a material for high vacuum furnaces.



Various units of measurement are used in the vacuum industry. A reference is provided:

- 1 atmosphere
- = 760 mm of Mercury (mm Hg)
- = 760 Torrs
- = 760,000 microns
- = 101,325 Pascals (Pa)
- = 101,325 Newtons per square meter (N/m²)
- = 1,013,250 Dyne/cm²
- = 1.013 Bar
- = 14.69 pounds per square inch (psi)

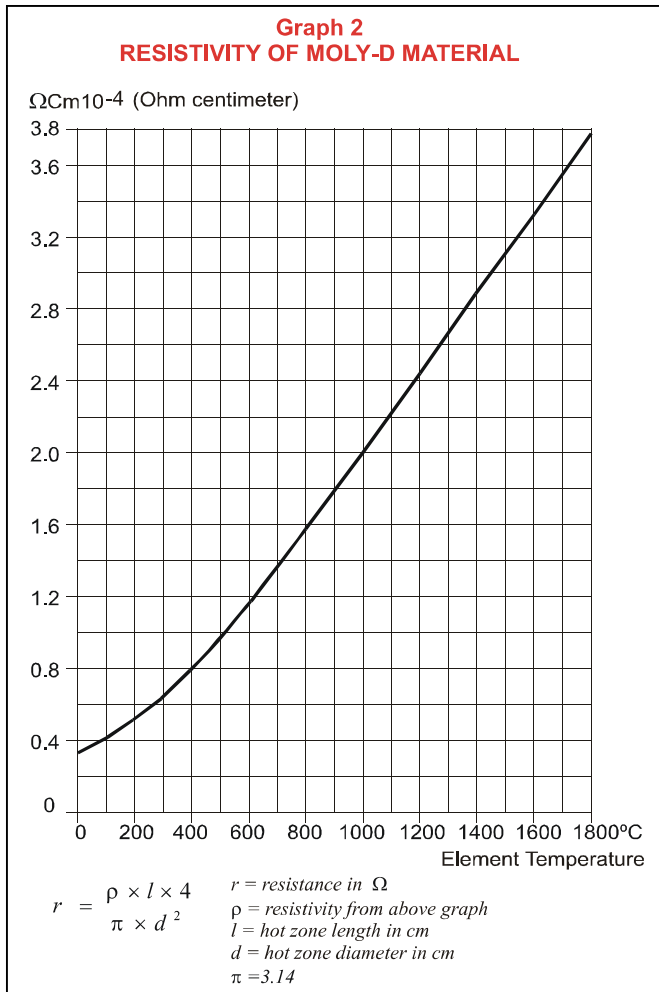
MAXIMUM AMPERES

The Moly-D elements are low-voltage high-current elements. Below is the maximum recommended current for each standard hot zone diameter. The hot zones can take more power but the cold ends tend to over heat and cause strap and clamp failure.

Maximum Recommended Amperes					
Hot Zone Diameter in mm	3	4	6	9	12
Current Amperes	75	115	200	365	560

RESISTANCE CHARACTERISTICS

The Moly-D heating element is a resistant type heater that converts electrical energy to heat energy according to Joules Law $W=I^2R$. W = Power in watts, I = Current in amperes, R = Resistance in ohms. Molybdenum disilicide increases in resistance by a factor of approximately 10 between 20°C and 1800°C. See graph 2. Therefore the hot zone temperature must be known before the resistance of the hot zone can be determined.



The scientific community and resistance wire manufacturers have standardized on the unit ohm-centimeter for resistivity. The ohm-centimeter is the resistance of the material with a cross sectional area of one square centimeter (1 cm^2), one centimeter (1 cm) in length.

To obtain the resistance of a 3mm diameter hot zone one mm in length at 1675°C, use the equation

$$r = \frac{\rho \times l \times 4}{\pi \times d^2}$$

from graph 2 select element temperature

of 1675° and follow this line until it intersects the heavy black line. Then follow the horizontal line to the left and record resistivity $\rho = 3.48 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$

l = hot zone length in cm (0.1 cm)
 d = diameter of element in cm (0.3cm)
 4 = to convert diameter to radius

$$r = \frac{3.48 \times 10^{-4} \times 0.1 \text{ cm} \times 4}{\pi \times 0.3^2 \text{ cm}}$$

$$= \frac{.000348 \times .4}{0.2826}$$

$$= 0.000493 \Omega$$

$$= 4.93 \times 10^{-4} \Omega$$

The (r) is the resistance of 3mm diameter hot zone 1mm long at 1675°C.

The same method can be used to compute the resistance of any rod diameter of any length at any temperature. A simpler method is shown below.

The Moly-D element is a high temperature element that performs well and gives long service life at its rated temperature of 1700°C or 1800°C. Therefore, we recommend designing to element temperatures of 1675°C for the grade MD-31 and 1775°C for the grade MD-33 in air.

The resistance values for 1mm of length for standard element diameters at 1675°C and 1775°C are shown on Table B.

Table B		
Hot	r Resistance in ohms per mm of length @ 1675°C and 1775°C	
Section Diameter	MD-31 1675°C	MD-33 1775°C
3	.000493	.000523
4	.000277	.000294
6	.000123	.000131
9	.000054	.000058
12	.000030	.000032
18	.000013	.000014

The resistance temperature characteristic of the Moly-D element material is almost linear from 1800°C down to 1400°C. To estimate the resistance at lower hot zone temperatures, multiply the higher temperature resistance by 0.94 for each 100°C decrease in hot zone temperature.

The estimated resistance of a MD-31, 6mm diameter hot zone, 1mm long, at 1575°C is: (r_{1675} from table B).

$$r_{1575} = (r_{1675})(.94)$$

$$r_{1575} = 0.000123(.94)$$

$$r_{1575} = 0.000116 \Omega / \text{mm}$$

OBTAINING THE LENGTH OF THE HOT ZONE (L_e)

The molybdenum disilicide softens at temperatures over 1200°C therefore will elongate or stretch when suspended vertically. The heating element can be destroyed if it comes in contact with the floor of the furnace while hot and under power. To allow for the increase in length and keep it a safe distance above the floor, the hot zone (L_e) must be shorter than the heated chamber height.

To obtain the length of the hot zone, two steps are required.

1. At the location in the furnace where the elements are suspended, determine the height (H) in millimeters.
2. The taper portion of the cold end (L_u) extends into the hot chamber. This cold end taper length varies with the diameter of the element. See Table D to obtain the taper length (g) inside the hot chamber.

To obtain the hot zone length (L_e) use one of the following formulas:

for H less than 200mm $L_e = H - 10 - g$

for H over 200mm $L_e = 0.95H - g$

H = height of furnace in mm.

g = taper length in mm from Table D.

10 = minimum recommended vertical distance beneath the element in mm.

0.95 = shortening of the L_e to allow for the element to stretch and be a safe distance above the floor.

The following are maximum length limitations on the hot sections: 3/6 and 4/9 maximum $L_e = 400\text{mm}$
6/12, 9/18 and 12/24 maximum $L_e = 1400\text{mm}$

The 6/12, 9/18 and 12/24 maximum lengths are reduced based on element temperatures over 1600°C, see graph 3.

METHOD TO COMPUTE THE POWER ON A U-SHAPED MOLY-D ELEMENT

To compute the power in watts on the Moly-D element the length of the hot zone, the surface area of the hot zone, and the watt loading in watts per cm^2 must be determined.

The heating length of a "U" shaped element consists of 2 legs and a 180° bend. The heating length for the 180° bends for various (a) dimensions is shown in Table C, column 3.

Step 1

To obtain the total length of the hot zone in mm, use the equation: Total Hot Zone (L_H) = $2(L_e)$ plus (z) the amount from Table C, column 3.

$$L_H = 2(L_e) + z$$

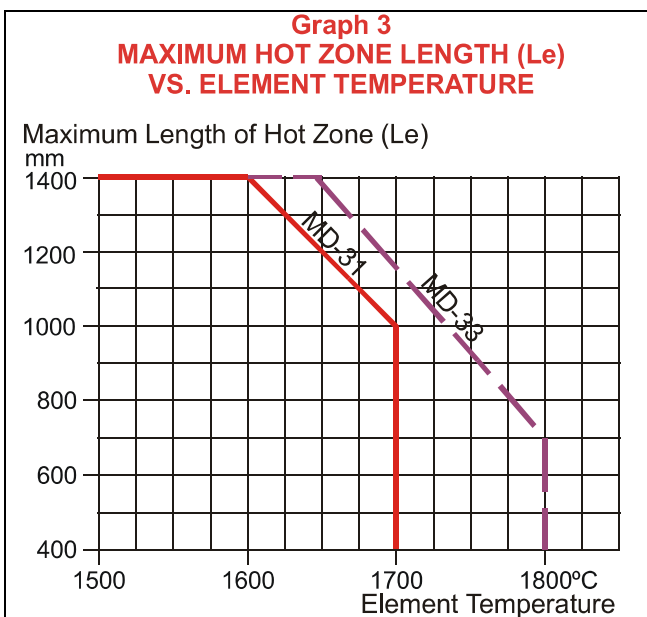
Table C

1	2	3	4
Hot Zone Diameter mm	On-Center mm <i>a</i>	Length to be added to L_e mm <i>z</i>	Surface Area (mm^2) for 1 mm of length <i>c</i>
3	20	28	9.42
3	25	31	9.42
4	20	27	12.56
4	25	30	12.56
6	40	37	18.84
6	50	42	18.84
6	60	48	18.84
9	50	40	28.26
9	60	45	28.26
12	60	42	37.68
12	80	54	37.68
18			56.52
24			75.36

Step 2

To obtain the surface area (SA) of this hot zone in square cm, select from Table C, column 4, the surface area (c) of 1 mm length for the element diameter 3, 4, 6, 9, 12, or 24 mm. Multiply this by the total from step 1 (L_H). This number will be the total surface area of the hot zone in square mm. To convert the units from square mm to square centimeters (cm), divide by 100.

$$SA = \frac{(L_H)(c)}{100}$$



OBTAINING THE WATT LOADING

The element surface temperature depends on the furnace temperature and the watt loading. When determining watt loading, the maximum furnace temperature and the atmosphere are used.

Step 3

To obtain the maximum recommended watt loading (WL) in air from Graph 4, select on the vertical line the maximum furnace temperature required. Follow this vertical line until it intersects the maximum element temperature line for either the MD-31 or MD-33 element. Select the watt loading line at this intersection. To be on the safe side, reduce the selected value by 3 watts/cm².

Step 4

To obtain the maximum recommended watt loading (WL) for various atmospheres or in a vacuum, the maximum element temperature is required.

The maximum element temperature for various atmospheres is shown on page 3, Table A, in a vacuum page 3, Graph 1.

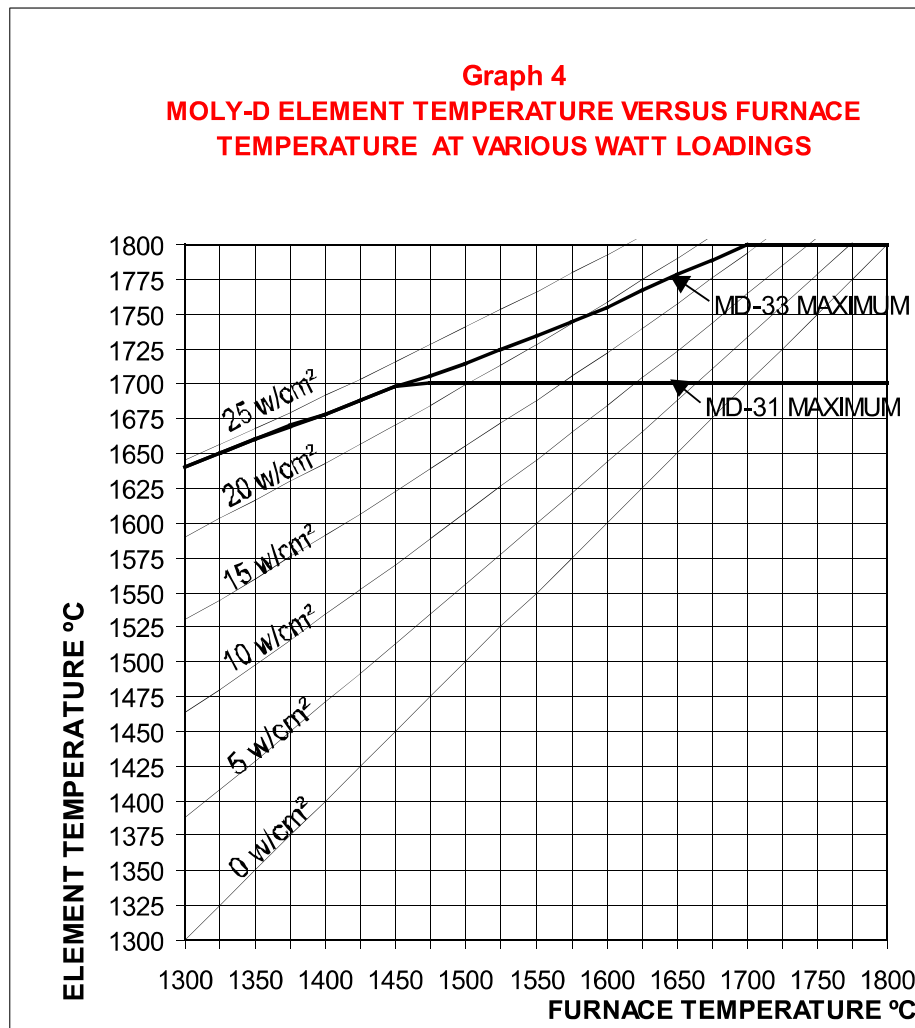
From Graph 4 select the furnace temperature line and follow the line vertically until it intersects the horizontal element temperature line. Select the watt loading line (WL) at this intersection. To be on the safe side, reduce this value by 3 watts/cm².

Step 5

To obtain the element power in watts (P), take the watts per square centimeter (WL) from step 4 and multiply it by the surface area of the element computed in step 2 (SA).

$$P = WL \times SA$$

The number calculated is the maximum recommended power in watts for this hot section at the maximum furnace temperature selected.



METHOD TO COMPUTE THE RESISTANCE OF THE HOT ZONE L_e

Step 6

The molybdenum disilicide heating element material increases in resistance by a factor of approximately 10 between 20°C and 1800°C. To obtain the resistance, an industry established method has been developed to compute the resistance.

The equation to compute the resistance (r_{me}) for a 1000mm long rod in diameters of 3, 4, 6, 9, 12, 18, and 24 mm at temperatures from 700°C to 1800°C is shown below:

$$r_{me} = \frac{0.0028 \times T_e - 0.255}{d^2}$$

r_{me} = resistance of 1000mm of hot zone in ohms
 0.0028 = the resistivity factor
 T_e = Hot zone surface temperature in °C
 0.255 = correction factor
 d = the diameter of the hot zone

Step 7

To obtain the resistance (r_e) of the hot zone (L_e), use the following equation:

$$r_e = \frac{r_{me} \times L_H}{1000}$$

r_{me} = resistance of the 1000mm of hot zone from step 6
 L_H = Total hot zone length in mm from Step 1

To obtain the total resistance of the element, the cold end resistance must be known too.

METHOD TO COMPUTE THE LENGTH AND RESISTANCE OF THE COLD END (L_u)

No one has yet designed a method of mechanically connecting metallic electrical conductors to a molybdenum disilicide hot section at operating temperature.

Therefore, a cold end of larger diameter molybdenum disilicide is upset butt welded to the smaller diameter hot section. This larger diameter with a lower resistance will operate at a lower temperature making it possible to make the electric connection with an aluminum-braided strap.

The cold end diameter has twice the hot section diameter with the exception of the 4/9mm element.

Step 8

The length of the cold end (L_u) has three factors.

- A. A portion of the cold end must protrude outside the furnace wall. The electrical connections must be made outside of the insulation to keep them cool. Below in Table D are the minimum protrusion values L_c . Don't reduce these values for doing so could cause the straps to over heat and fail. Select longer rather than shorter lengths.
- B. The next portion of the cold end is the length that is in the insulating wall L_i . To obtain this dimension, measure the distance from the outside surface of the furnace to the inside surface of the insulation in mm.
- C. The third portion of the cold end is the tapered (g), that is the reduced diameter portion. This tapered part must extend into the furnace chamber. It must not be in the wall or it will overheat and fail. These values are listed in Table D.

Table D					
Element Size	3/6	4/9	6/12	9/18	12/24
Protrusion outside the furnace L_c	75 mm	75 mm	100 mm	125 mm	150 mm
Taper Length Inside Chamber g	15 mm	15 mm	25 mm	30 mm	40 mm

To obtain the cold end length (L_u) select the element diameter and add the two vertical numbers from Table D plus the wall thickness measured L_i .

$$L_u = L_c + L_i + g$$

The resistance of the molybdenum disilicide material will increase in resistance approximately 10 times from 20°C to 1800°C element temperature. Therefore the resistance along the length of the cold end will have a wide resistance range for one end is at the furnace temperature and the other end is in the terminal compartment with a much lower temperature.

Step 9

To obtain the resistance of the cold end, an industry established method has been devised that considers the measurements from many tests, the resistivity of the molybdenum disilicide, the furnace temperature, the diameter of the cold end (L_u) and the length of 1000mm of rod.

The simplified calculation is the resistance of 1000mm of cold end.

$$r_{mu} = \frac{0.00196 \times T_f - 0.255}{D^2 L_u}$$

r_{mu} = resistance of 1000mm of cold end

0.00196 = the resistivity factor

T_f = the temperature of furnace in degrees centigrade

0.255 = correction factor

D_{Lu} = the diameter of the cold end (Lu) mm.

Step 10

To obtain the resistance of the two cold ends (L_u), the equation is:

$$r_u = \frac{r_{mu} \times 2L_u}{1000}$$

r_u = resistance of 2 lengths of L_u

$2L_u$ = the total length of cold ends for this element, step 8

r_{mu} = resistance of the 1000mm of cold ends, step 8

Step 11

To obtain the total resistance of the element at operating temperature the equation is:

$$R_t = r_u + r_e$$

R_t = element resistance

r_e = hot zone resistance, L_e , step 7

r_u = cold ends resistance L_u , step 10

FACTORS TO CONSIDER WHEN POSITIONING THE ELEMENTS IN THE FURNACE

DISTANCE TO THE WALL (PARALLEL)

Step 12

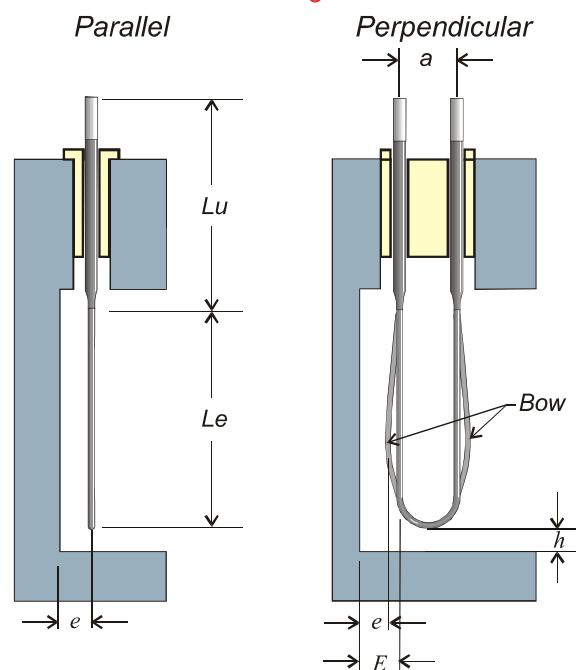
Moly-D elements are normally supported from the roof or, when bent, the terminal ends are supported by the wall. In most installations the element hot zones are placed parallel to the furnace walls. The element's hot zone surfaces should not contact or be placed close to any surface. The hot zones soften at temperatures over 1100°C and the hot zones can bend toward or away from the wall. The amount of bend is dependent on the hot zone length.

Bending can also be caused by the electrical connections. Short stiff straps that exert pressure on the cold ends can cause the hot zones to bend erratically when they get hot.

When the U shape is placed parallel to the wall and the hot zone (L_e) is less than 300mm in length, the minimum distance (e), see drawing 1, between the centerline of the hot zones and the wall is 15mm. Elements with a hot zone length (L_e) between 300 and 1000, the minimum distance to the wall (e) is obtained by using the equation: $e = (L_e)(.05)$. If the L_e is 1000mm or longer, the minimum distance to the wall is 50mm. The units of the (e) and L_e are in mm.

Example: If the L_e is 1000, the minimum distance to the wall is $e = (1000)(.05)$, $e = 50$ mm.

Drawing 1



DISTANCE TO THE WALL (PERPENDICULAR)

Step 13

At element temperatures over 1100°C, the electro magnetic forces cause the two parallel legs to bow apart. The amount of bowing is dependent on the hot zone length and watt loading.

The element bowing characteristic must be considered with the first and last element in the parallel row, for they are perpendicular to the corner wall of the furnace.

The minimum distance to the wall (E) in the direction that the element will bow is greater than the parallel distance to the wall (e), see drawing 1.

The maximum bowing would occur with the longest hot zone (1400mm) and the highest watt loading (30 watts per square centimeter).

Knowing the hot zone length (Le) and watt loading, the bow value (f) factor can be obtained from Graph 5.

The (f) factor multiplied by the distance between the legs (a) will provide the total amount of bowing in both directions. To obtain the value of the bow in one direction, toward the wall, the (f)(a) factor must be divided by two. Then one half the (a) distance must be subtracted too for the (E) dimension, Drawing 1, is measured from the leg not from the center of the "U".

Use the following equation to compute the minimum distance to the wall in the direction of the bow (E), see drawing 1.

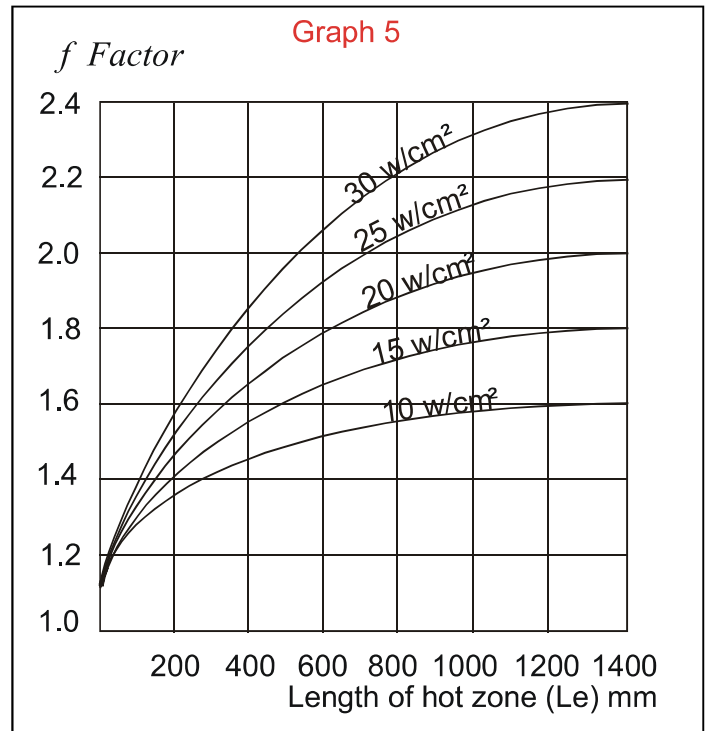
$$E = e + \frac{(f)(a)}{2} - \frac{a}{2}$$

The (e) is the minimum distance to the wall after the element has bowed and is the same value for an element placed parallel to the wall (Step 12).

Example: Le = 1000, a = 60, watt loading is 30 watts/cm², e = 50mm (step 12), f = 2.3 obtained from Graph 5.

$$\text{Example: } E = 50 + \frac{2.3 \times 60}{2} - \frac{60}{2}$$

$$E = 89\text{mm}$$



Value, f, one of the factors used to determine the distance to wall in the direction of the bow caused by the electro magnetic forces.

RECOMMENDED DISTANCE TO THE FLOOR

Step 14

The element can be destroyed if it contacts the floor or any debris. Also the Moly-D elements increase in length with use.

The minimum recommended distance (hs) shown in drawing 1 between the bottom of the "U" and the floor is 10mm for elements with an Le of 200mm or shorter. For hot zones (Le) longer than 200, the minimum distance is 5% of the Le.

Example: An element with an Le of 1000mm, the recommended minimum vertical distance to the floor is h = 1000 x .05, h = 50mm

RECOMMENDED ELEMENT TERMINAL HOLE DIAMETER

Element Size	3/6	4/9	6/12	9/18	12/24
Element terminal hole diameter	9mm	12mm	15mm	23mm	30mm

RECOMMENDED DISTANCE BETWEEN PARALLEL ELEMENTS

Step 15

It is important to maintain a minimum distance between elements for if they make contact they both will fail. Elements parallel to the wall, that is, in line will bow toward each other. The two closest legs should have a minimum distance as shown in drawing 2.

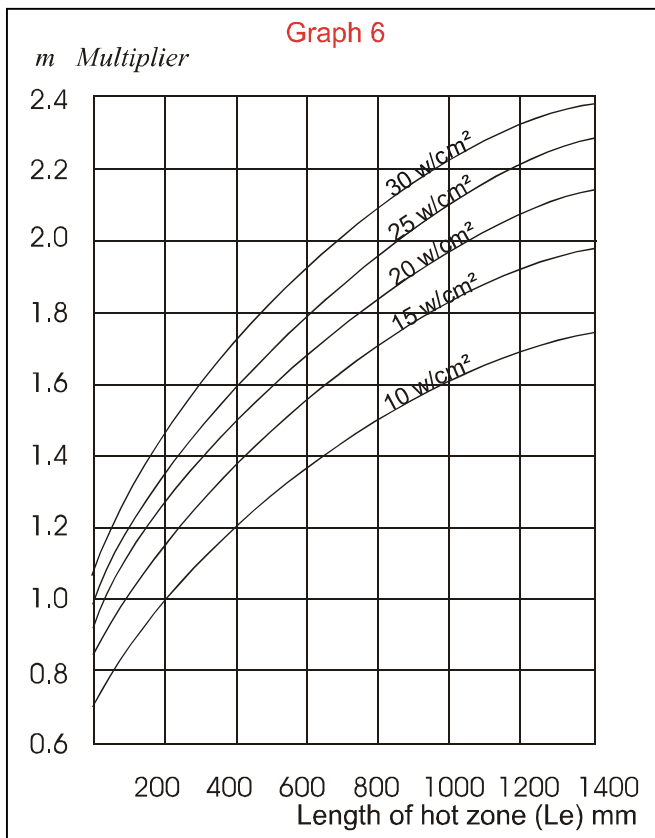
Graph 6 shows the factor (m) to be used to determine the minimum recommended distance (b) between adjacent element legs. To determine the multiplier (m), the length of the hot zone L_e and the watt loading must be known. Then select the multiplier (m) from graph 6. Then use the equation $b = (a)(m)$ for the minimum distance between adjacent elements:

Example: $L_e = 1000$, $a = 60$, watt loading = 30 w/cm^2
From graph 6, the (m) value is 2.2 then

$$b = (a)(m)$$

$$b = (60)(2.2)$$

$$b = 132\text{mm minimum recommended distance between adjacent legs}$$



Value m is one of the multipliers used to determine the minimum distance between adjacent legs due to bowing caused by electro magnetic forces.

METHOD TO COMPUTE THE RECOMMENDED WALL LENGTH FOR A PARALLEL LINE OF U-SHAPED ELEMENTS

Step 16

Let the value (L_w) equal the length of the furnace wall. Let (N) equal the number of elements, (a) distance between the element legs, (b) the distance between adjacent legs, and (E) the distance between an element leg adjacent to corner wall for the first and last element in line, see drawing 2.

$$L_w = (N)(a + b) + 2E - b$$

Example: $N = 4$ number of elements
 $a = 60\text{mm leg spacing}$
 $b = 132\text{mm distance between adjacent legs, step 15}$
 $E = 89\text{ leg distance to wall, step 13}$

$$L_w = (4)(60+132) + 2(89) - 132$$

$$L_w = 768 + 178 - 132$$

$$L_w = 814\text{mm (minimum wall length)}$$

If the length of the wall (L_w) is known and the number of elements that can be placed along the wall (N) is unknown, use the equation:

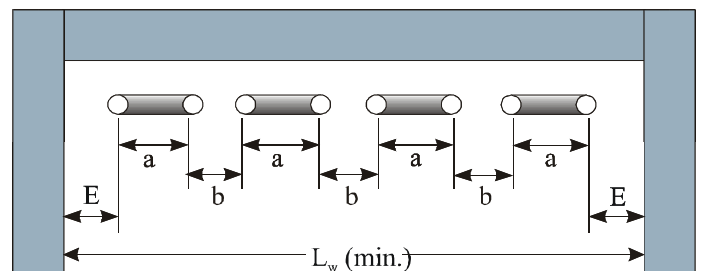
$$N = (L_w - 2E + b) \div (a+b)$$

The number of elements must be a whole number. Always reduce to a whole number, never round up.

If more power is required more elements can be fitted into the limited wall length by placing the elements perpendicular to the wall. In some designs as much as 60% more power is available by switching from a parallel to perpendicular arrangement.

Another choice is to make the furnace higher and then increase the hot zone length. Another choice is to select a larger diameter element.

Drawing 2



DIFFERENT SHAPES

Moly-D elements can be manufactured in various shapes. The most popular is the “U” shape. The molybdenum disilicide material becomes soft and ductile about 1200°C. Suspending the elements from the cold ends and allowing the hot zone to hang vertically down is the most frequent method of use.

For applications where the vertical height of the hot chamber is small, the use of horizontally mounted elements can be used. In such cases, four-shank or multi-shank elements (as shown in drawing 3) may be used. The surface temperature of the element must not exceed 1600°C. Available in Grade MD-31 in all diameters, they have two advantages over two-shank elements, fewer elements are required and terminal losses are less for there are fewer cold ends.

The element temperature must be limited to 1600°C. The element must be supported. If the element is placed on top of the insulation, no support staples are necessary. If the element is placed on the underside of the roof, support staples holding the element to the insulation are required. If the elements are placed on the side walls of the furnace, they must be held in place by staples.

The method to compute the surface area, watt loading, and power on the multi-shank elements is very similar to the method used with the two shank U-shape elements.

The multi-shank element, as the name implies, has 4 or more shanks. There are always an even number of shanks in the multi-shank element and always one less 180° radius. The middle shanks are shorter than the end shanks.

Step 17

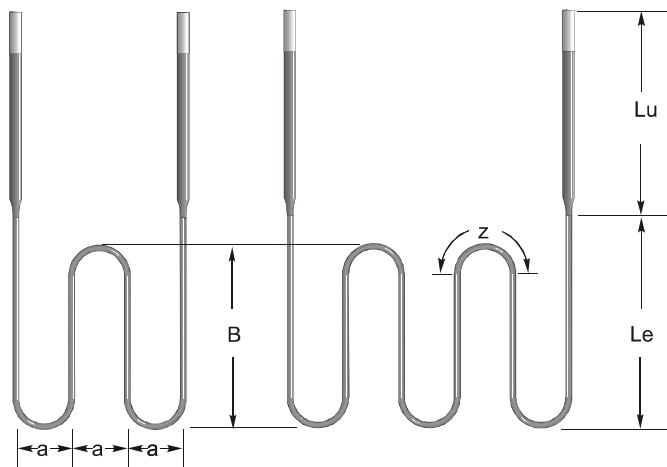
To obtain the total hot zone length of the multi shank element in mm, let NS = number of shanks, Le the length of the outside shanks, and B=length of middle shanks, then use the equation:

$$L_H = 2(Le) + (NS-2)(B) + (NS-1)(z).$$

The value of (z), the length of the 180° bend, is obtained from Table C, column 3.

With the total hot zone length known, the steps 2 through 11 can be used to determine the surface area, power, and resistance of the element. Be sure to limit the element temperature to 1600°C in step 3.

**Drawing 3
MULTI-SHANK ELEMENTS**



BENDS IN COLD ENDS OR HOT ZONE

The Moly-D element can also be provided with bends in the cold end (Lu) of 30°, 45°, or 90° and with bends in the hot zone (Le) of 90°. The hot zone (Le) is suspended vertically with the bottom of the “U” down. See drawing 4.

**Drawing 4
BENT ELEMENTS**



ELECTRICAL TERMINAL COMPARTMENT RECOMMENDATIONS

Two paralleled conductors, when carrying current, flowing in the same direction will be attracted to each other. If two adjacent Moly-D elements are connected to the same voltage supply, the current will flow in the same direction and the two adjacent legs will be attracted to each other. When the heating elements reach 1200°C, they will soften and be drawn together by the electro magnetic force. When the two elements touch they will both fail.

The two legs of the same element will have the current flowing in an opposite direction therefore tend to separate. The calculation for the distance that they will bow is described on page 10.

The electro magnetic forces must be considered in single phase, two phase, and three phase element arrangements.

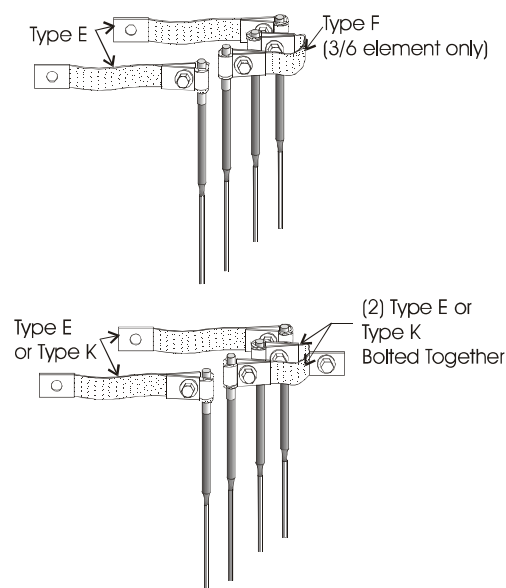
Moly-D elements are normally placed on two sides of a furnace or around the circumference in a cylindrical furnace. Never connect the elements so that adjacent elements are connected to the same voltage or power lead.

In a two phase (Scott Connection) or three phase, the same rule applies. Two adjacent elements should not be connected to a common voltage supply. The neutral or ground connection or center of the wye or center of the star can be connected to adjacent element terminal legs. The current is flowing in the same direction but offset a 120° phase difference.

SELECTION OF TERMINAL ACCESSORIES

BRAIDED ALUMINUM STRAPS

The flat braided aluminum straps of the recommended size should always be used. The element terminal ends get hot from the I^2R energy in the cold ends and from the heat conducted from the hot zone out along the cold ends. Using electrical straps of a smaller size or different material can cause the element cold ends and straps to overheat and fail.



The Moly-D flat braided aluminum straps are type E and F for the 3/6 element and type K for the 4/9, 6/12, 9/18 and 12/24 elements. The straps are a combination electrical conductor and element clamp. One end of the strap has a loop, which fits over the circumference of the elements aluminized terminal end.

A nut and bolt is provided and is used to tighten the strap to the element.

Although we offer the element to element strap (type F) for the 3/6 element, we don't recommend their use.

We recommend the Type E or K strap be used to connect the element to a post or another Type E or K strap.

It is very important that the strap be initially tightened securely. After the elements are brought to temperature, the nut and bolt should be tightened again. Allow about 24 hours between tightening for the clamp portion of the strap relaxes and becomes loose on the element.

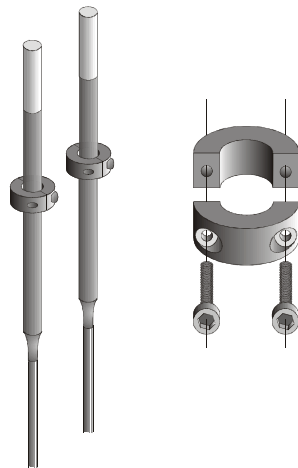
If the clamp is loose, it causes a poor electrical connection that is high in resistance which causes the element terminal end to overheat. This can cause the element and terminal strap to fail.

The strap must not cause a bending movement, i.e. side force on the element. This will cause the heating element to bend and possibly break. We recommend the working length of the strap be a minimum of 12mm longer than the distance between the two connecting points.

ELEMENT MOUNTING

METALLIC HOLDERS

The U-shaped Moly-D elements are hung vertically and must be supported by the cold ends. Metallic holders, similar to shaft collars, are used to support the elements. The metallic holder of the correct diameter cold end (size available 6, 9, 12, 18, and 24mm) are fastened to both element cold ends with hex head cap screws.



Fasten the metallic holder so that the taper portion of the cold end is not in the furnace wall. If the reduced diameter section is in the wall, the element can over heat and fail. It can also destroy the insulation around the terminal hole.

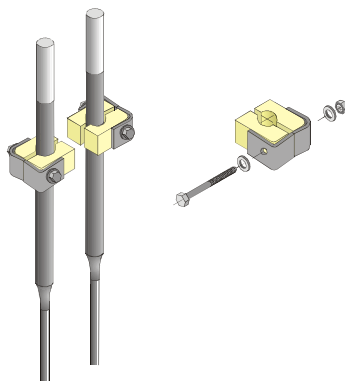
The element cold end should protrude beyond the furnace shell. The recommended distances are shown on page 7, table D.

The element holder must be tight on the element. If even one holder is loose, that end will slowly fall into the furnace. The hot section is soft over 1200°C and will move towards an adjacent element. This can cause both elements to fail.

If the elements have a bend in the hot section or cold ends the metallic holders should be used. The elements are soft at temperature and frequently move. The metallic holders prevent the element from moving inward.

CERAMIC HOLDERS

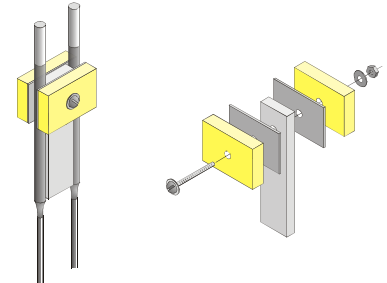
Ceramic holders are offered in the 6/12, 9/18, and 12/24 diameters. The ceramic holders are used for higher temperature applications. The stainless steel metallic holders oxidize and are sometimes difficult to remove.



The ceramic holder consists of two moon-shaped ceramic pieces, two stainless steel angle brackets, and a nut and bolt. When assembled the two ceramic pieces are forced together by the tightening of the nut and bolt. This grips the cold end tightly and prevents it from dropping into the furnace.

CERAMIC PLATE HOLDERS

Ceramic Plate Holders are offered in 3/6, 4/9 and 6/12 diameters. Ceramic plates are bolted together squeezing the plates together to keep the element firmly in place.



The ceramic plate holder also has a high temperature ceramic fiber insulating board or tab that fits between the two element terminal legs and extends towards the hot zone.

One of the advantages of the ceramic plate holder is that the elements can be installed from the outside of the furnace.

A slot is made in the furnace shell and wall to fit the element diameter and the "a" dimension.

The length of the ceramic fiber tab (LL) should be the thickness of the furnace insulation. The tab should also end where the element taper begins.

The ceramic plate holder is connected to the element and the element carefully inserted in the furnace slot.

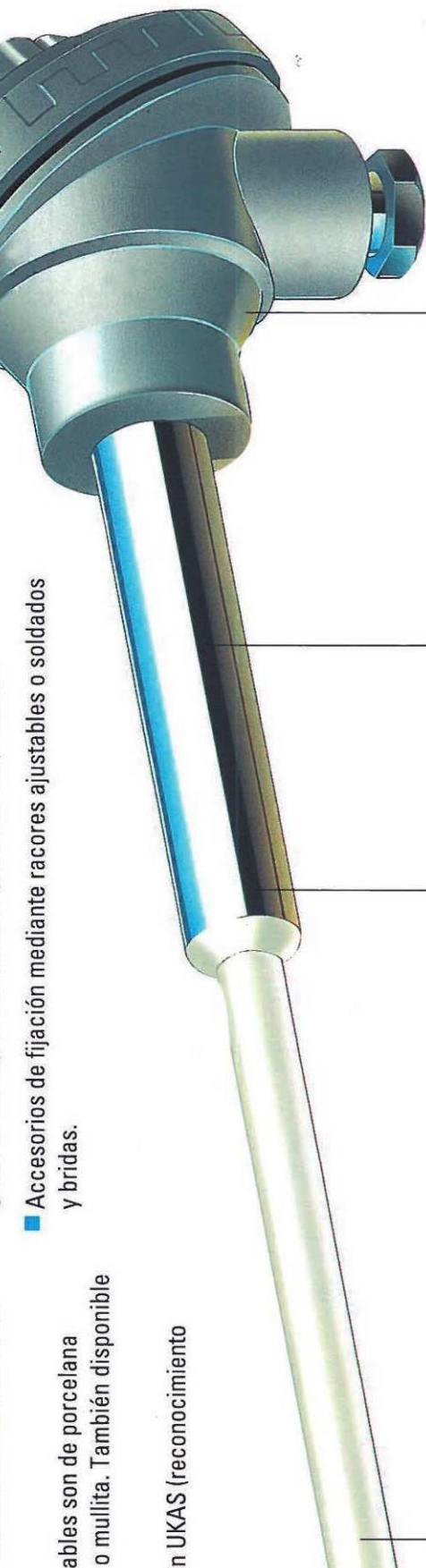


12. ANEXO II

A continuación, se adjuntas las hojas de características técnicas de elementos comerciales TERMOPARES que han sido tanto analizados como seleccionados en el diseño de la planta piloto.

ables son de porcelana o mullita. También disponible en UKAS (reconocimiento

Accesorios de fijación mediante racores ajustables o soldados y bridas.

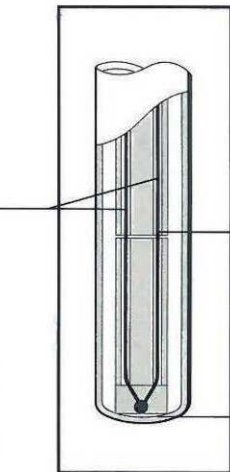


La longitud de las vainas de protección se fabrica de acuerdo con los requisitos del usuario, dentro de un rango de diámetros disponibles. Los materiales estándar impermeables de fabricación son: porcelana aluminosa, alúmina recristalizada o mullita. También disponible en carburo de silicio y otros materiales bajo pedido.

El diámetro máximo de los conductores de metal común es de 3.25mm (AWG 8) y 0.5mm (AWG 24) para conductores de metal precioso. Otras secciones suministradas bajo pedido.

Vaina metálica que permite la incorporación de diversidad de accesorios de fijación mediante racores ajustables o soldados y bridas de sujeción.

Tubo de sujeción, normalmente de acero inoxidable de 21.3mm ó 26.7mm de diámetro externo y 100mm de longitud, que soporta la vaina cerámica. Otros tipos de material bajo pedido.



La unión de medida se realiza mediante soldadura por arco en atmósfera inerte de argón. La unión puede ser simple o doble.

Los conductores de termopar, tanto en montaje simple como doble, están aislados y protegidos dentro de la vaina mediante abalorios cerámicos, normalmente alúmina recristalizada impermeable en el caso de termopares de metal precioso y de porcelana aluminosa impermeable si los conductores son de metal común.

Cabezal industrial resistente al agua con tapa roscada. Disponible en aluminio o hierro fundido, se suministra con zócalo de conexión. La versión de aluminio puede ser pintada de acuerdo con el código de colores del tipo de termopar seleccionado.

Control de Calidad
Cada sonda es rigurosamente comprobada durante el ciclo de fabricación y verificada antes de su envío de acuerdo con la norma ISO 9001: 2000. Tenemos la capacidad de realizar inspecciones adicionales incluyendo radiografías, certificados de calibración... consúltenos.

SECCION 4

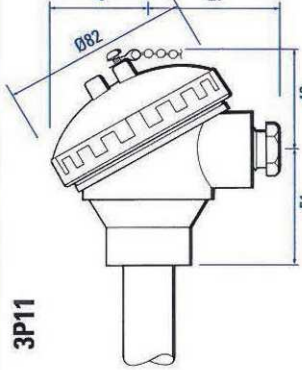
RACORES, FIJACIONES Y B

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
WBPSA	RACORES SOLDADOS	ACERO INOXIDABLE
WBTSA		ACERO INOXIDABLE
WBPSB		ACERO INOXIDABLE
WBTSB		ACERO INOXIDABLE
F11	BRIDA PLANA AJUSTABLE (Diámetro 100mm)	HIERRO FUNDIDO

SECCION 5

CABEZALES DE CONEXIÓN

3P11



Cabezal de aluminio fundido resistente al agua y con zócalo cerámico de conexión para una ejecución simple o doble. Incluye prensaestopas metálico ISO 20mm x 1.5mm para cables desde 6mm a 14mm de diámetro. Tapa roscada.

Otros cabezales de conexión disponibles en la página 69.

SECCION 3

MATERIALES DE LA VAINA CERÁMICA

TIPO	MATERIAL	PROPIEDADES	TEMPERATURA MÁXIMA DE UTILIZACIÓN (°C)
IAP	PORCELANA ALUMINOSA IMPERMEABLE	Ideal para su uso en combinación con termopares de metal común. Tiene muy bajo coeficiente de dilatación, lo que le confiere una gran resistencia al choque térmico. Alta solidez y firmeza. Recomendable para hornos donde se requieren ambientes con baja contaminación evitando el uso de vainas metálicas. Nota: Para montaje en horizontal precisa de un soporte de sujeción.	1400
IM	MULLITA	Iónico para su utilización con metales preciosos a temperaturas elevadas. Alta resistencia mecánica y al choque térmico. Relativamente inerte a atmósferas sulfurosas y de carburación, alta resistencia al ataque químico. A menudo utilizado como segunda vaina de protección cuando la primaria es de carburo de silicio.	1600
IRA	ALÚMINA RECRISTALIZADA IMPERMEABLE	Ideal para su utilización con metales preciosos a temperaturas elevadas. Buena resistencia al choque térmico y al ataque químico. Ideal para atmósferas reductoras y de carburación.	1800

SECCION 2

DIÁMETROS ESTÁNDAR DE VAINA

VAINA CERÁMICA (mm)	CUELLO (mm)
8	21.3
10	21.3
12	21.3
17	26.7
20	26.7

Vaina mt.

RANGO DE TEMPERATURA RECOMENDADO	PUNTUAL (°C)	
	CONTINUO (°C)	PUNTUAL (°C)
0 a +1100	-180 a +1300	-180 a +1300
	+20 a +700	-180 a +750
0 a +1600	-270 a +1300	0 a +1700
	+100 a +1600	0 a +1800
+50 a +1820	+20 a +2300	

CODIFICACION - EJEMPLO

Serie _____
 Tipo de Termopar (ver sección 1) _____
 Termopar Simple: 1 _____
 Termopar Doble: 2 _____
 Diámetro de la vaina principal (ver sección 2) _____
 Material de la vaina principal (ver sección 3) _____
 Longitud de la vaina (incluyendo 100mm de cuello) _____
 Material de la vaina secundaria (opcional) (ver sección 4) _____
 Tipo de fijación (ver sección 4) _____
 Nota: Especificar la longitud a partir del extremo del racor de rosca cilíndrica; desde el hexagonal



13. ANEXO III

A continuación, se adjuntas las hojas de características técnicas de elementos comerciales **SENSORES LVDT** que han sido tanto analizados como seleccionados en el diseño de la planta piloto.

GCD-SE Series – Single Ended DC Gage Heads



- Hermetically sealed housing
- Single ended 8.5 to 24VDC supply
- Low current consumption (only 6mA)
- Ideal for battery operation
- IEC IP68 rating to 1,000 PSI [70 bars]
- Long strokes up to 2 inches
- Hardened tool steel contact tip
- High side load resistance

DESCRIPTION

The **GCD-SE Series** of heavy-duty DC operated gage heads enable high performance in environments containing moisture, dirt, and fluid contaminants. With a spring loaded LVDT, a precision linear bearing, and internal conditioning electronics operating on a single ended 8.5 to 28VDC input with minimal current draw, the GCD-SE is ideally suited to portable measurement applications in difficult environments. Internal EMI, ESD and RFI protection, provide CE compliance when correctly installed. Synchronous demodulation ensures unsurpassed noise rejection.

These robust gage heads allow measurements over stroke ranges from 0 to 0.1 inch [2.54mm] up to 0 to 2 inches [50.8 mm]. The spring force is typically 9oz [255 grams] at fully compressed electrical stroke. A removable black-chromed, hardened tool steel tip is threaded (4-48UNF-2A) to the working end. Internal construction prevents the core and shaft from rotating as they move longitudinally. The integral electrical connector (welded) provides for easy installation and allows replacing a damaged cable without sacrificing the sensor. Installation and adjustment are facilitated by an external 1/2-20 mounting thread and the two locknuts supplied with each unit.

Like in most of our LVDTs, the GCD-SE windings are vacuum impregnated with a specially formulated, high temperature, flexible resin, and the coil assembly is potted inside its housing with a two-component epoxy. This provides excellent protection against hostile environments such as high vibration and shock.

The ruggedness, long life cycle, and very high reliability of the GCD-SE Series provide the lowest cost of ownership over the life of the equipment onto which they are installed. The one-piece front end (barrel which contains the bearing assembly), machined from solid stainless steel bar, coupled with a bronze bushing, has far greater resistance to bending forces and side loads compared to other designs. This is particularly important on the longer stroke versions; it reduces the common risk of probe damage/bending during installation or maintenance of industrial equipment. The GCD-SE Series designs also require fewer parts and weld joints, thereby increasing overall structural integrity and reliability.

MEAS offers options, such as mating connector plugs, special contact tips (including AGD dial indicator tips), air-extend/spring retract, and cable assemblies. Also see our other models with built-in signal conditioning, **GCD** (DC voltage), **GCT** (4-20mA 2-wire loop) and **GC-485** (RS-485 Digital Series), as well as the AC operated **GCA**.

Measurement Specialties, Inc. (NASDAQ MEAS) offers many other types of sensors and signal conditioners. Data sheets can be downloaded from our web site at: <http://www.meas-spec.com/datasheets.aspx>

MEAS acquired Schaevitz Sensors and the **Schaevitz**® trademark in 2000.

FEATURES

- All-welded stainless steel construction
- Resistant to harsh environments
- MS type connector (MIL-C-5015)
- Long cycle life
- CE compliant
- Calibration certificate supplied with each unit
- Air extend/spring retract available (*consult factory*)

APPLICATIONS

- Roller Gap Control
- In-process Wet Grinding
- Hand Held Gages
- X-Y Positional Feedback
- Automotive chassis track testing
- Remote site monitoring

GCD-SE Series – Single Ended DC Gage Heads

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

ELECTRICAL SPECIFICATIONS					
Parameter	GCD-SE 100	GCD-SE 250	GCD-SE 500	GCD-SE 1000	GCD-SE 2000
Stroke/gaging range	0 to 0.10 [2.54]	0 to 0.25 [6.35]	0 to 0.50 [12.7]	0 to 1 [25.4]	0 to 2 [50.8]
Sensitivity (VDC/inch)	50	20	10	5	2.5
Supply voltage	+8.5 to +28VDC				
Supply current	10mA maximum; 6mA typical				
Line regulation	0.2 mV/V				
Output voltage range	0 to +5VDC (4 wire); +1 to +6VDC (3 wire) - Increases when the core is displaced towards connector				
Output Impedance	1 Ohm				
Noise and ripple	10 mVRMS, maximum				
Non-linearity	±0.25% of FR, maximum				
Repeatability	25 µ-inch [0.6 µm]				
Stability	0.1% of FSO after warm up				
Temperature coefficient of sensitivity	0.028%/°F [0.05%/°C]				
Frequency response (dynamic)	15Hz, maximum				

ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS & MATERIALS	
Operating temperature	-13°F to +185°F [-25°C to 85°C]
Survival temperature	-65°F to +250°F [-55°C to 125°C]
Shock survival	250 g (11ms half-sine)
Vibration tolerance	10 g up to 2kHz
Housing material	AISI 400 Series stainless steel
Electrical connector	6-pin MS type connector (MIL-C-5015)
NEMA IEC 60529 rating	IP68 to 1,000 PSI [70 bars] with use of proper mating connector plug

Notes:

All values are nominal unless otherwise noted

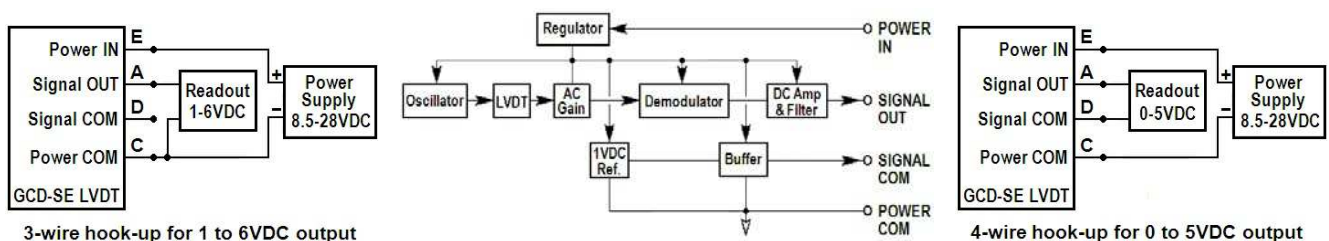
Dimensions are in inch [mm] unless otherwise noted

FR: Full Range is the stroke range, end to end; FR=S for a 0 to S stroke range

FSO (Full Scale Output): Largest absolute value of the outputs measured at the ends of the range

WIRING SCHEMATICS & BLOCK DIAGRAM

Important: NEVER connect Pins D and C together; NEVER connect Pin D to other GCD-SE's

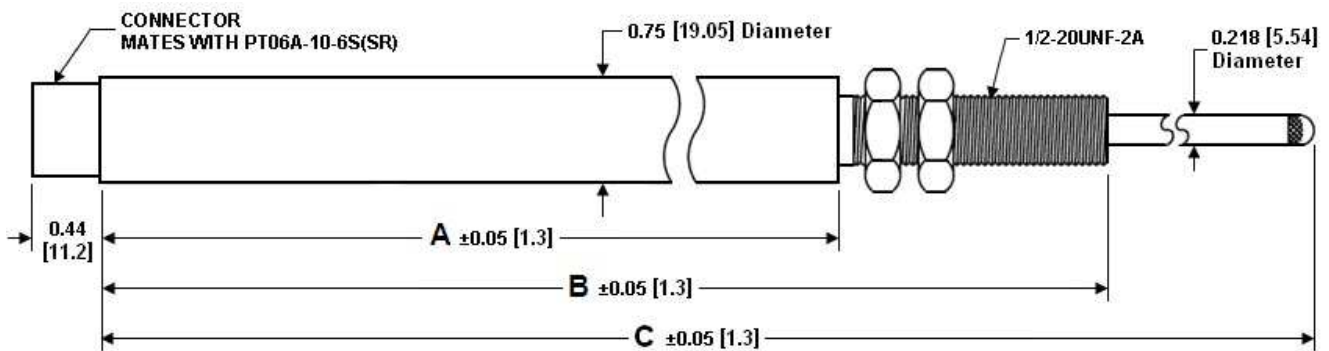


A through E: Connector pin assignments

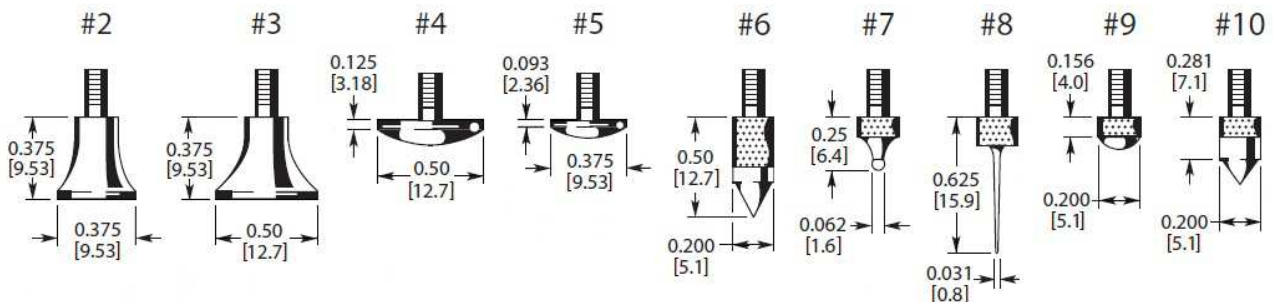
GCD-SE Series – Single Ended DC Gage Heads

MECHANICAL SPECIFICATIONS

Parameter	GCD-SE 100	GCD-SE 250	GCD-SE 500	GCD-SE 1000	GCD-SE 2000
Stroke/gaging range	0.10 [2.5]	0.25 [6.4]	0.50 [12.7]	1 [25.4]	2 [50.8]
Pre-travel	0.15 [3.8]	0.25 [6.3]	0.04 [1.0]	0.20 [5.1]	0.10 [2.5]
Over-travel (minimum)	0.30 [7.6]	0.30 [7.6]	0.25 [6.3]	0.35 [8.9]	0.10 [2.5]
Main body length "A"	4.06 [103.1]	4.9 [124.5]	5.76 [146.3]	7.46 [189.5]	9.42 [239.3]
Overall body length "B"	5.42 [137.7]	6.27 [159.3]	7.13 [181.1]	10.45 [265.4]	12.41 [315.2]
Plunger length "C" (fully extended; 0 or 1 VDC out)	6.48 [164.6]	7.3 [185.4]	8.16 [207.3]	12.93 [328.4]	14.87 [377.7]
Weight (Ounce)	2.5 oz	3.3 oz	3.5 oz	5.5 oz	8.0 oz
Weight (Gram)	71 G	93 G	100 G	156 G	227 G
Spring force	Typically 9oz [255 grams] at fully compressed electrical stroke				



REPLACEMENT/OPTIONAL CONTACT TIPS



Dimensions are in inch [mm]

GCD-SE Series – Single Ended DC Gage Heads

ORDERING INFORMATION

Description	Model	Part Number
0.10 inch gage head	GCD-SE 100	02351006-000
0.25 inch gage head	GCD-SE 250	02351007-000
0.5 inch gage head	GCD-SE 500	02351008-000
1 inch gage head	GCD-SE 1000	02351009-000
2 inch gage head	GCD-SE 2000	02351010-000
OPTIONS		
Air extend/spring retract gage head (<i>Consult factory</i>)	All GC Series	XXXXXXXX-150

ACCESSORIES		
DC power supply (15VDC)	Model PSD 40-15	02291339-000
Mating connector kit	PT06A-10-6S(SR)	62101011-000
Cable with wired mating connector (1)	GCD-SE to Stripped & Tinned	04290589-000
Replacement contact tips	Contact Tip 2	67010005-000
	Contact Tip 3	67010006-000
	Contact Tip 4	67010002-000
	Contact Tip 5	67010007-000
	Contact Tip 6	67010008-000
	Contact Tip 7	67010009-000
	Contact Tip 8	67010010-000
	Contact Tip 9	67010001-000
	Contact Tip 10	67010011-000

(1) Cables are shielded, 10 foot long, and rated 80°C [176°F] operating. Consult factory for other lengths.

Refer to our ["Options and Accessories for Gage Head"](#) data sheet.

TECHNICAL CONTACT INFORMATION

NORTH AMERICA	EUROPE	ASIA
Measurement Specialties, Inc. 1000 Lucas Way Hampton, VA 23666 United States Phone: +1-800-745-8008 Fax: +1-757-766-4297 Email: sales@meas-spec.com Web: www.meas-spec.com	MEAS Deutschland GmbH Hauer 13 D-44227 Dortmund Germany Phone: +49-(0)231-9740-0 Fax: +49-(0)231-9740-20 Email: info.de@meas-spec.com Web: www.meas-spec.com	Measurement Specialties China Ltd. No. 26, Langshan Road High-tech Park (North) Nanshan District, Shenzhen 518057 China Phone: +86-755-33305088 Fax: +86-755-33305099 Email: info.cn@meas-spec.com Web: www.meas-spec.com

The information in this sheet has been carefully reviewed and is believed to be accurate; however, no responsibility is assumed for inaccuracies. Furthermore, this information does not convey to the purchaser of such devices any license under the patent rights to the manufacturer. Measurement Specialties, Inc. reserves the right to make changes without further notice to any product herein. Measurement Specialties, Inc. makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its product for any particular purpose, nor does Measurement Specialties, Inc. assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. Typical parameters can and do vary in different applications. All operating parameters must be validated for each customer application by customer's technical experts. Measurement Specialties, Inc. does not convey any license under its patent rights nor the rights of others.



14. ANEXO IV

A continuación, se adjunta el desglose de los capítulos del presupuesto.

Capítulo	Ud.	Cuantía	Total
1.1 Materiales			33.140,00 €
Sensórica	1	11.540,00 €	11.540,00 €
Estructura y aislante	1	9.700,00 €	9.700,00 €
Sistema de refrigeración	1	5.400,00 €	2.500,00 €
Resistencias de calentamiento	8	345,00 €	2.500,00 €
Unidad de ingeniería (PC)	1	1.900,00 €	1.900,00 €
Materiales auxiliares y conexiones	1	3.000,00 €	3.000,00 €
Repuestos	1	2.000,00 €	2.000,00 €
1.2 Ingeniería			18.900,00 €
Ingeniería	1	13.000,00 €	13.000,00 €
Redacción del proyecto	1	1.700,00 €	1.700,00 €
Documentación, manual, planos	1	2.900,00 €	2.900,00 €
Legalización	1	1.300,00 €	1.300,00 €
1.3 Presupuesto contrata			13.114,38 €
Montaje (h)	210	30,36 €	6.375,60 €
Automatización y control (h)	100	36,23 €	3.623,00 €
Puesta en marcha (h)	70	36,23 €	2.536,10 €
Formación de personal (h)	16	36,23 €	579,68 €
TOTAL			65.154,38 €