

El peligro del transporte marítimo a granel de hierro obtenido por reducción directa^(*)

S. Mendiola*, M.J. San José**, J.J. Achútegui* y F.J. Sánchez*

Resumen Por vía marítima y a granel se transportan anualmente millones de toneladas de hierro obtenido por reducción directa (DRI). Analizaremos el riesgo de incendio e incluso de explosión en esta clase de cargamentos, así como el cumplimiento de la legislación internacional durante algunos embarques. Para el estudio de este tipo de mercancía peligrosa y sus posibles reacciones a bordo de los buques se diseñaron tres recipientes metálicos, donde se depositó el DRI, dejando la parte alta sin llenar por completo. Simulando el efecto en una pequeña bodega, se vertió agua de mar y después se fue ventilando convenientemente para provocar la reacción. Las temperaturas aumentaron en el interior de los tres recipientes. Las máximas temperaturas fueron: 82, 85 y 95 °C. Las variables que influyeron en la reacción resultaron ser: el aislamiento térmico, el caudal de agua de mar añadida, la ventilación u oxígeno aportado y la temperatura ambiente.

Palabras clave Mercancías peligrosas. Riesgo de ignición. Hierro reducción directa. Transporte marítimo.

The risks involved in marine transport of direct reduced iron in bulk

Abstract Every year bulk carriers transport millions of tons of direct reduced iron (DRI) by sea, which involves considerable risk of fires and even explosions. In order to study this type of dangerous goods carriage and the reactions that can take place, we designed an experiment to simulate conditions on board. DRI was deposited in three watertight metallic recipients of different sizes, leaving the upper portion unfilled to simulate a small hold. Seawater was added and air was circulated to induce a reaction, resulting in an increase of temperature inside the reactor recipients. The maximum temperatures in the reactors were: 82, 85 and 95 °C. The variables that influenced the reaction were its thermal isolation, the amount of seawater added, the ventilation (i.e. oxygen supplied) and the ambient temperature.

Keywords Dangerous goods. Prereduced. Direct reduced iron. Marine transport.

1. INTRODUCCIÓN

La Reducción Directa (RD) es un proceso para obtener hierro por reducción de minerales de hierro de ley elevada. Dicho proceso de fabricación persigue la eliminación de oxígeno a temperaturas inferiores al punto de fusión del hierro. El producto que se obtiene se denomina prerreducido (DRI). Los procesos más importantes de RD son el Midrex y el HYL. Las factorías dedicadas a la producción de este material emplean tecnologías nuevas, y la transformación, en la mayoría de los casos, se realiza usando el gas natural^[1].

A lo largo de la década de los noventa, la producción de DRI fue del orden de 285 millones de

toneladas. De esta producción mundial (Fig. 1), se estima que el 63 % se transportó para su transformación en factorías diferentes de la planta productora. Los medios de transporte empleados fueron terrestres en un 40 % de los casos, mientras que el 60 % del material transportado empleó la vía marítima, en gabarras o buques dedicados a singladuras transoceánicas. Cualquier fuente estadística que se consulte apunta un claro crecimiento de todos estos tráficos.

El producto resultante de la Reducción Directa no es apto para el transporte, dado que se oxidaría y recalentaría rápidamente. Las plantas productoras de DRI someten a dicho producto a dos procesos destinados a disminuir su reactividad: el aglo-

(*) Trabajo recibido el día 22 de octubre de 2001 y aceptado en su forma final el día 3 de julio de 2002.

(*) Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación y Construcción Naval, Univ. de Cantabria, G. Gamazo 1, 39004 Santander, Spain.

(**) Departamento de Ingeniería Química, Univ. del País Vasco, Facultad de Ciencias, Aptd. 644, 48080 Bilbao, Spain.

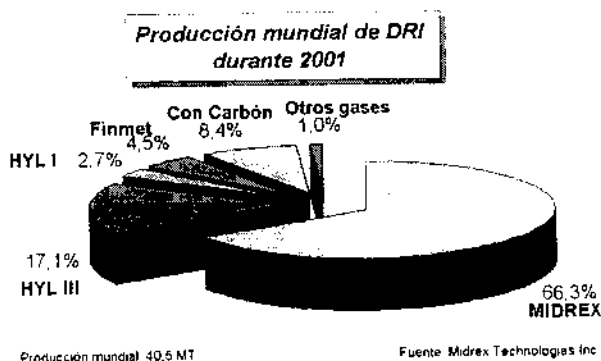


Figura 1. Producción mundial de DRI durante 2001.

Figure 1. 2001 World DRI production.

merado y el pasivado. El aglomerado es el proceso en el que se compacta el DRI hasta que se forman unidades físicas adecuadas para el transporte. El pasivado recubre el producto aglomerado de una capa inerte que lo aísla del medio exterior^[2].

La pasivación más sencilla de las posibles se consigue "envejeciendo" el producto. Es decir, sometiéndolo a una corriente de aire en condiciones controladas hasta que se recubre de una capa de óxido. Más eficaz que el envejecimiento resulta la pasivación mediante un recubrimiento de antioxidante, silicato de sodio u óxido de calcio^[3]. Ninguna de las pasivaciones anteriores es eficaz frente a un oxidante electrolítico como el agua de mar.

Es habitual aglomerar el DRI (Fig. 2) en forma de briquetas que pueden tener diferentes formas y dimensiones, o en forma de pequeñas bolas (*pellets*). Los mecanismos de aglomerado afectan a la porosidad y, consecuentemente, depende del proceso de aglomerado que el producto sea más o menos reactivo a la oxidación^[4].

Existen dos sistemas de aglomerado: en caliente y en frío. Cuando se emplea el primero, el tratamiento se efectúa sin aglutinante y, cuando se realiza en frío, el material se puede tratar con o sin él^[5].

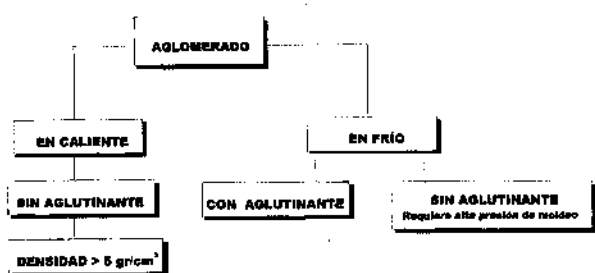


Figura 2. Aglomerado y pasivado en caliente y en frío.

Figure 2. Hot and cold briquetted and passivated.

El aglomerado en caliente es un proceso de densificación del prerreducido por el que el material se halla sometido a una temperatura superior a 650 °C, al tiempo del moldeo. El producto, así conseguido, se denomina HBI (Hot Briquetted Iron), siempre y cuando la densidad resultante sea superior a 5,0 g/cm³^[6].

La normativa internacional que regula el transporte marítimo de mercancías peligrosas, concretamente el Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (CMIMP, internacionalmente conocido como Código IMDG^[6]), recoge unas exigencias para el transporte marítimo de HBI que son bastante menos restrictivas que las correspondientes a cualquier otra aglomeración del prerreducido.

Es evidente que, comprimir el prerreducido caliente supone que las briquetas resultantes serán menos reactivas por presentar menor porosidad y, con ello, menos superficie de contacto al aire o al agua^[7].

Para los procesos en frío, los aglomerantes pueden ser: melaza y cal hidratada, silicato de sodio y pez o bitumen. El Código IMDG agrupa en una misma categoría a todos los productos resultantes de las aglomeraciones en frío. Una densidad típica para el DRI aglomerado en frío es del orden de 3 g/cm³.

La diferencia de densidades resultante de los diferentes aglomerados da una idea de la porosidad del material aglomerado en frío. La bibliografía habla de "estructura de esponja", a la hora de describir el aspecto físico de dicho material.

En este trabajo se demostrará que las condiciones del transporte marítimo de DRI no son tan seguras como debieran. Para ello, se provocará la oxidación del prerreducido en el laboratorio, depositado en unos reactores y en contacto con el agua de mar, y se pondrá en evidencia las limitaciones de las pasivaciones frente al agua marina.

2. PROCESO DE OXIDACIÓN DEL PRERREDUCIDO DURANTE SU TRANSPORTE POR VÍA MARÍTIMA

Para el transporte oceánico de los prerreducidos se utilizan los mismos buques que para cualquier otra carga seca a granel (buques denominados graneleros, más conocidos por su denominación en inglés, *bulkcarriers*). El OBO (Ore-Bulk-Oil) es un buque especial que puede transportar cargas secas a granel y cargas líquidas, como el crudo del petróleo, pero no ambas en el mismo viaje. La bibliografía consultada recomienda el OBO para el transporte del DRI^[8]. Los buques OBO se caracterizan porque

sus tanques de carga son herméticos y, al estar dotados de plantas de gas inerte, pueden mantener la carga en una atmósfera cuyo porcentaje de oxígeno está controlado^[6].

Durante el transporte marítimo en buques cuyas bodegas carecen de gas inerte (lo que sucede en la mayoría de los casos)^[9], al mojarse parte del prerreducido, durante la carga, travesía o en cualquier otra circunstancia, el peligro de combustión espontánea resulta evidente^[10]. El color gris del material comienza a cambiar a ocre o rojizo y, en algunos casos, aparece vapor.

2.1. Progreso de la reacción oxidante

Cuando progresa una reacción de oxidación, se forma óxido sobre la superficie metálica, bien como una película o como núcleos separados. Una vez que una capa compacta cubre la superficie, la reacción sólo puede progresar por difusión sólida de los agentes de oxidación a través de dicha capa. En tales condiciones, en el proceso global de corrosión se superponen una serie de etapas, una de las cuales, la más lenta, gobierna la cinética e impone el mecanismo de reacción^[3-11].

Para que la reacción transcurra tal como se ha visto en el párrafo anterior y que, con ello, el óxido se convierta en una capa pasivante, es imprescindible que se cumplan los principios enunciados por Pilling y Bedworth, de forma que el volumen del óxido sea superior al del metal consumido en producirlo, formando una barrera continua entre atmósfera y metal^[12].

Cuando la relación entre el volumen de óxido y metal es muy elevada, las tensiones generadas pueden fracturar las películas, perjudicando o anulando su valor protector^[13]. De todas maneras, dado que el óxido es menos tenaz y dúctil que el metal de base, existe, siempre, la posibilidad de que se resquebraje y que continúe la reacción sobre superficie nueva.

Centrándose en la oxidación del prerreducido, diferentes autores han establecido que dicha reacción depende de varias características y circunstancias. La velocidad de oxidación es independiente del flujo del aire a partir de 0,85 l/min. La temperatura de autoignición del prerreducido se sitúa entre 200 y 230 °C. El efecto de la humedad en la reacción de oxidación es importante y, éste, afecta al prerreducido a través de las condiciones ambientales imperantes en su entorno: el contacto con el agua, la ventilación, la temperatura ambiente y el contacto con las fuentes de calor. La

velocidad de oxidación del DRI es una función directa de la temperatura. Como la oxidación es exotérmica, si el calor puede ser disipado, el producto se enfriará hasta la temperatura ambiente, pero si la disipación del calor es menor que la generación de éste por la oxidación, en ese caso, habrá un aumento de la temperatura y, a su vez, aumentará la velocidad de reacción, llegando a alcanzar un estado inestable (Fig. 3).

El prerreducido puede estibarse o almacenarse, siempre que su base o suelo no tenga humedad y se evite el contacto con el agua de lluvia o el agua del mar. Entre los 150 y 200 °C existe una zona incierta, siendo inestable a partir de los 200 °C^[14].

Dejando a un lado las complejidades inherentes a la oxidación de los metales en general y del prerreducido en particular, se resume, a continuación, la problemática asociada al transporte y almacenamiento del DRI.

Ante todo debe distinguirse entre HBI y el resto de las aglomeraciones del prerreducido. El transporte marítimo de HBI no ha presentado incidencias dignas de mención. Lo que se expondrá, a partir de ahora, se refiere al prerreducido aglomerado en frío.

El DRI seco no presenta problemas de recalentamiento excesivo. Es evidente que existe una continua oxidación del material en presencia del oxígeno ambiente o a partir del aire contenido en el propio prerreducido. De hecho, se observa un calentamiento de base, incluso, cuando el transporte se realiza en ambiente inerte. Sin embargo, se necesitaría un aislamiento térmico muy eficaz para llevar el prerreducido seco a zona inestable.

La situación cambia cuando el prerreducido se moja. La reacción con el agua es exotérmica y bastante activa a bajas temperaturas. La evacuación

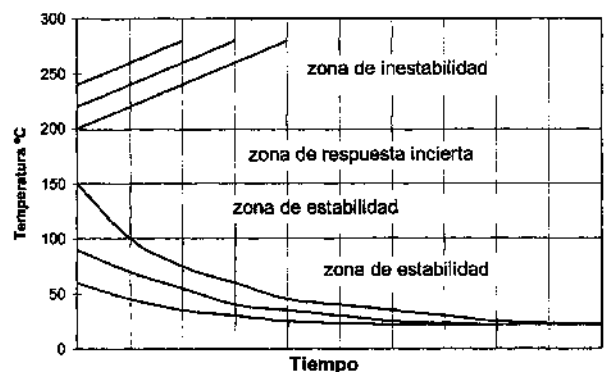


Figura 3. Estabilidad del producto según la temperatura del DRI.

Figure 3. Product stability depending on DRI temperature.

del calor es complicada ante la baja conductividad térmica en el interior de una pila de DRI. La conductividad térmica es baja, tanto en el interior de los aglomerados (dada su estructura porosa y llena de aire) como entre ellos. Esta es una de las cuestiones que mejora considerablemente con el aglomerado en caliente.

De manera que cuando se moja el prerreducido situado en el interior de una pila de este material, se produce un recalentamiento local que conduce a que el hierro reaccione con el oxígeno gaseoso. Con ello se produce más calor y el consiguiente aumento de temperatura conlleva que la reacción entre en la zona inestable.

Las condiciones ambientales (atmósfera, temperatura inicial, conductividad térmica, características del DRI), que conllevan la entrada en la zona inestable, son mucho menos exigentes cuando el prerreducido se moja con agua de mar.

La reacción del prerreducido con el agua produce hidrógeno. La atmósfera de los espacios de carga puede volverse explosiva.

2.2. Cuidados durante la estiba y navegación

Antes de comenzar la carga y estiba se debe observar el estado del prerreducido. Durante la carga, el polvo gris que genera este cargamento es molesto y además contaminante. Por otro lado, si se observa polvo durante la carga, es señal de que este producto no contiene humedad. Las bodegas del buque deben estar limpias y secas y, además, ser totalmente estancas. La mayor dificultad se centra en las tapas de las escotillas (es decir, el cierre superior de las bodegas). Su sistema hidráulico de cierre debe ser comprobado antes de comenzar la carga. La estiba se realizará acorde con el reparto de esfuerzos y calados, procurando que al final no queden montones y permanezca una estiba plana. Dependiendo del material y su aglomerado, resulta un factor de estiba del orden de 0,5 a 0,6 toneladas por metro cúbico (el factor de estiba podría definirse como la "densidad" de las pilas de un producto. El factor de estiba se asemeja a la densidad del producto y depende del tamaño de los intersticios entre los aglomerados de dicho producto), por lo que la carga de prerreducido viene a ocupar en cada bodega aproximadamente un tercio de la altura de ésta.

Durante la navegación, el buque deberá disponer de un sistema de alarma en las sentinas de cada bodega para detectar la entrada de agua y de sensores en cada bodega, que indiquen la tempera-

tura del cargamento y el nivel de oxígeno e hidrógeno.

El transporte de prerreducido en buques sin gas inerte exige que se ventile adecuadamente, para impedir que la humedad ambiente condense sobre la carga.

El inertizado de la atmósfera de las bodegas debe efectuarse con nitrógeno u otro gas inerte apropiado. El dióxido de carbono, que es el otro gas que habitualmente se emplea para este fin, presenta el riesgo de reaccionar con el prerreducido a alta temperatura.

Se recomienda que el inertizado de la atmósfera de las bodegas se realice cuando la bodega esté cargada y sellada. El gas inerte debe introducirse desde la parte baja de la bodega para que circule a través de la carga y desplace con ello el oxígeno de su interior.

La función del gas inerte es doble. Por un lado, previene la reacción del prerreducido con el oxígeno. También, impide que se produzca una atmósfera explosiva con el hidrógeno producido por cualquier entrada de agua.

Un barco tipo OBO es ideal para este transporte, dado que sus tanques están diseñados para ser herméticos y tener incorporadas las tuberías necesarias para inyectar el gas inerte.

2.3. Experiencias recientes sobre el transporte marítimo del DRI

El buque "Necdet-K", de bandera turca y procedente de Ucrania, arribó al puerto de Santander el día 27 de diciembre de 1993 con un cargamento de 7.605 toneladas de prerreducido, estibado en sus tres bodegas. En la mañana siguiente, durante la inspección de la temperatura y estado de la carga, se observaron en la bodega nº 1 temperaturas de 50 y 75 °C y el aspecto ocre de la parte alta de la carga oxidada. En la bodega nº 2 temperaturas de 20 y 26 °C, también con aparente óxido en su parte alta. En la nº 3, de 15 a 17 °C. Se ventilaron las bodegas, dando prioridad de descarga a la bodega nº 1. Por los análisis e inspecciones de las bodegas se conoció que había entrado agua de mar por las escotillas, al parecer, por mal tiempo durante la travesía. La descarga finalizó sin ninguna otra novedad.

En otro viaje, este mismo buque cargó en Ucrania para Pasajes (Guipúzcoa), arribando a este puerto el día 13 de marzo de 1994, con un cargamento de 7.500 toneladas de DRI. Durante la inspección de la carga se tomaron las temperaturas en

las bodegas: Bodega n° 1, 280 °C. Bodega n° 2, 120 °C. En la bodega n° 3 el aspecto de la carga era normal y también las temperaturas. El agua de mar volvió a entrar por las escotillas. Dando prioridad de descarga a la bodega n° 1, se descargó todo el prerreducido sin ningún otro contratiempo^[15].

Un tercer caso tuvo lugar en el buque de bandera turca "Eugin Kaptanoglu", con un cargamento de este material prerreducido formado por 8.542 toneladas, cargado en Ucrania, con destino en el puerto de Santander, donde atracó el día 9 de junio de 1994. El buque disponía de tres bodegas para efectuar su descarga. Tomadas las temperaturas en las bodegas, resultaron: n° 1, 300 °C, n° 2, 110 °C y n° 3, 29 °C, sin que se observara óxido encima de la carga, ni se detectara humedad en esta última. La descarga comenzó rápidamente en las bodegas 1 y 2 y, dada su emergencia, se trabajó en jornada continua. Se decidió esparcir parte de la carga localizada en la bodega 1 en una superficie sin obstáculos, pero cerca del muelle. Durante dicha descarga se encontraron zonas de la carga al rojo vivo (temperaturas del orden de los 1.000 °C). Es evidente que estas zonas no se exploraron durante la toma inicial de temperaturas.

Casos similares han sucedido en todo el mundo^[15]. El buque "Cape Crest" llegó a Portugal con fuego en la carga. El "Sanix Ace" arribó a un puerto de la India con elevada temperatura en su carga. Las autoridades decidieron el cierre hermético de sus bodegas y, después de un mes, se comenzó la descarga, habiendo quedado el prerreducido en grandes bloques y con gran pérdida del cargamento. El "Jay Ambika", en el viaje de Canadá a España, arribó con fuego en su bodega^[16].

Debemos destacar que la descarga de prerreducido en bloques indica que se alcanzaron temperaturas del orden de 900 °C y la bibliografía sugiere que, en algunos casos, se han superado los 1.000 °C^[17] e, incluso, los 1.500 °C. Esta aseveración fue comprobada por los autores de este artículo, durante la descarga del buque "Eugin Kaptanoglu" en el puerto de Santander.

Existen otras mercancías que también reaccionan espontáneamente, como la harina de pescado a granel o en sacos. Esta harina reacciona, más con la humedad y la grasa presente dentro del producto y la poca ventilación en la bodega, que con el agua de mar^[18]. Durante la combustión espontánea, solamente produce humo y, el producto se consume sin llama, no siendo tan peligroso como el DRI, que puede alcanzar hasta los 1.500 °C^[19].

3. MÉTODO

Este trabajo pretende demostrar que, en ocasiones, las condiciones de transporte del prerreducido han sido defectuosas y que no cumplían con las exigencias del Código IMDG. En este código se recoge la obligación de transportar el DRI en atmósfera inerte (menos de un 5 % de oxígeno y del 1 % de hidrógeno en volumen), salvo que el DRI cumpla la condición: "ha sido fabricado o tratado mediante un procedimiento inhibitor de la oxidación y la corrosión que, a juicio de la autoridad competente, ha demostrado proporcionar una protección eficaz contra reacciones peligrosas con el agua de mar o el aire en las condiciones de transporte"^[6].

El método empleado en este proyecto consiste en hacer reaccionar el DRI dentro de un recipiente que simula una bodega donde se ha producido una vía de agua salada por debajo de la carga o por la escotilla. Para la investigación se prepararon varios recipientes reactores en los que se introdujo prerreducido procedente de descargas efectuadas en el puerto de Santander. Los barcos que efectuaron el transporte no habían inertizado sus bodegas.

Diariamente, se tomaron varias veces las temperaturas del interior de los reactores, la temperatura ambiente del laboratorio (T_{ex} °C) y la humedad relativa (H_{rel} %).

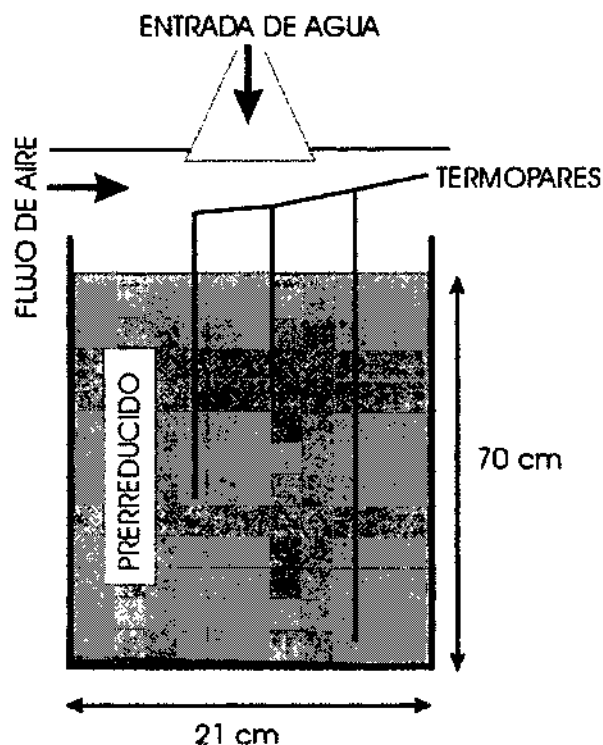


Figura 4. Reactor de lecho fijo.

Figure 4. Fixed layer reactor.

Se tomó un recipiente nº 1 (Fig. 4), de forma cilíndrica y de metal, abierto en su parte alta, con una tapa con orificios para la ventilación e introducción de termómetros. Las medidas del mismo fueron: alto 70 cm, diámetro 21 cm y grosor de la chapa 0,6 mm. El día 4 de mayo de 1995, a las 18:30 horas, se vertieron en su interior 3 l de agua de mar, densidad 1,025 g/cm³ y temperatura 16 °C, siendo la temperatura del laboratorio 21 °C. A continuación, se procedió al llenado del recipiente con DRI hasta el 85 % de su capacidad.

4. RESULTADOS

En la tabla I se detallan las fechas, horas de las anotaciones de las temperaturas del interior del reactor, temperatura ambiente y tanto por ciento de la humedad relativa. A las 24 h la temperatura interior era de 23 °C y comenzó a salir vapor de agua por la parte alta del recipiente. En los siguientes días no se aprecia reacción del producto. Todo indica que la reacción se detiene por que el agua comienza a evaporarse rápidamente y enfría el DRI. Además, la temperatura del laboratorio, también, está bajando.

El día 14 de mayo se vierte 1 l de agua salada encima del prerreducido y se cubre el exterior del recipiente metálico con aislante para evitar la pérdida de calor. De esta forma se simula la entrada de agua desde una escotilla (es decir, desde arriba) y se aproxima la muestra a las condiciones de aislamiento térmico presentes en el interior de una pila de prerreducido.

El día 16 se observó el comienzo del aumento de la temperatura interior (Fig. 5), hasta el día 18,

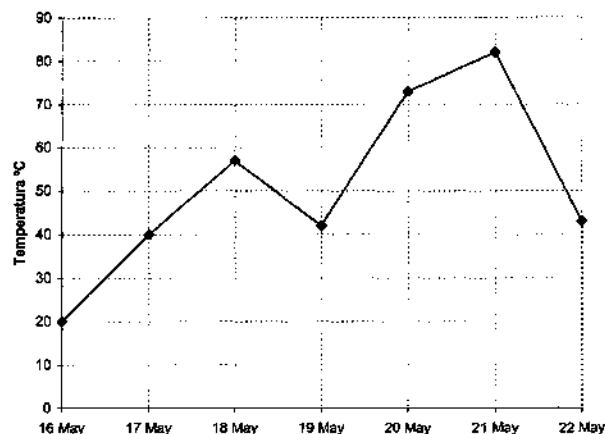


Figura 5. Temperaturas reactor N° 1 del 16 al 22 de mayo, 1995.

Figure 5. N° 1 reactor temperatures from May 16 to May 22, 1995.

en que comenzó a descender. Marcando los 42 °C se abrió un poco la ventilación y se consiguió una subida rápida de la temperatura, observándose la máxima de 82 °C al finalizar la tarde del día 21 de mayo. Poco después, comenzó a bajar la temperatura y se añadió 0,5 l. de agua salada, ventilando convenientemente, sin que se consiguiera subir la temperatura hasta el atardecer del día 23, en que se anotaron 67 °C. La experiencia continuó hasta el día 10 de junio, fecha en que se dio por finalizada, alcanzándose algunas máximas de 70 °C.

El hecho se repitió con dos reactores más. En ambos casos se produjo reacción, alcanzándose temperaturas máximas de 85 y 95 °C.

Tabla I. Temperaturas reactor N° 1 del 5 al 15 de mayo, 1995

Table I. N° 1 reactor temperatures from May 5 to May 15, 1995

Día	Hora	T _{in} °C	T _{ex} °C	H _{rel} %	Observaciones
5 mayo	18-30	23	21	55	Termómetro dentro del DRI
6 mayo	19-30	21	21	73	Sale vapor de agua
7 mayo	20-00	21	21	74	Sale vapor de agua
8 mayo	18-00	21	21	74	Sale vapor de agua
9 mayo	20-00	19	19	73	Vapor, temperatura disminuye
10 mayo	19-00	19	19	64	Vapor, temperatura disminuye
11 mayo	20-00	16	16	69	Vapor, temperatura disminuye
12 mayo	14-00	14	14	66	Vapor, temperatura disminuye
13 mayo	10-00	14	13	65	Vapor, temperaturas disminuyen
14 mayo	19-30	17	17	64	Vapor. Se vierte 1 l. de agua
15 mayo	18-00	17	17	75	Se cubre el reactor con aislante

5. DISCUSIÓN

El objetivo principal del proyecto está dirigido al análisis del transporte marítimo del DRI, para que resulte una travesía sin incidencias en el material transportado y una descarga sin aumento alarmante de la temperatura.

Los riesgos asociados con el transporte de este material dependerán de su estructura, de si estuvo apilado en el muelle sin protección, de si se recibió con humedad, del tipo de barco y de sus condiciones de estanqueidad total, de la ventilación graduada, sensores de temperatura en la carga y de un sistema efectivo de contraincendios que permita cerrar herméticamente la ventilación, de manera que el espacio de carga quede, así, sin aporte de oxígeno en pocos minutos.

Se debe tener muy en cuenta que los buques llevan tanques de combustible (gasoil y fuel-oil) en el doble fondo (es decir, justo debajo de la carga). Estos tanques deben permanecer limpios y desgasificados. En caso contrario, se deberán llenar totalmente de agua.

No disponiendo ni de gas inerte, ni de un sistema efectivo de contraincendios, en un viaje largo y con mal tiempo, en caso de incendio con temperaturas superiores a 1.000 °C, y estando los tanques sin desgasificar o parcialmente llenos de combustible, el buque podría explotar. Se deberá tener presente además que, en la reacción con el agua se forma hidrógeno y, consecuentemente, si su contenido alcanza el 4 %, también puede haber riesgo de explosión^[6].

6. CONCLUSIONES

Es evidente que el material recogido en los buques atracados en el puerto de Santander no disponía de un pasivado suficiente frente al ataque con agua de mar. Este material debió transportarse en atmósfera inerte.

Debe enfatizarse esta conclusión, dado que las condiciones de conductividad térmica en la muestra de laboratorio fueron mucho más favorables que las que encontraremos en el interior de una bodega.

El buque recomendable para el transporte de este prerreducido es el OBO, por disponer de cierre hermético de las bodegas y de las tuberías que permiten inyectar el gas inerte a través de la carga.

Por otro lado, durante nuestra experiencia con los reactores de laboratorio, observamos diversas circunstancias que corroboran la dinámica que se atribuye a este tipo de reacciones químicas. Así, por ejemplo, al aumentar la carga o volumen en los re-

actores, también aumentó la temperatura. No se observó una relación entre el aporte de más agua y el aumento de temperatura, pero sí, en algún momento, una subida de temperatura cuando la ventilación o aportación de oxígeno fue la apropiada. Una temperatura exterior baja no favorece el calentamiento del material. El exceso de vapor de agua en el interior enfría el prerreducido. Para conseguir un aumento de temperatura en el reactor se precisó de un aporte de oxígeno por medio de la ventilación.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento por el patrocinio recibido de la Universidad de Cantabria y de Caja Cantabria, a través del proyecto 640-C109 para la investigación sobre el "Transporte marítimo de mercancías peligrosas de hierro obtenido por reducción directa", de cuyo contenido se han extraído importantes conclusiones.

REFERENCIAS

- [1] H.A. SIDNEY, *Introducción a la metalurgia física*, México, McGraw-Hill, 1988, p. 695.
- [2] A. GANGULY *et al.*, *ISIJ Int.* 9 (1989) 753-760.
- [3] J.A. GONZÁLEZ, *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*, AA.VV, Madrid, CSIC, 1989, p. 524.
- [4] J. AHMED, *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.* 24 (1984) 163-164.
- [5] R.H. VERDIER, *64th AIME Proc.*, 1991, pp. 109-117.
- [6] IMO, *IMDG Code, Direct Reduced Iron*, Supplement, Londres, 1997, pp. 88-92.
- [7] P. GRACIOTTO, Tesis Doctoral, Departamento de Química y Física Aplicada, Politécnico de Milán, Italia, 1992.
- [8] IMCO, *Code for Safe Practice for Solid Bulk Cargoes*, Londres, 1980.
- [9] R.L. HURTER, *Steel Times* 223 3 (1995) 105-107.
- [10] R. PARRAGE, F. ALI y M. GRUNDY, *Direct from Midrex* 19 4 (1994) 33-38.
- [11] W. PIRKLBAUER, *Metall. Plant Technol.* 5 (1982) 32-39.
- [12] R. QUINTERO, *Metall. Plant Technol.* 4 3 (1981) 38-46.
- [13] J. MEDINA, Tesis Doctoral, Michigan Tech. University, 1981.
- [14] K. UPADHYA, *J. Met.* 36 10 (1984) 39-43.
- [15] A.J. CUESTA, *Marine Surveyor*, "Necedet-K", Santander y Pasajes, "Engin Kaptanoglu", Santander, 1994.
- [16] V.J. CLANCEY, *Ironmaking Proc.* 1 (1982) 244-250.
- [17] P.M. ATANMO y M.A. OMAFOMA, *Proc. Annual Conference of the Nigerian*, 1987, pp. 53-58.
- [18] M.J. SAN JOSÉ, J.J. ACHÚTEGUI *et al.*, *Grasas Aceites* 46 (1995) pp. 39-44.
- [19] M.J. SAN JOSÉ, S. MENDIOLA y A. ORTIZ-SALAZAR, *14th Int. Congress of Chem. Process Eng.*, Praga, 2000, pp. 152-158.