



“MODELADO MATEMÁTICO DE LA FUSIÓN
DE HIERRO ESPONJA NO REACTIVO EN UN BAÑO
DE ESCORIA FUNDIDO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIA
E INGENIERÍA DE MATERIALES

P R E S E N T A:

Ing. EDUARDO PINEDA MARTÍNEZ

Tutor: Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente:	Dr. Arturo Barba Pingarrón
Vocal:	Dr. Gonzalo González Reyes
Secretario:	Dr. José Bernardo Hernández Morales
Primer suplente:	Dr. Jorge Antonio Montemayor Aldrete
Segundo suplente:	Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez

Sitio donde se desarrolló la tesis:

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Química, edificio “D”,
Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica, Laboratorio de solidificación y
simulación matemática, Ciudad Universitaria México DF

Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez

Asesor

Ing. Eduardo Pineda Martínez

Tesista

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente al Doctor Marco Aurelio Ramírez Argáez por su gran apoyo, es para mí un orgullo haber trabajado bajo la dirección de un investigador con el talento, ética y calidad humana de Marco. Este trabajo fue posible gracias a su constante interés y orientación.

A mis compañeros Eudoxio Alberto Ramos Gómez y Juan Solórzano López por su incondicional apoyo y amistad, ha sido un placer trabajar al lado de estudiantes tan brillantes y amigos tan sinceros.

Agradezco también al Programa Universitario de Ciencia e Ingeniería de Materiales de la UNAM por su apoyo recibido durante mi maestría, su interés en la vinculación del estudiante con la industria es una parte muy importante para la formación y motivación del estudiante.

Agradezco de la misma forma al Consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría, el apoyo de CONACYT fue fundamental para sostener económicamente mis estudios.

Finalmente quiero agradecer con el corazón a la familia Soto Martínez por su invaluable apoyo durante mi maestría, a ustedes que me abrieron las puertas de su hogar y me acogieron como un miembro más. Tio, Tia, Tito, Tona y Ollin gracias por haber sido mis tíos, mis primos, mis tutores, mis hermanos, mi familia y mis amigos durante esta etapa, estaré siempre agradecido.

DEDICATORIAS

Con mucho cariño a mis padres y hermanos les dedico este trabajo, esta etapa de mi formación, este momento. A ti mamá por representar el más grande amor que me puede trascender, a ti por tu eterno abrazo, a ti que desvelas por mi bienestar. A ti papá que no abandonas una causa, soy tu causa, soy tu reflejo, te dedico todas mis victorias pues de ti aprendí a obtenerlas. A ustedes hermanos míos, hay una parte de ustedes en mi que siempre me da fuerza y me empuja siempre hacia adelante, a ustedes les dedico mi obra, a ustedes que me llenan de vigor. Te dedico este momento también a ti nena, por tu cariño y amor, espero llenar mi vida de dedicatorias para ti, es por ti que mi motivación para alcanzar mis anhelos se ha fortalecido. Les dedico a ustedes esta tesis que representa mi trabajo y mi pasión, a ustedes que están sentados a mi lado sin importar la distancia, a ustedes que amo.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	12
JUSTIFICACIÓN	13
OBJETIVOS	14
1. MARCO TEORICO	15
1.1 El acero	16
1.1.1 Importancia del acero en México	16
1.2 Proceso de fabricación de acero vía horno de arco eléctrico	19
1.2.1 Descripción del horno de arco eléctrico	20
1.2.2 Funcionamiento del horno de arco eléctrico	21
1.2.3 Ventajas y desventajas de la ruta horno de arco eléctrico frente a la ruta alto horno-HBO para la producción de acero	21
1.3 Hierro esponja como insumo para el horno de arco eléctrico	22
1.3.1 Proceso de producción del hierro esponja	23
1.3.2 Características químicas del hierro esponja	24
1.3.3 Uso de Hierro esponja en el horno de arco eléctrico	25
1.3.4 El problema económico actual con la chatarra de acero	26
1.3.5 Ventajas y desventajas de usar hierro esponja en el Horno Eléctrico de Arco	27
1.3.6 Situación económica de la explotación del hierro esponja en el mundo y en México	28
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 Fusión de partículas metálicas en escorias líquidas calientes	32
2.1.1 Efecto de las propiedades físicas y composición química de la escoria en la fusión de hierro de reducción de directa	38
2.1.2 Efecto de las propiedades y composición química del hierro de reducción directa durante su fusión en escorias líquidas	42
2.2 Fusión de hierro esponja en hierro fundido o en acero líquido	47

2.3	Fusión de partículas no ferrosas en baños líquidos no ferrosos	62
2.4	Modelos matemáticos para la fusión de partículas metálicas en baños fundidos	65
2.4.1	Soluciones numéricas	69
2.4.1.1	Solución numérica para resolver Integrales de funciones de Green	69
2.4.1.2	Solución numérica por diferencias finitas	70
2.4.2	Soluciones analíticas	74
2.4.2.1	Solución analítica de Ehrich	74
2.4.2.2	Solución analítica de Zhang	75
2.4.2.3	Solución analítica de Engh	76
3.	MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR	81
3.1	Planteamiento del modelo matemático	82
3.2	Método de solución por diferencias finitas	86
3.2.1	Conducción de calor por diferencias finitas	86
3.2.2	Interfase pelet-escoria	90
3.2.3	Calentamiento de la superficie del pelet	93
3.2.4	Superficies en solidificación	94
4.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	97
4.1	Validación del modelo matemático	98
4.1.1	Modelo de fusión de un material en un baño de su misma composición	99
2.4.1.1	Fusión de pelets de hierro puro en un baño de hierro puro	99
2.4.1.2	Fusión de pelets de aluminio en un baño de aluminio ..	101
4.1.2	Modelo de fusión de un material en un baño de diferente composición química	102
2.4.2.1	Solución analítica y numérica de la fusión de hierro esponja en hierro puro	102
2.4.2.2	Fusión de hierro esponja en escoria	104
4.2	Predicciones del modelo para la fusión de hierro esponja no reactivo en escoria	106

4.2.1	Radio del pelet de hierro esponja	106
4.2.2	Influencia de las principales propiedades físicas en la cinética de fusión de la partícula.....	111
4.2.2.1	Porosidad del hierro esponja	112
4.2.2.1.1	Efecto de la porosidad en la densidad del pelet	112
4.2.2.1.2	Efecto de la porosidad en la conductividad térmica del pelet	113
4.2.2.1.3	Efecto de la porosidad en el tiempo de fusión del pelet	115
4.2.2.1	Efecto del calor específico	119
4.2.3	Influencia de las propiedades físicas de la escoria en la cinética de fusión de la partícula	122
4.2.3.1	Efecto de la conductividad térmica de la escoria	122
4.2.3.2	Efecto de la densidad de la escoria	124
4.2.3.3	Efecto del calor específico de la escoria	125
4.2.4	Condiciones fluidinámicas y temperatura del baño y temperatura inicial del pelet	126
4.2.4.1	Temperatura inicial del pelet de hierro esponja	126
4.2.4.2	Temperatura del baño de escoria	128
4.2.4.3	Coefficiente de transferencia de calor por convección ..	130
CONCLUSIONES		133
APENDICES		
	Apéndice A	136
	Apéndice B	140
	Apéndice C	146

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1	Producción trimestral de acero y de productos de acero en millones de toneladas en el periodo 2007-2009	17
1.2	Producción mensual de acero en millones de toneladas de enero del 2008 hasta septiembre del 2009	18
1.3	Consumo de energético en giga joules por tonelada de acero líquido de distintos países productores	18
1.4	Producción de acero vía Horno eléctrico de Arco	19
1.5	Esquema de un horno de arco eléctrico	20
1.6	Elementos de una planta de reducción directa para fabricar hierro esponja	23
1.7	Proceso de reducción directa del hierro para fabricar hierro esponja	24
1.8	Precio de la chatarra desde 1960 hasta 1997	26
1.9	Producción de hierro esponja en México del 2006 a 2007	29
1.10	Distribución de reservas de minerales de hierro en México por empresa ..	29
1.11	Producción nacional de pellet de mineral de hierro	30

CAPITULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1	Formación de la coraza de acero en la fusión de ferroaleaciones 75FeSi y SiMn graficado con diferentes conductividades térmicas	33
2.2	Cálculos de la temperatura del centro del pelet y el grosor de la capa de escoria en fusión del tiempo	35
2.3	Comparación entre los resultados numéricos y analíticos para el caso de la velocidad inicial de formación de la coraza y su radio máximo	36
2.4	Cambio de la fracción de radio como función del tiempo de inmersión de la partícula y de la temperatura del baño para partículas de escoria fundidas en un baño líquido de escoria	37
2.5	Cambio del tamaño de la partícula en función del tiempo de inmersión y de su diámetro, para partículas de escoria fundidas en un baño líquido de escoria	37
2.6	Medición de la difusividad térmica de las escorias	38

2.7	Efecto de la viscosidad y la conductividad térmica de la escoria en el tiempo de fusión de pelets de reducción directa	39
2.8	Efecto de la viscosidad y la conductividad térmica de la escoria en la velocidad de producción de acero a partir de pelets de reducción directa	40
2.9	Dependencia del tiempo requerido para la fusión del pelet con una escoria con diferentes relaciones de CaO/SiO_2	41
2.10	Efecto de a) CaF_2 y b) MgO en una escoria Con una proporción de 1 de CaO/SiO_2	41
2.11	Calor adicional requerido para fundir HRD con diferentes contenidos de ganga, las curvas representan diferentes basicidades de escoria	42
2.12	Efecto de a) escoria profundida, b) SiO_2 y c) Al_2O_3 contenido en los pelets en el tiempo para su fusión a 1520°C	43
2.13	Efecto del contenido de Fe_2O_3 en el tiempo requerido para fundir el pelet	44
2.14	Dependencia del tiempo requerido para fundir un pelet inmerso en una escoria con una relación de CaO/SiO_2 de a)1 y b)2	44
2.15	Efecto de adiciones de a) CaO , b) CaCO_3 , c) C y d) fundentes (una adición simultanea de SiO_2 , $\text{CaO/SiO}_2=1$) en el tiempo de fusión de los pelets de HRD a 1520°C	45
2.16	Tiempos para la fusión de pelets de reducción directa individuales inmersos en un burbujeo vigoroso, en una escoria líquida caliente a 1600°C de un horno de arco eléctrico	46
2.17	Dependencia de la temperatura y el tiempo de fusión de un pelet con diferentes contenidos de Fe_2O_3 inmerso en un baño de hierro fundido saturado en carbono	48
2.18	Dependencia del tiempo de fusión del pelet Con diferentes concentraciones de Fe_2O_3 de acuerdo al contenido de carbono en el baño metálico	48
2.19	Coraza solidificada en la periferia del pelet de HRD y tiempo de fusión .	50
2.20	Velocidad de fusión en función del tamaño inicial de la partícula	50
2.21	a) Radios de la partícula de hierro esponja a diferentes temperaturas del baño. b) Variación del radio de la partícula sumergida en acero líquido a 1600°C en función del tiempo y temperatura inicial de la partícula	51
2.22	Resultados de los cálculos obtenidos para fusión de pelets en un baño metálico de su misma composición (curvas b y c) en comparación con los obtenidos de fundir el pelet en un baño de diferentes propiedades ...	52
2.23	Cinética de fusión del hierro esponja en acero líquido puro	53
2.24	Cambio de radio predicho y experimental con el tiempo	54

2.25	Tiempo de fusión contra la temperatura de precalentamiento de una esfera de hierro puro en un baño estacionario a 1640°C	55
2.26	Tiempo de fusión calculado contra la temperatura de sobrecalentamiento del baño para esferas inmersas en un baño estacionario	55
2.27	Tiempo de fusión calculado contra el punto de fusión de la aleación para esferas de diferentes diámetros inmersas en un baño estacionario a 1560°C	55
2.28	Efecto de la agitación del baño metálico en la fusión de pelets de HRD en un baño de acero líquido	56
2.29	Disolución de a) hierro puro y b) acero 1045 en condición estática y en un baño de hierro saturado de carbono	58
2.30	Disolución en rotación de hierro puro en un baño líquido de hierro saturado en carbón a 2278°F	58
2.31	Disolución no isotérmica de hierro puro en un baño líquido de hierro saturado en carbono a 2448°F	59
2.32	Solidificación y fusión de un cilindro de media pulgada de diámetro de hierro puro a diferentes temperaturas de precalentamiento inmerso en un baño de hierro saturado en carbono a 2448°F	60
2.33	Distribuciones de temperatura radial para un cilindro de hierro puro inmerso en un baño de hierro fundido saturado en carbono a 2448°C con temperaturas de precalentamiento de a) 256 y b) 856°F ...	61
2.34	Variación del radio de la esfera con el tiempo, las líneas sólidas muestran los valores calculados. a) baño sin agitación y b) baño agitado con inyección de argón	63
2.35	Variación del radio de la esfera inmersa en baños de a) Al-6.0%Si y b) Al-11.49%Si	63
2.36	Comparación de la fracción de tamaño de la partícula calculado por Jiao contra el tiempo usando los resultados experimentales obtenidos por Taniguchi	64
2.37	Descripción del problema de flujo de calor	66
2.38	Elementos en capas esféricas utilizadas en el modelo de diferencias finitas	71
2.39	Representación con diferencias finitas del perfil de temperatura en la interfase pelet-escoria	72
2.40	Tiempo de la coraza Fo_o en función del Biot y de $Bi*b^*$	76
2.41	Tiempo de fusión del hierro esponja Fo_{fe} en función de la constante b y el promedio entre el calor sensible remanente y el calor necesario para la fusión	78

CAPITULO 3
 MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

3.1	Perfil de temperaturas de una esfera fría de hierro esponja inmersa en escoria líquida caliente	83
3.2	Discretización del problema en elementos finitos para calcular la temperatura en el hierro esponja y en la coraza de escoria	86
3.2	Distancias asociadas con la interfase <i>int</i> entre nodos vecino <i>P</i> y <i>E</i>	89
3.3	Posición espacial de los nodos adyacentes a la interfase hierro esponja-coraza de escoria	90
3.4	Posición de los nodos en la interfase móvil.	94
3.5	Posición del nodo cuando la interfase se mueve a un nuevo elemento ...	95

CAPITULO 4
 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1	Evolución del radio de la esfera respecto al tiempo. Comparación entre el resultado numérico y el experimental	99
4.2	Cambio de temperatura en el centro de la esfera respecto al tiempo. Comparación entre el resultado numérico y experimental	99
4.3	Cambio del radio en función del tiempo de un pelet de aluminio inmerso en un baño metálico de aluminio fundido a temperaturas diferentes	100
4.4	Soluciones analíticas para la fusión de un pelet de hierro esponja de 1cm de radio en un baño de hierro puro fundido a 1843 °K y un coeficiente de transferencia de calor por convección de 27104 W/m ² °K	102
4.5	Comparación entre los resultados numéricos obtenidos por el modelo con los resultados obtenidos experimentalmente	103
4.6	Perfil de temperaturas en el centro del pelet de hierro esponja LR-1B-1.	104
4.7	Evolución del radio adimensional del pelet de hierro esponja con el tiempo inmerso a temperatura ambiente en un baño de escoria líquida a 1873°K con un coeficiente de transferencia de calor de 630 W/m ² °K ...	106
4.8	Dependencia del tiempo de fusión con el radio inicial del pelet	107
4.9	Tamaño máximo de la coraza de escoria solidificada a diferentes radios iniciales del pelet de hierro esponja	107
4.10	Masa máxima de escoria solidificada sobre los pelets por tonelada de hierro esponja de diferentes radios alimentado a una escoria a 1923°K	108

4.11	Calor necesario para fundir una tonelada de pelets a diferentes radios iniciales del pelet	110
4.12	Dependencia de la densidad del pelet conforme cambia la porosidad ...	112
4.13	Efecto de la porosidad en la conductividad térmica del pelet	113
4.14	Dependencia del tiempo de fusión del pelet con la porosidad	114
4.15	Evolución del radio de la partícula con el tiempo a diferentes porosidades	115
4.16	Cantidad de escoria solidificada por tonelada de pelet de hierro esponja en función de la porosidad del HRD	117
4.17	Energía necesaria para fundir una tonelada de hierro esponja en escoria en función de la porosidad del HRD	117
4.18	Influencia del calor específico en la evolución del radio del pelet con el tiempo	118
4.19	Dependencia del tiempo de fusión de la partícula con el calor específico del pelet de hierro esponja	119
4.20	Energía necesaria para fundir una tonelada de hierro esponja en escoria variando el calor específico del pelet	120
4.21	Efecto de la evolución del radio del pelet a diferentes conductividades térmicas de la escoria	122
4.22	Tiempo de fusión del pelet a diferentes densidades de la escoria y el pelet	123
4.23	Dependencia del tiempo de fusión de la partícula con el calor específico de la escoria	124
4.24	Evolución del radio del pelet de hierro esponja con el tiempo	126
4.25	Dependencia del tiempo de fusión del pelet de hierro esponja en el baño de escoria conforme cambia la temperatura inicial a la cual la partícula es alimentada al baño	126
4.26	Dependencia del tiempo de fusión de la partícula con la temperatura del baño de escoria	127
4.27	Evolución del radio de la partícula con el tiempo para diferentes temperaturas del baño metálico	128
4.28	Cambio del radio del pelet de hierro esponja con el tiempo en un baño de escoria fundida con diferentes valores del coeficiente de transferencia de calor	130
4.29	Variación del tiempo de fusión del hierro esponja conforme cambia el coeficiente de transferencia de calor por conducción para tres radios iniciales del pelet diferentes	131

LISTA DE TABLAS

1-1	Capacidad mundial de producción de hierro esponja a) en el 2000 y b) en la actualidad	28
2-1	Modelos matemáticos desarrollados por varios investigadores	79
4-1	Propiedades Físicas del hierro, hierro esponja, aluminio y escoria	97
4-2	Resultados obtenidos por el modelo de la energía necesaria para fundir una tonelada de hierro esponja en escoria fundida utilizando pelets de diferentes radios	109
4-3	Valores calculados del consumo de la energía requerida para fundir una tonelada de pelets de diferentes porosidades	116
4-4	Valores estadísticos para el cálculo de la energía para fundir un pelet de diferentes calores específicos	120

DEFINICIÓN DE TERMINOS

Variables

a_n	constante de proporcionalidad
b^*	tiempo de fusión si la adición estaba a la temperatura de fusión en s
h	coeficiente de transferencia de calor por convección en $W/m^2\text{°K}$
k	constante parabólica adimensional de velocidad
q	flujo de calor en W/m^2
s	coordenada radial adimensional
t	tiempo en s
t_c	tiempo donde desaparece la coraza formada en s
t_p	tiempo en que funde la partícula en s
t_{tot}	tiempo total de fusión en s
A	área en m^2
Bi	número adimensional de Biot
C_p	calor específico por unidad de masa $J/Kg\text{°K}$
Fo	tiempo adimensional o número de Fourier
Fo_c	tiempo adimensional en la etapa de la coraza
Fo_p	tiempo adimensional en la etapa de fusión de la partícula
G	función de Green
H	calor sensible en J
H	calor sensible absorbido por la partícula durante la etapa de la coraza en J
L	longitud en m
Nu	número de Nusselt
Ph	calor de fusión adimensional
Po	fracción de porosidad
Q_{tot}	total de calor aportado a la partícula en J
R	radio de la esfera en un tiempo t en m
R_{max}	radio máximo de la esfera en un tiempo t en m
R_0	radio de la esfera en el tiempo $t = 0$ en m
S	radio adimensional de la esfera
T	temperatura en °K
T_b	temperatura del baño metálico en °K
T_c	temperatura en posición radial en un tiempo t_c en °K
T_f	temperatura de fusión del metal o del baño en °K
T_{fb}	temperatura de fusión del baño en °K
$T_{f,M}$	temperatura de fusión del material (pelet coraza de escoria) en °K
T_{int}	temperatura en la interfase en °K
T_{0e}	temperatura de la esfera a tiempo $t = 0$ en °K
U	temperatura adimensional
U^*	temperatura adimensional modificada
V	volumen en m^3
α	difusividad térmica en m^2/s

λ	conductividad térmica en W/m ^{°K}
ρ	densidad en kg/m ³
ξ	coordenada radial adimensional en la cual la fuente de calor es liberada en $t = \tau$
δ	posición de la interfase en m
τ	tiempo adimensional en la cual la fuente de calor es liberada en $s = \xi$
ΔH	calor latente de fusión del metal por unidad de masa en J/kg

Subíndices

0	condición de inicial
1	propiedades del pelet
2	propiedades de la coraza
b	baño
c	coraza
e	esfera
esc	escoria
i	número de elemento o componente
int	interfase
j	número del elemento del tiempo
k	número de elementos en que se divide la región de la partícula
l	fase líquida
m	elemento que contiene la interfase móvil sólido/líquido.
n	elemento del nodo convectivo
p	partícula o pelet
s	sustrato
HRD	hierro de reducción directa (hierro esponja)

INTRODUCCION

La fusión de pelets de hierro esponja en el horno de arco eléctrico para la producción de acero es un proceso que en las últimas décadas ha tomado gran impulso en el mundo de la metalurgia. La volatilidad y los altos precios de la chatarra han dado lugar a una nueva tendencia que proyecta la sustitución de la chatarra por pelet de hierro esponja como el principal insumo para producir acero en el horno de arco eléctrico, esto se debe a las ventajas económicas y la alta disponibilidad en el mercado que ofrece el hierro esponja respecto a la chatarra.

Estudiar la fusión de pelets en hornos eléctricos de arco bajo condiciones reales de operación del horno resulta sumamente complicado, pues las elevadas temperaturas del metal y la escoria fundida se convierten en una limitante para su estudio a nivel planta, ante esto, la mejor alternativa es elaborar modelos matemáticos que ayuden a entender el problema y estudiar minuciosamente todas las variables involucradas en el proceso, para finalmente poder aplicar ingeniería de procesos y proponer soluciones reales y objetivas a los procesos industriales.

En el presente trabajo se elaboró y se validó un modelo matemático capaz de predecir la cinética de fusión de un pelet aislado y no reactivo de hierro esponja en un baño de escoria líquida, el modelo representa una fase insipiente de la modelación de un proceso real de fusión en el horno de arco eléctrico a escala industrial. La elaboración y el planteamiento del modelo matemático se detallan en los diferentes apartados de este trabajo.

JUSTIFICACIÓN

La producción de acero es una de las actividades económicas productivas más rentables en México, es el tercer sector que genera anualmente más producto interno bruto y es una fuente importante de empleo. En México se producen aproximadamente 15 millones de toneladas de acero al año por vía horno de arco eléctrico (HAE) (más de un 62% de la producción total de acero del país) y casi 6 millones de toneladas del total (aproximadamente 40% de los 15 millones via HAE) es producido vía el proceso hierro de reducción directa – horno de arco eléctrico (HRD-HAE).

El consumo de energía eléctrica del horno de arco eléctrico es un factor económico muy importante a considerar en la producción de acero vía HRD-HAE ya que el alto consumo de energía del horno es la principal limitante a nivel mundial para producir acero por esta ruta. Desde hace algunas décadas se han implementado desarrollos tecnológicos, tales como la práctica de escoria espumosa, los transformadores de ultra alta potencia, la inyección de jets de oxígeno a través de lanzas o el precalentamiento de la chatarra, que han hecho más eficiente al HAE bajando su consumo de energía eléctrica. Muchos de estas mejoras se ha logrado de manera empírica, y se cree que el entendimiento profundo de los fenómenos que gobiernan la fusión de acero, a través de modelos matemáticos, ayudará a mejorar aún más la eficiencia de este horno. El objetivo de este trabajo es entender el papel de las distintas variables de proceso sobre la cinética de fusión del pelet en sus distintas etapas, así como cuantificar la transferencia de calor durante todo el proceso y finalmente establecer las condiciones de operación óptimas para el horno de arco eléctrico.

Los modelos matemáticos elaborados por otros investigadores hasta este momento no son suficientemente adecuados para ser utilizados a escala real en una industria ya que consideran demasiadas simplificaciones al describir a los fenómenos involucrados, lo cual impide extrapolar los resultados al horno industrial. Por eso es muy importante continuar esta investigación para aproximar gradualmente el modelo al proceso real y obtener resultados más satisfactorios.

OBJETIVOS

- Objetivo general.

Elaborar y validar un modelo matemático capaz de reproducir la fusión de un pelet de hierro esponja en un baño fundido de diferente composición química a la del pelet.

- Objetivos específicos
 - Estudiar la influencia de las principales propiedades físicas del pelet y del baño tales como la porosidad, la densidad, el calor específico y la conductividad térmica sobre la cinética de fusión del pelet.
 - Evaluar el efecto de la variación de las condiciones iniciales del pelet de hierro esponja y la temperatura del baño fundido sobre la cinética de fusión del pelet.
 - Analizar la influencia del coeficiente de transferencia de calor por convección en la cinética de fusión de la partícula.

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1.1 El Acero

El hierro es un elemento químico de símbolo Fe. Este metal de transición es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, representando un 5% y, entre los metales, sólo el aluminio es más abundante. Es uno de los elementos más importantes del planeta, ya que el núcleo de la tierra está formado principalmente por hierro y níquel, el cual al moverse genera el campo magnético terrestre que protege de la radiación solar dañina para la vida en el planeta.

El hierro es el metal más usado, con el 95% en masa de la producción mundial de metales. Fundamentalmente se emplea en la producción de acero, la cual es la aleación de hierro más conocida, consistente en aleaciones de hierro con otros elementos tanto metálicos como no metálicos que confieren distintas propiedades al material.

Los aceros son aleaciones de hierro y carbono, en concentraciones máximas de 2,11% de carbono en peso aproximadamente. El carbono es el elemento de aleación principal, pero los aceros contienen otros elementos. Dependiendo de su contenido en carbono y sus propiedades mecánicas los aceros se clasifican en: aceros bajo carbono, aceros medio carbono, aceros alto carbono, aceros al carbono, aceros inoxidables, aceros aleados, aceros grado herramienta y aceros baja aleación ultrarresistentes.

El acero es un material de uso estructural indispensable debido a su bajo precio y a sus variadas propiedades mecánicas, especialmente en automóviles, barcos y componentes estructurales de edificios, vehículos, sistemas de tuberías, motores, válvulas y engranajes (1).

1.1.1 Importancia del Acero en México

La producción de acero en México es de vital importancia para la economía, ya que es junto con la construcción y las industrias químicas es uno de los tres sectores fundamentales para el desarrollo industrial del país.

Según datos de la Cámara Nacional del Hierro y el Acero (CANACERO) (2), el PIB siderúrgico en el 2009 fue de 270 648 millones de pesos, lo que equivale a 2.2% del PIB total, 6.2% del PIB industrial y 12.2% del PIB manufacturero. Asimismo, la industria del acero es de los principales usuarios del transporte ferroviario con un volumen nacional de carga de 4.84% del total nacional movilizado por esta vía es también es una importante fuente de empleo en México que genera 53 000 empleos directos y 550 000 indirectos,

además de ser el principal consumidor de gas natural y de energía eléctrica con un 29.1% y 7.3% del total nacional respectivamente.

La situación actual del acero en nuestro país no es favorable, ya que el sector siderúrgico de México no está ajeno a la crítica situación de los mercados financieros internacionales, a partir de la segunda mitad del 2008 presenta la más sensible caída en su producción de la época reciente. Es así que transcurrido el primer trimestre de 2009, la producción de acero y productos derivados descendió 34.8 y 33.1% respectivamente, respecto al mismo período del 2008 como se puede observar en la Figura 1.1.

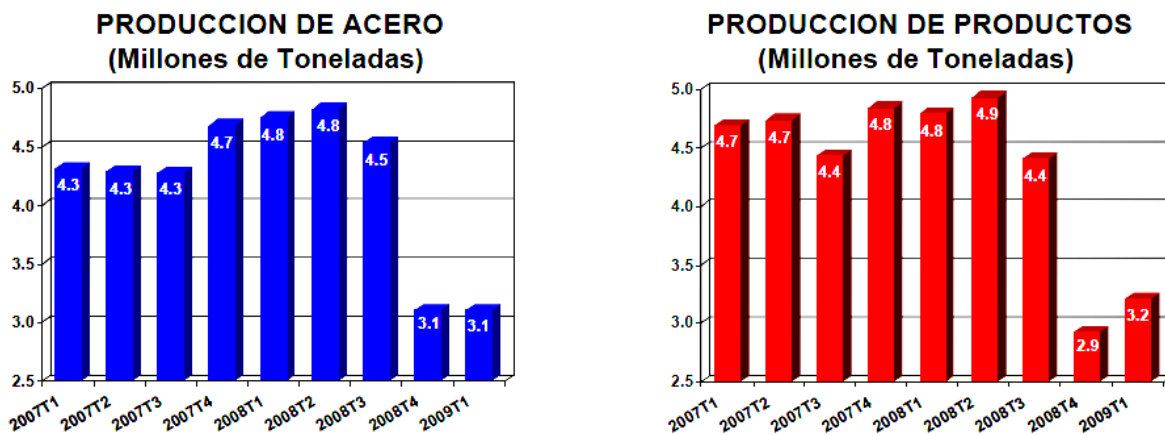


Figura 1.1 Producción trimestral de acero y de productos de acero en millones de toneladas en el periodo 2007-2009 (2).

Sin embargo, a pesar de la caída en la producción del acero a razón de la recesión económica mundial, la producción de acero ha ido recuperando terreno paulatinamente como se puede observar en la Figura 1.2, y se espera que este sector alcance una situación estable y alentadora en el 2010.

También ha habido progresos en el uso de energéticos para la producción de acero, especialmente el acero producido por vía de horno de arco eléctrico. Los energéticos representan entre el 20 y 30% de los costos en la producción de acero, por lo que se han logrado avances significativos en la reducción del consumo de energéticos por tonelada de acero producido, ubicando a México entre los países con la menor intensidad de consumo de energía para la producción de acero como se puede observar en la Figura 1.3.

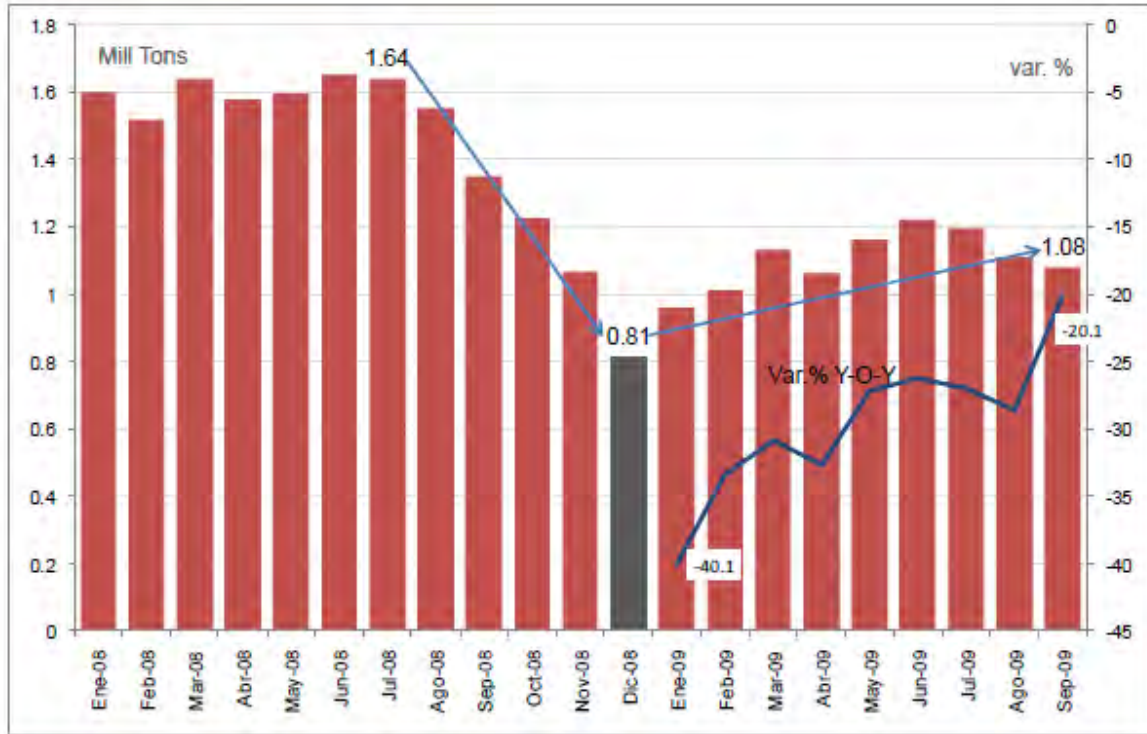


Figura 1.2 Producción mensual de acero en millones de toneladas de enero del 2008 hasta septiembre del 2009 (2).

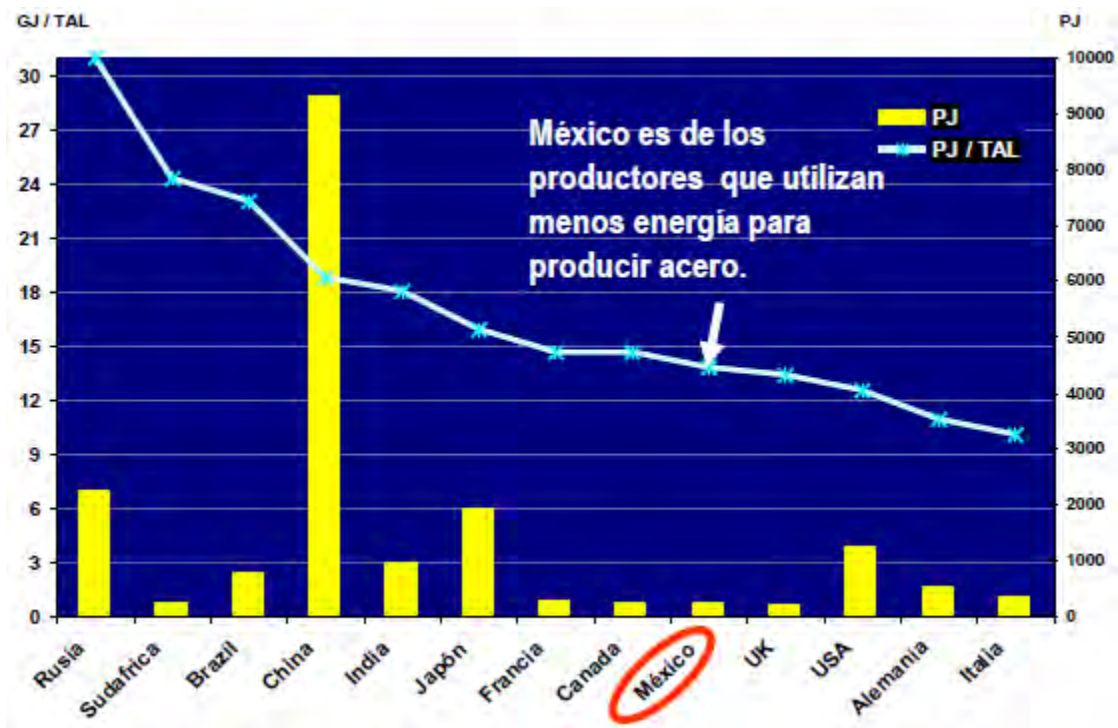


Figura 1.3 Consumo de energético en giga joules por tonelada de acero líquido (eje del lado izquierdo) de distintos países productores (2).

1.2 Proceso de fabricación de acero vía horno de arco eléctrico

En la actualidad una de las rutas más viables para la producción de acero es en hornos de arco eléctrico. Esta ruta está ganando aceptación para la producción de acero, y consiste en reciclar chatarra o fundir hierro esponja (HRD), utilizando la energía que se genera en los arcos que consumen corriente eléctrica. Una vez fundidas estas materias primas el acero líquido va hacia una cuchara u horno olla donde es refinado y enviado a colada continua donde solidifica y posteriormente se lamina obteniéndose un producto semiterminado como un planchón o palanquilla. En la Figura 1.4 se presenta un esquema de las diversas etapas empleadas en la producción de piezas semiterminadas de acero.

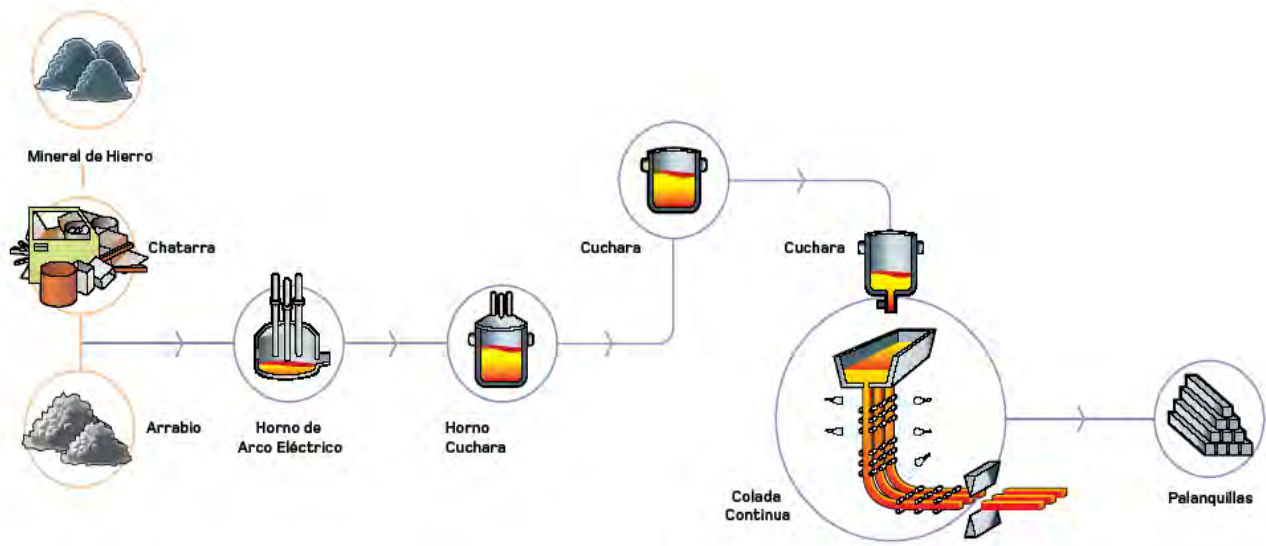


Figura 1.4 Producción de acero vía Horno eléctrico de arco.

1.2.1 Descripción del horno de arco eléctrico

El horno de arco eléctrico (3) consiste en un gran recipiente cilíndrico de chapa gruesa (15 a 30 mm de espesor) forrado de material refractario que forma la solera que alberga el baño de acero líquido y escoria. El resto del horno está formado por paneles refrigerados por agua. La bóveda es desplazable para permitir la carga de la chatarra a través de unas cestas adecuadas.

La bóveda está dotada de una serie de orificios por los que se introducen los electrodos, generalmente tres, que son gruesas barras de grafito de hasta 70 cm de diámetro. Los electrodos se desplazan de forma que se puede regular su distancia a la carga a medida que se van consumiendo. Otro orificio practicado en la bóveda permite la captación de humos, que son tratados convenientemente para evitar contaminar la atmósfera.

El horno va montado sobre una estructura oscilante que le permite bascular para proceder al sangrado de la escoria y el vaciado del baño de acero a una olla. La Figura 1.5 presenta un esquema de la anatomía de un horno eléctrico de arco.

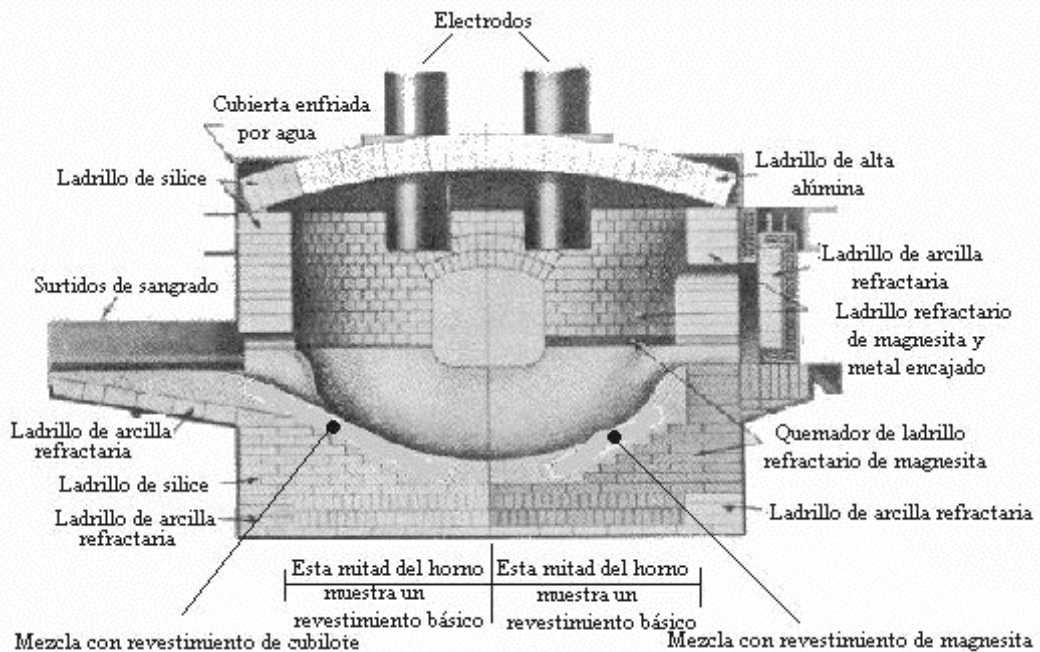


Figura 1.5. Esquema de un horno de arco eléctrico (4).

1.2.2 Funcionamiento del horno de arco eléctrico

El horno de arco eléctrico es el más versátil de todos los hornos para fabricar acero. No solamente puede proporcionar altas temperaturas, hasta 1930°C, sino que también puede controlarse eléctricamente con un alto grado de precisión. Debido a que no se emplea combustible alguno, las únicas impurezas provienen de la materia prima (chatarra o HRD), el resultado es un acero más limpio.

El horno de arco eléctrico se carga con chatarra de acero cuidadosamente seleccionada o hierro esponja: el arrabio fundido se emplea raramente. Si la carga de chatarra es muy baja en carbono se agrega coque (el cual es casi carbono puro) o electrodos de carbono de desecho, para aumentar así su nivel de carbono en el baño de acero líquido. Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco entre los electrodos produce un calor suficientemente intenso como para fundir la chatarra. Cuando la carga se ha derretido completamente, se agregan dentro del horno cantidades determinadas de algunos de los elementos de aleación requeridos. La masa fundida resultante se calienta, permitiendo que se quemen las impurezas y que los elementos de aleación se mezclen completamente.

Para acelerar la remoción del carbono, se introduce generalmente oxígeno gaseoso en forma directa dentro del acero fundido por medio de un tubo o lanza. El oxígeno quema el exceso de carbono y algunas de las impurezas mientras otras se desprenden como escoria por la acción de varios fundentes.

Cuando la composición química de la masa fundida cumple con las especificaciones, el horno se inclina para verter el acero fundido dentro de una olla de colada. Este horno puede producir una colada de acero en un período de 45 minutos a 2 horas dependiendo de las capacidades del horno (5).

1.2.2 Ventajas y desventajas de la ruta horno de arco eléctrico frente a la ruta alto horno-HBO (Horno básico de oxígeno) para la producción de acero.

Aunque el costo de la fabricación de acero en el horno de arco eléctrico es generalmente más alto que el de los demás métodos de fabricación, la calidad del acero producido en estos hornos es superior. Con este horno se tiene el mejor método para controlar la temperatura del baño líquido y las adiciones de aleantes. Además su costo puede justificarse para la fabricación de acero en localidades donde no se cuenta con alto horno ni

con hierros de primera fusión, o en lugares en donde las necesidades intermitentes de acero en cantidades pequeñas no justifiquen una instalación de un alto horno. También es muy usado ya que no contamina la atmósfera en la misma magnitud que la producción de acero por la ruta alto horno – convertidor (BOF). Actualmente, el horno eléctrico produce un 55 % de la producción mundial del acero y la tendencia sigue incrementándose.

Algunas de las ventajas del horno eléctrico son (6):

- Independencia del arrabio líquido
- Alta productividad: de 20 a 80 t/h
- Fácil extracción de la escoria
- Fácil control de temperatura
- Mejor reducción del acero al operar en ausencia de aire
- Menor cantidad de humos
- Programación y automatización de las tareas

Algunas desventajas del horno eléctrico son:

- Producción en menor escala que en la ruta Alto horno-BOF.
- Posibilidad de contaminar el acero con elementos residuales de la chatarra.
- Elevado consumo energía eléctrica.

1.3 Hierro esponja como insumo para el horno de arco eléctrico.

El principal insumo del horno de arco eléctrico consiste en chatarra o hierro esponja, o bien, una combinación de los dos. Cada uno de estos dos insumos presenta ventajas y desventajas respecto al otro. La chatarra es más utilizada ya que es más fácil de fundir e implica un consumo menor de energía eléctrica del horno, sin embargo, su situación en el mercado no es estable y sus precios fluctúan constantemente lo cual hace vulnerables a las empresas acereras. Por otro lado, el hierro esponja además de ser más limpio, es más barato y su disponibilidad es mayor que la chatarra, sin embargo, es un material muy poroso y que contiene ganga lo cual lo hace difícil de fundir, requiriendo un consumo de energía eléctrica muy elevado para su fusión.

Ahora se describirán los puntos más importantes para la selección de ambas materias primas además de sus características principales.

mineral se reduce) por medio de los gases reductores. Estos gases reaccionan con el Fe_2O_3 en el mineral de hierro y lo convierten al hierro metálico, dejando H_2O y CO_2 como subproductos gaseosos. Para la producción de hierro esponja frío, el hierro reducido es enfriado y carburado con los gases que llegan fríos desde la parte más baja del horno.

Algunos gases reductores alternativos son: gasificación del carbón, gas de coquerías, gas de hidrocarburos, gas de desperdicio. En la Figura 1.7 se muestra el proceso de reducción directa para fabricar hierro esponja (7).

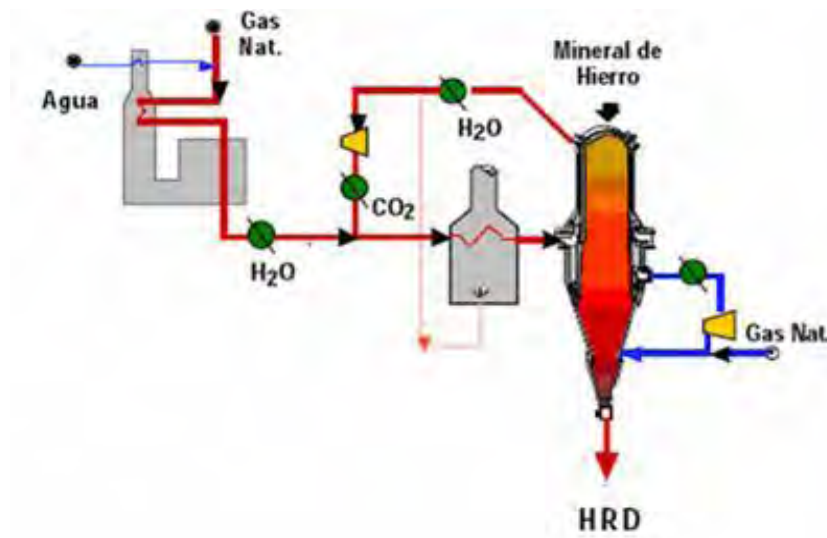


Figura 1.7 Proceso de reducción directa del hierro para fabricar hierro esponja.

1.3.1.2 Características químicas del hierro esponja

En el proceso de reducción directa se remueve la mayor parte de oxígeno contenido en el óxido de hierro original junto con algo de azufre. Las principales características que se deben de controlar en el proceso de reducción del HRD son:

1. Metalización
2. Contenido de carbono
3. Contenido de ganga
4. Impurezas

Metalización: El grado de reducción de HRD es usualmente expresado como el grado de metalización del producto. Es la relación de hierro metálico dividido entre el hierro total.

Contenido de carbono: El contenido de carbono en el HRD varía entre 1.0 y 3.0%, que corresponde respectivamente al grado de metalización de 95 a 85%.

Contenido de ganga: normalmente los contenidos de ganga en el HRD son los siguientes:

SiO ₂ :	1.0 – 5.0%
Al ₂ O ₃ :	0.5 – 3.0%
CaO:	0.1 – 2.0%
MgO:	0.1 - 1.0%

Impurezas y elementos residuales: los elementos residuales (Cu, Zn, Pb, As, Sn, Cr, Ni, Mo) no están normalmente presentes en el HRD en cantidades apreciables. Las impurezas presentes en el HRD son óxidos alcalinos (Na₂O, K₂O), óxido de titanio, fósforo y azufre. El contenido de azufre es normalmente menor a 0.01%, mientras que la cantidad de fósforo está en el rango de 0.01 y 0.04% (8).

1.3.1.3 *Uso de Hierro esponja en el horno de arco eléctrico*

Desde el comienzo de los 90, el uso de hierro esponja o hierro de reducción directa (HRD) ha crecido enormemente como materia prima para la producción de acero en hornos eléctricos de arco debido a su bajo precio comparado con la chatarra, además de su bajo contenido de elementos residuales. El principal estímulo detrás de la producción de HRD es la popularidad que ha alcanzado el horno de arco eléctrico dada su flexibilidad de operación. El uso de chatarra en el horno eléctrico ha estado creando un problema considerando la poca disponibilidad de chatarra baja en residuales, resultando en un incremento en los precios de la chatarra y permitiendo considerar al HRD como una alternativa mucho más competitiva.

1.3.1.4 El problema económico actual con la chatarra de acero

Los avances en la tecnología de fabricación del acero como la colada continua y la fabricación de piezas metálicas de alta calidad, reducen la cantidad de chatarra que se produce internamente en las acerías, generando una mayor demanda de chatarra. La tendencia actual indica que el acero será producido con mayor calidad y que tendrá un mayor tiempo de vida, lo que alargará el ciclo en que se genera la chatarra y en consecuencia se presentará alzas de los precios de esta.

Como ya se ha mencionado, hay dos problemas que surgen al usar chatarra como materia prima en los hornos eléctricos de arco: a) la presencia de elementos remanentes perjudiciales para el acero y b) la volatilidad de su precio en el mercado que se puede observar en la Figura 1.8. Conforme aumenta el precio de la chatarra, en determinado punto la producción de acero con chatarra se vuelve más cara que con productos de reducción directa.

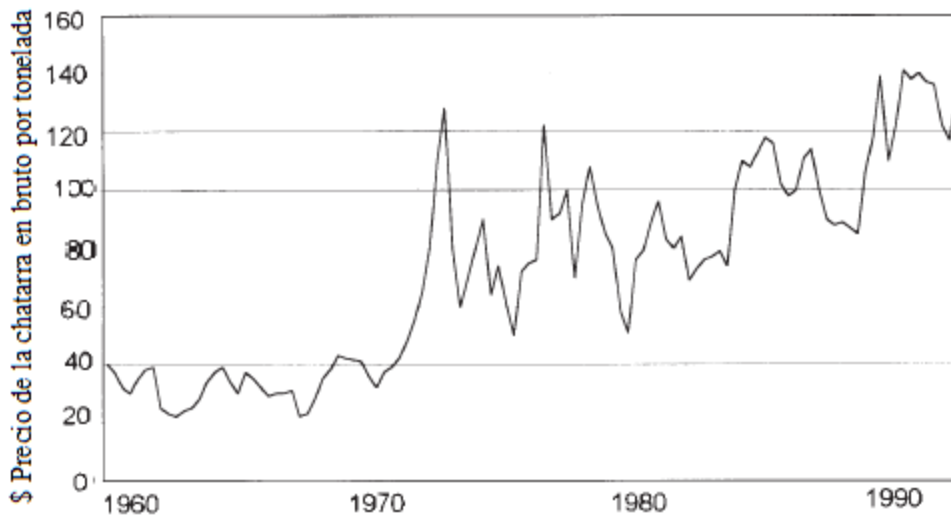


Figura 1.8. Precio de la chatarra desde 1960 hasta 1997. (9)

1.3.1.5 *Ventajas y desventajas de usar hierro esponja en el Horno Eléctrico de Arco.*

Las principales ventajas de fundir hierro esponja en lugar de chatarra de acero son las siguientes:

- Ausencia de elementos remanentes indeseables.
- Ausencia de sustancias no metálicas que afecten la productividad y el consumo de energía.
- Uniformidad en densidad y forma, lo que mejora el tiempo de carga, productividad, consumo de energía y el daño a las paredes refractarias del horno.
- Costos menores de operación dada la independencia en el uso de coque como fuente combustible.
- Menos tiempo de construcción. Se ha demostrado que una planta de HDR se puede construir en menos de 2 años, comparados con los 5 a 7 años en construir una planta con la ruta alto horno – HBO.
- Alta disponibilidad en el mercado.
- Carbón presente. El HRD tiene un beneficio adicional comparado con la chatarra, dado que contiene un valor energético asociado en forma de carbón combinado que incrementa la eficiencia del horno.
- Carga directa. El uso de HRD transportado y cargado a un horno, puede reducir el consumo de energía desde un 16 hasta un 20% cuando es cargado a una temperatura mayor de 600°C.
- El precio de HRD está básicamente abierto a negociación con el productor, mientras que para la chatarra, los cuales están rutinariamente publicados por grado y mercado.
- La facilidad con que se puede mezclar el HRD con chatarra permite utilizar chatarras más baratas y de menor calidad.
- En el BOF, el HRD actúa como medio de enfriamiento, mientras que en el alto horno es usado como material de carga para incrementar la productividad o disminuir el consumo de coque.
- Es ambientalmente más amigable, evitando problemas de contaminantes peligrosos como plomo o cadmio en los polvos del horno eléctrico.

Sin embargo, a pesar de las ventajas mencionadas anteriormente el hierro esponja presenta las siguientes desventajas que lo sitúan en un papel complicado respecto a la chatarra:

- Debido a la naturaleza y área superficial del HRD sin tratar, tiene la inherente desventaja de ser altamente reactivo con la humedad, por lo que es posible que sufra de reoxidación y una posible autoignición exotérmica.
- A diferencia del arrabio del alto horno, que es casi metal puro, el HRD contiene ganga de sílice, la cual necesita ser removida del HAE, incrementando la energía consumida.
- Aumento en el consumo del refractario cuando se utilizan grandes cantidades de HRD en lugar de chatarra.

Considerando los nuevos proyectos que han surgido en los últimos años en los países productores de acero, aunado con los que están planeados para el futuro, está claro que ha habido un crecimiento en el uso de HRD en todo el mundo en los últimos años (9).

1.3.1.6 Situación económica de la explotación del hierro esponja en el mundo y en México

En la actualidad el uso de HRD en el mercado es promisorio económicamente. En la década anterior la capacidad existente en el mercado era de un 10% comparada con el 50% de la capacidad que se encuentra hoy en día y el 80% que se cree alcanzar en un futuro en el mercado. La Tabla 1-1 muestra la capacidad instalada actual para producir HRD y en la Tabla 1-2 se aprecia la proyección de la capacidad de producción de HRD en el futuro a nivel mundial.

Tabla 1-1. Capacidad mundial de producción de hierro esponja a) en el 2000 y b) en la actualidad (9).

a)

Tabla 1-1 Capacidad mundial de HRD en el 2000	
Region	Existing capacity (mt/y)
North America and Mexico	5.1
South America and Trinidad	8.2
Asia	10
Middle East	8.2
Africa	4.0
Europe and CIS	2.0
Source: (CRU ⁵)	

b)

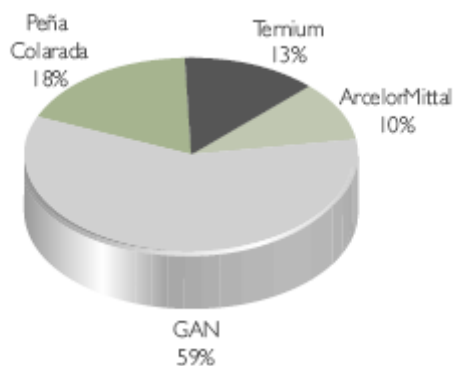
Tabla 1-2 Capacidad mundial actual de HRD	
Region	Planned capacity (mt/y)
North America and Mexico	4.0
South America and Trinidad	6.2
Asia	1.6
Middle East	4.0
Africa	1.7d
Europe and CIS	1.0
India	0.9
Australia	7.3
Source: (CRU ⁵)	

En México la industria del hierro esponja es muy importante, ya que México es un país con suficientes recursos y minerales de hierro para producir HRD, por lo tanto el HRD toma un papel importante en la economía del país. La producción de hierro esponja (HRD) en el 2007 fue 6.3 millones de toneladas, 2.7% mayor que la del 2006 que fue de 6.2 millones de toneladas como se ve en la Figura 1.9.



Figura 1.9 Producción de hierro esponja en México del 2006 a 2007 (10).

Al cierre del 2007, las reservas geológicas estimadas de mineral de hierro fueron 951.1 millones de toneladas y su distribución por empresa se muestra en la Figura 1.10.



Compañía	2006	2007	%
	(Millones de Toneladas)		
GAN	551.1	560.0	1.6
Peña Colorada	179.8	169.5	-5.7
Ternium	131.4	126.6	-3.7
ArcelorMittal	105.6	95.0	-10.0
TOTAL	967.9	951.1	-1.7

Figura 1.10 Distribución de reservas de minerales de hierro en México por empresa (10).

Los precios de mineral para el año 2008 indican que el incremento respecto al año 2007 fue del orden del 65%. La producción de pellet en México se muestra en la Figura 1.11 (10).



Figura 1.11 Producción nacional de pellet de mineral de hierro (10).

CAPITULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La optimización y el diseño del horno de arco eléctrico trifásico para la fusión de hierro de reducción directa (HRD) requieren de un entendimiento de los factores que controlan la velocidad a la cual las partículas o pelets de HRD son fundidas, y pasan a través de la escoria líquida caliente.

Un objeto metálico sólido y frío que es sumergido en un baño de escoria líquida, será cubierto por una capa de escoria sólida que se forma inmediatamente después de la inmersión. Esta escoria se refundirá gradualmente, pero mientras esto sucede, ésta actuará como la principal barrera para la transferencia de calor entre el pelet y la escoria líquida que es agitada por burbujeo de gases u otras fuentes de agitación.

A continuación se presenta una reseña de las investigaciones realizadas acerca del estudio de la fusión de hierro de reducción directa tanto en hierro fundido como en escoria líquida. En estos trabajos se analizan los factores más importantes que inciden en el tiempo que toma una partícula de hierro esponja desde el momento en que es sumergida en una escoria hasta que se funde: también se hace una reseña del fenómeno de fusión de estas partículas en hierro fundido, con la visión de encontrar alguna analogía útil para la comprensión del problema en cuestión.

2.1 Fusión de partículas metálicas en escorias líquidas calientes

Son diversas las investigaciones que se han realizado acerca de la fusión de partículas esféricas inmersas en un baño metálico como se verá posteriormente en este capítulo, sin embargo, en este trabajo, el objetivo es muy particular y consiste en investigar la fusión de hierro esponja en escoria fundida del horno de arco eléctrico, en este sistema son muy pocos los trabajos que se han reportado por investigadores, es por eso que es de mucha importancia emprender nuevas investigaciones para comprender mejor las particularidades de la cinética de fusión de dichas partículas.

Un trabajo pionero en la investigación de este fenómeno es el realizado por Lee y colaboradores (11). Se estudió la cinética de disolución de ferroaleaciones de bajo punto de fusión, es decir 75FeSi y SiMn . Esta cinética de fusión es análoga a la cinética con que funde el hierro esponja ya que estas ferroaleaciones flotaron sobre la superficie del baño de acero formando en su periferia una coraza de escoria solidificada. El análisis del modelo de transferencia de calor indica que el tiempo requerido para refundir la capa metálica sólida alrededor de las ferroaleaciones es mayor que el tiempo de fusión de la ferroaleación. El tiempo de disolución de las ferroaleaciones con menor punto de fusión que el acero es aproximadamente el tiempo de refundición de la capa de acero formada, sugiriendo que el

tiempo de fusión de dichas partículas es controlado por el mecanismo de transferencia de calor. Sin embargo, si el punto de fusión de la ferroaleación es mayor que el punto de fusión del acero, la cinética de disolución estará dominada no solo por la transferencia de calor, sino también por la transferencia de masa después de que la capa de acero solidificada se refunde completamente. Las Figuras 2.1 muestran la cinética de disolución de las ferroaleaciones 75FeSi y SiMn.

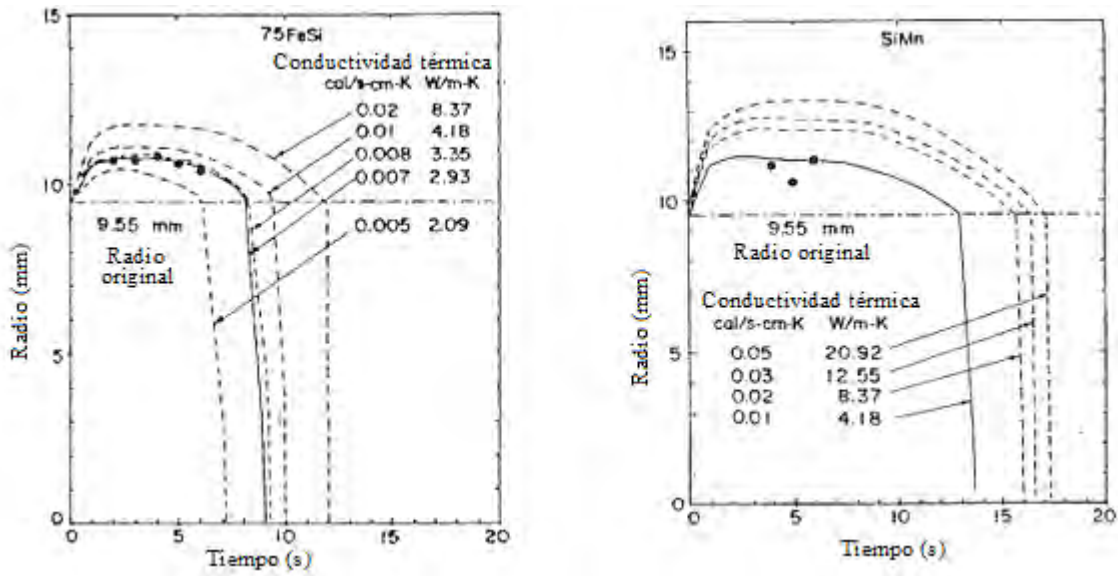


Figura 2.1. Formación de la corza de acero en la fusión de ferroaleaciones 75FeSi y SiMn graficado con diferentes conductividades térmicas. La línea sólida representa la mejor aproximación a los resultados experimentales (11).

La cinética de la fusión de pelets de HRD ha sido realizado principalmente por Elliot (12), quien elaboró un modelo matemático simple de la fusión de partículas individuales en un baño de escoria caliente para determinar el tiempo que requiere una partícula de HRD para fundirse en una escoria típica de un horno de arco eléctrico. De acuerdo a su trabajo, el calentamiento de un pelet está acompañado por la continua evolución de monóxido de carbono (94%) y dióxido de carbono (6%). La generación de gases provenientes del pelet influye en la velocidad de transferencia de calor de la escoria al pelet.

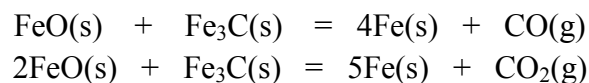
Para Elliot la corza de escoria formada en el pelet depende de los siguientes factores:

1. Grado de agitación del fluido alrededor de la capa de escoria.
2. Rapidez de la transferencia de calor del líquido a la capa de escoria sólida.
3. Rapidez de conducción de calor a través del HRD-capa de escoria.

La capa de escoria contendrá poros como resultado del burbujeo de gas presente en la escoria mientras se enfría, la presencia de estos poros altera la conductividad térmica de la escoria. Conociendo el régimen de flujo y las propiedades del líquido, es posible predecir el coeficiente de transferencia de calor de la escoria líquida en contacto con la coraza de escoria sólida, o con la superficie de la partícula metálica si la capa formada de escoria ya ha sido fundida.

Se sabe que el grosor de la capa sólida está determinado por la velocidad a la cual se transfiere el calor hacia la partícula metálica y varios factores más que determinan la velocidad a la cual el calor es suministrado por la escoria, es decir, la densidad, el diámetro y la conductividad térmica del metal, el movimiento de la escoria respecto a la esfera, la temperatura del baño, las temperaturas *liquidus* y *solidus*, densidad, conductividad térmica y calor específico de la escoria.

Los factores más importantes que determinan el tiempo de residencia de la partícula metálica cuando se sumerge en una escoria caliente son: la densidad y el tamaño de las partículas, la densidad de la escoria, factores que determinan el coeficiente de transferencia de calor de la escoria líquida, y otros factores más que determinan la cantidad total de calor necesario para llevar a la partícula a su punto de fusión. El tiempo requerido para fundir una partícula esférica inmersa en una escoria líquida caliente se calculó por un modelo computacional de transferencia de calor de diferencias finitas. En esta serie de cálculos se asumió que la escoria era típica de un horno de arco eléctrico con una temperatura del baño de 1600° y una temperatura de *liquidus* de la aleación de acero de 1530°C, los cálculos fueron hechos para pelets con varios porcentajes de metalización y con diferentes contenidos de oxígeno y carbono. Se supuso que el carbono se encontraba presente como Fe₃C por lo tanto las reacciones que producen a los gases carbonatados fueron:



El balance térmico del modelo tomó en cuenta todos los calores de reacción y los calores de fusión de todos los constituyentes, así como los incrementos de entalpía de todos los constituyentes desde temperatura ambiente hasta 1530°C, que se tomó como el punto de fusión del hierro. El modelo también incluyó la formación de la coraza de escoria sólida en la superficie del pelet. El número de Nusselt de cada cálculo se basó en el diámetro del pelet más el grosor de la capa de escoria solidificada. Se supuso un vigoroso burbujeo en la escoria por lo que se asumió un coeficiente de transferencia de calor en el rango de 0.01 cal/cm².s.°C . Un ejemplo se observa en la Figura 2.2, donde se muestran los cálculos de las temperaturas del pelet y de la capa de escoria en función del tiempo para un pelet de 10 mm de diámetro con una densidad de 2.5 g/cm³. Los cálculos muestran que aproximadamente se requieren de aproximadamente 35 segundos para fundir el pelet en este sistema.

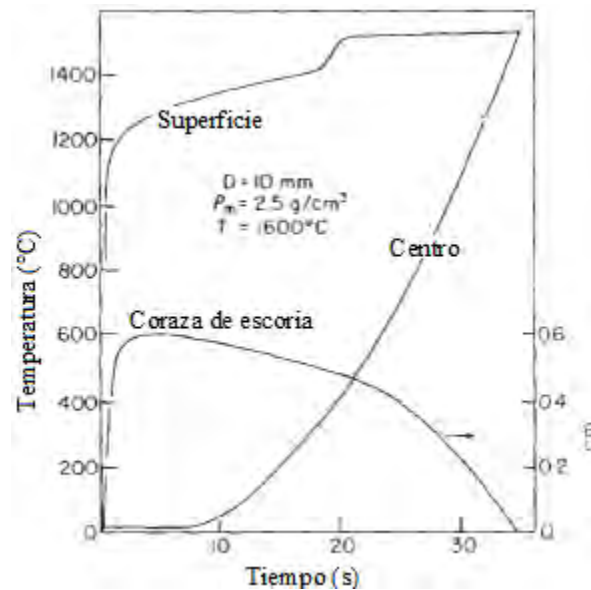


Figura 2.2. Evolución de la temperatura del centro del pelet y del grosor de la capa de escoria en fusión del tiempo, utilizando una partícula de HRD de 10 mm y 90% de metalización inmersa en escoria líquida (12).

Los resultados calculados mostrados en la Figura 2.2 muestran que los tiempos de fusión de los pelets inmersos en una escoria con burbujeo vigoroso, son fuertemente influidos por el tamaño del pelet.

Los resultados de Elliot fueron estudiados y validados con una solución numérica y otra analítica desarrollada por Jiao y colaboradores (13), quienes elaboraron un modelo matemático para predecir el tiempo de fusión de un pelet de HRD en escoria. Usando los resultados numéricos generados por este modelo, los autores desarrollaron una correlación para calcular el máximo grosor de la coraza formada alrededor de la partícula poco tiempo después de su inmersión en el baño de escoria. En la Figura 2.3 se muestra la comparación entre los resultados numéricos y la solución analítica del modelo, para el caso de inmersión de un pelet de HRD en escoria con una temperatura del baño igual a la temperatura de fusión de la escoria. Se puede observar que hay una buena concordancia entre los resultados analíticos y numéricos para el caso de la velocidad inicial de la formación de la coraza (pendiente inicial) y el máximo radio de la coraza (línea horizontal). Jiao menciona que es necesario poner especial consideración en las condiciones iniciales del sistema, ya que un incremento en la temperatura del baño líquido y en la temperatura inicial de la partícula acelerará la velocidad de fusión de las partículas incrementando la fuerza motriz (diferencia de temperaturas) o reduciendo el calor total requerido para fundir la partícula.

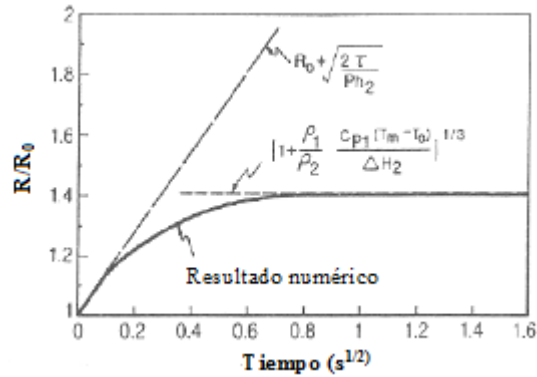


Figura 2.3. Comparación entre los resultados numéricos y analíticos para el caso de la velocidad inicial de formación de la coraza y el valor de su radio máximo. (13)

El modelo también fue utilizado para predecir el tiempo de fusión de partículas de escoria fundidas en su misma escoria. En la Figura 2.4 se observa el efecto dominante que tiene la temperatura del baño sobre la velocidad de fusión de las partículas de escoria; los tiempos requeridos para completar la fusión de una partícula de escoria de 10 cm de diámetro inmersa en un baño de escoria a 1200, 1250, y 1300°C son 2200, 830 y 520s respectivamente. De acuerdo al criterio de Jiao, el tiempo de fusión de las partículas es inversamente proporcional a la diferencia entre la temperatura del baño y la temperatura de solidificación del baño líquido. Esto puede explicarse fácilmente por la evidencia de que la velocidad de transferencia de calor es proporcional a la fuerza motriz y el tiempo de fusión de la partícula es inversamente proporcional a la rapidez de transferencia de calor.

La relación existente entre el tamaño de las partículas y su tiempo de fusión se puede apreciar en la Figura 2.5 para partículas de escoria fundidas en un baño de escoria, la gráfica indica que la fracción máxima del grosor de la coraza disminuye y el tiempo de fusión de la partícula aumenta conforme aumenta el tamaño de la partícula.

Hoy existe aún un gran desafío en el problema de modelar las partículas metálicas en escorias calientes en hornos de arco eléctrico. Por ejemplo la formación de islas, o agregados, de pelets fríos que forman islas cuando flotan bajo los electrodos justo en la región del arco. Otro problema importante es la escoria espumosa formada por el gas proveniente de las partículas presentes en la escoria, ya que esta escoria afecta la transferencia de calor para fundir los pelets de reducción directa cuando son alimentados continuamente al horno.

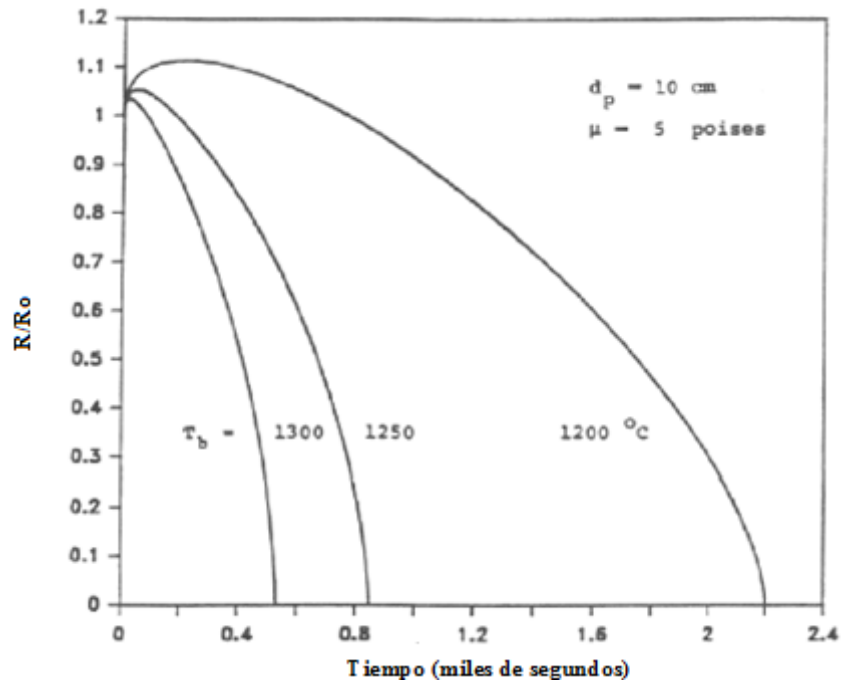


Figura 2.4. Cambio de la fracción de radio como función del tiempo de inmersión de la partícula y de la temperatura del baño para partículas de escoria fundidas en un baño líquido de escoria (13).

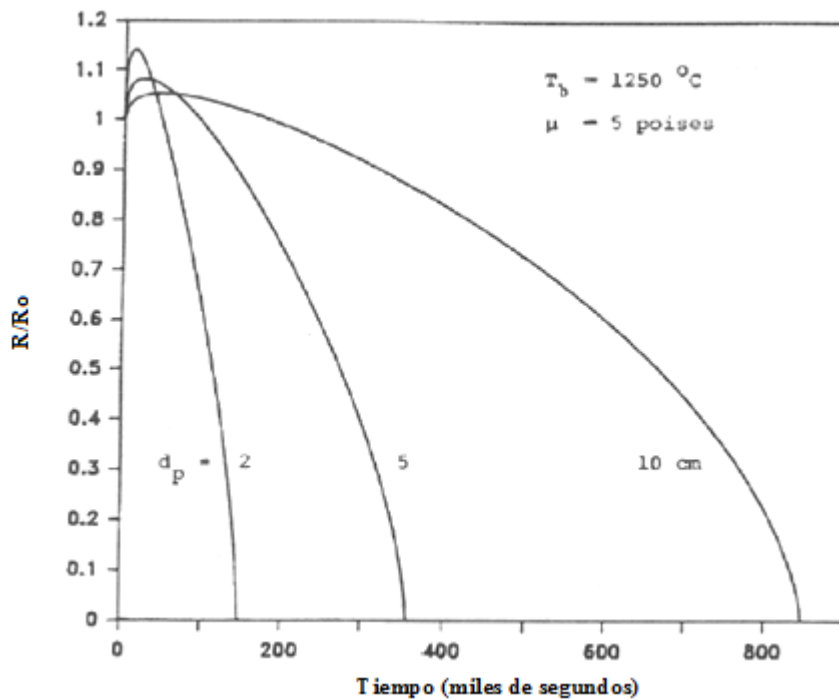


Figura 2.5. Cambio del tamaño de la partícula en función del tiempo de inmersión y de su diámetro, para partículas de escoria fundidas en un baño líquido de escoria (13).

2.1.1 Efecto de las propiedades físicas y composición química de la escoria en la fusión de hierro de reducción de directa

Las propiedades fisicoquímicas de la escoria son de suma importancia para determinar el tiempo de permanencia de una partícula esférica de HRD inmersa en la escoria líquida hasta alcanzar su temperatura de fusión. Son diversos los investigadores que han reportado estudios al respecto.

Elliot (12) midió la difusividad térmica (α) de una variedad de escorias metalúrgicas de diferentes composiciones químicas, encontrando un rango de 0.003 a 0.012 cm^2/s . Los resultados de las mediciones de difusividad térmica de algunas escorias se muestran en las Figura 2.6. Los valores correspondientes de la conductividad térmica (k) de estas escorias son numéricamente casi los mismos, por ejemplo, 0.004 a 0.010 $\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$ (de 1 a 2.5 $\text{BTU}/\text{ft}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{F}$). Las mediciones de las conductividades térmicas de escorias en estado líquido indicaron que los valores de α y λ no cambian significativamente cuando cambia la composición química de la escoria siempre que el contenido de FeO exceda el 10%. Por lo tanto la escoria es esencialmente opaca a la transmisión de radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda de 0.5 a 10 micras. Se observó que la conductividad térmica de la escoria en estado sólido no difiere significativamente con respecto al estado líquido.

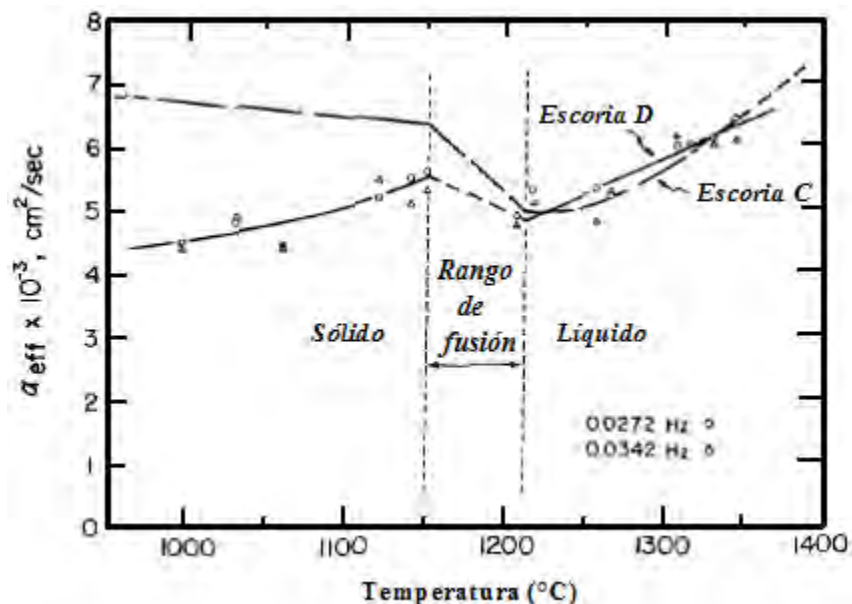


Figura 2.6. Difusividad térmica de las escorias como función de la temperatura.

Escoria C: 60.6% FeO, 1.4% Fe_2O_3 , 38.1% SiO_2 .

Escoria D: 55.1% FeO, 1.2% Fe_2O_3 , 34.6% SiO_2 , 9.1% CaO (12).

De acuerdo con Sadrezhaad (14), la relación de la conductividad térmica de la escoria y su viscosidad es influida fuertemente por la composición química del pelet y la temperatura. La Figura 2.7 muestra esta relación. Variaciones en la viscosidad de la escoria en el rango de 1 a 5 poises (rango normal en aceración) afectan substancialmente el tiempo de permanencia del pelet en la escoria y la velocidad de producción de acero vía fusión de hierro esponja, como se muestra en las Figuras 2.7 y 2.8. Se observa que conforme aumenta la viscosidad y disminuye la conductividad térmica de la escoria, el tiempo de fusión de la partícula aumenta.

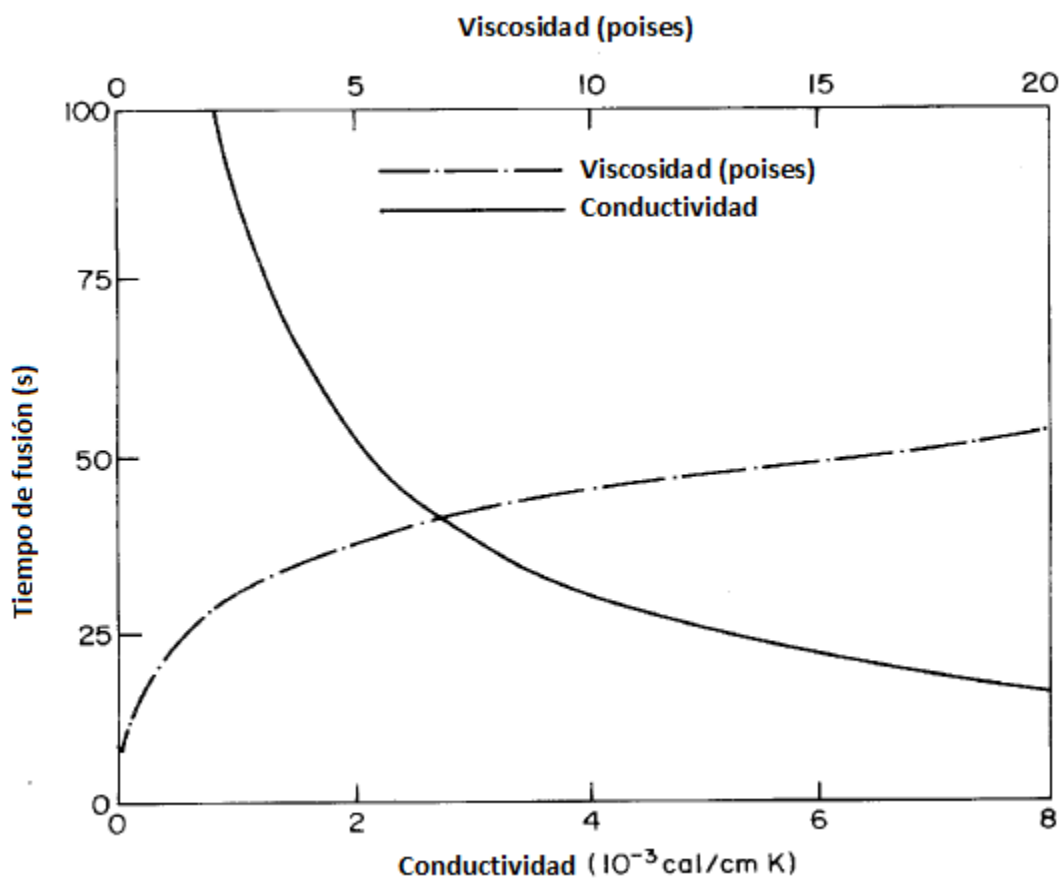


Figura 2.7. Efecto de la viscosidad y la conductividad térmica de la escoria en el tiempo de fusión de pelets de reducción directa (14).

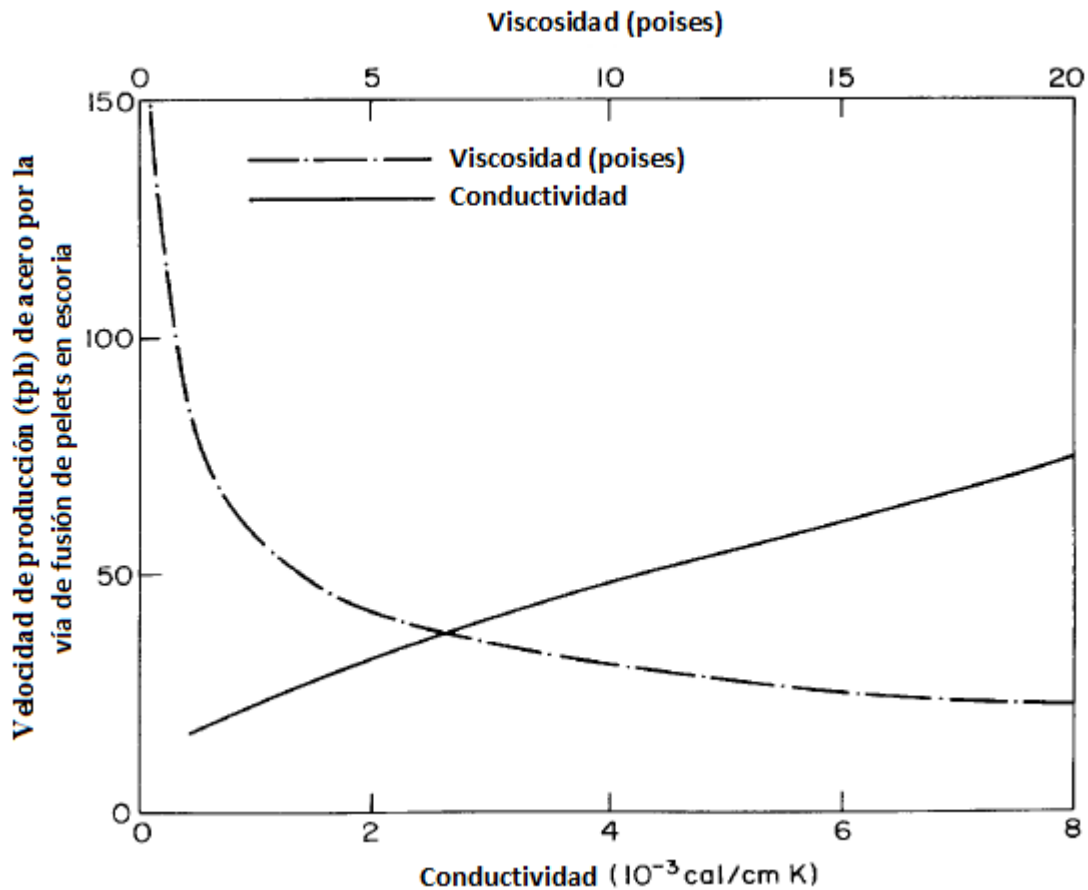


Figura 2.8. Efecto de la viscosidad y la conductividad térmica de la escoria en la velocidad de producción de acero a partir de pelets de reducción directa (14).

Por otro lado, la contribución del efecto de la composición química de la escoria sobre el tiempo de fusión de pelets de hierro esponja, fue estudiado por Sato y colaboradores (15), quienes observaron que la máxima rapidez de fusión de una partícula esférica de HRD en una escoria líquida se da cuando la relación de CaO/SiO_2 es de alrededor de 1. Para esto, una escoria líquida con baja viscosidad y baja densidad es deseable.

La Figura 2.9 muestra los resultados de Sato para la fusión de pelets en una escoria con una proporción de CaO/SiO_2 de aproximadamente 1 en un baño metálico saturado en carbono a 1520°C . Se observa que la rapidez de fusión es máxima cuando la relación CaO/SiO_2 es aproximadamente 1, la razón es que la viscosidad es propicia para fundir más rápido al pelet.

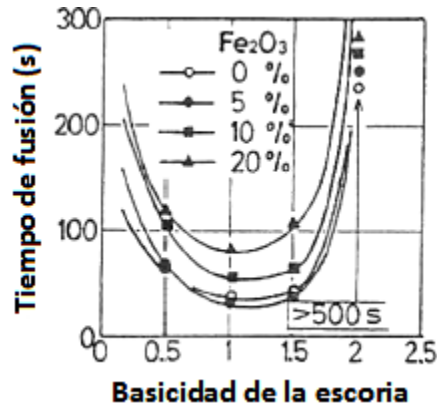


Figura 2.9. Dependencia del tiempo requerido para la fusión del pelet con una escoria con diferentes relaciones de CaO/SiO₂ (15).

También se estudió el efecto de otras adiciones a la escoria como a) CaF₂ y b) MgO. El CaF₂ fue agregado con el objetivo de disminuir la viscosidad de la escoria líquida y el MgO se agregó para simular su disolución proveniente de las paredes refractarias del horno. En la Figura 2.10 se observa como el MgO y el CaF₂ tuvieron un pequeño efecto disminuyendo el tiempo requerido para fundir pelets sin Fe₂O₃, sin embargo, este tiempo aumentó para los pelets con Fe₂O₃. El efecto de la composición de la escoria en el tiempo de fusión del HRD se explica por la viscosidad y la densidad de la escoria.

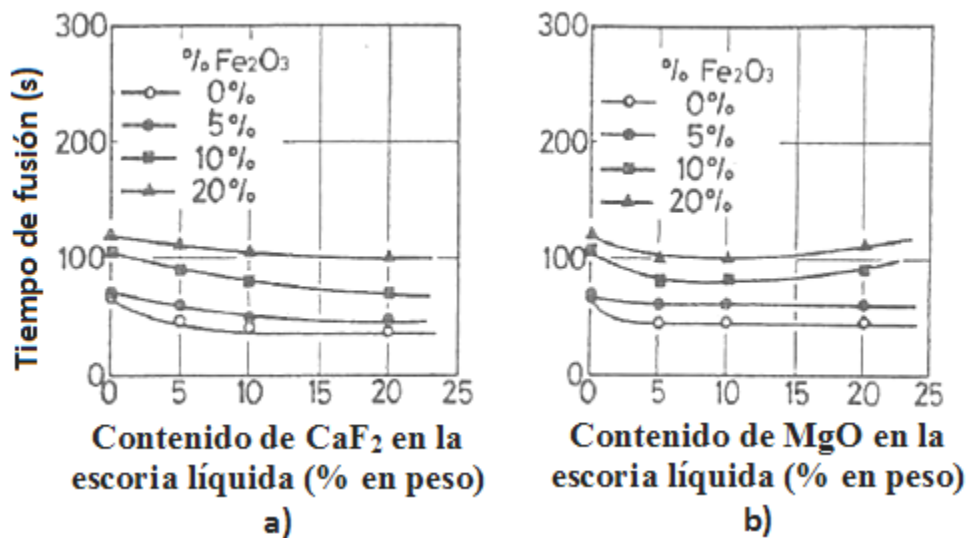


Figura 2.10. Efecto de a)CaF₂ y b)MgO en una escoria con una proporción de 1 de CaO/SiO₂ (15).

2.1.2 Efecto de las propiedades y composición química del hierro de reducción directa durante su fusión en escorias líquidas

En diversos trabajos se ha demostrado que la rapidez de fusión de pelets de hierro de reducción es afectada considerablemente por el contenido de oxígeno residual, el contenido y composición de la ganga de los pelets, el contenido de carbono y la temperatura del baño en caso de ausencia de escoria fundida en el baño.

Sadrnezhaad (16) estudió el efecto de la ganga presente en el HRD respecto al calor necesario adicional para fundir un pelet. Observó que el requerimiento energético para fundir las partículas se incrementa notoriamente conforme aumenta el contenido de ganga en el pelet. En la Figura 2.11 se grafica la cantidad total de calor adicional para fundir el pelet con diferentes contenidos de ganga.

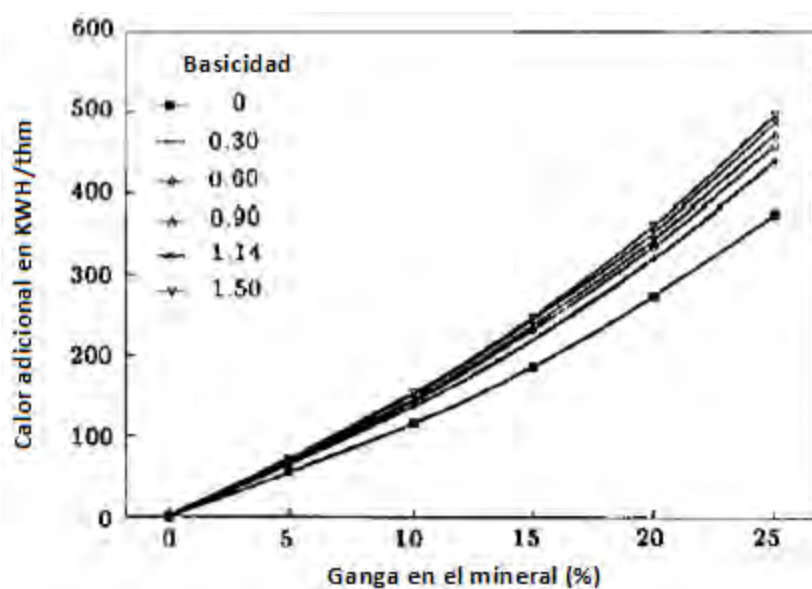


Figura 2.11. Calor adicional requerido para fundir HRD con diferentes contenidos de ganga, las curvas representan diferentes basicidades (relación de CaO/SiO_2) de escoria (16).

El contenido de ganga presente en el pelet influye también en el tiempo de fusión del mismo pelet, Elliot y colaboradores (17) observaron que para cada incremento de 5% de ganga (SiO_2 y Al_2O_3) en el pelet de HRD, la rapidez de fusión de pelets del mismo tamaño con proporciones de oxígeno, carbono y hierro iguales, disminuye cerca de un 7%.

Otras investigaciones similares fueron hechas también por Sato y colaboradores (15), quienes observaron en sus experimentos el efecto de adiciones al pelet de a)escoria profundida, b) SiO_2 y c) Al_2O_3 . Hicieron comparaciones del efecto que producen estas adiciones en la cinética de fusión del pelet de HRD inmerso en un baño de hierro fundido saturado en carbono con escoria y sin escoria. El tiempo requerido para fundir el pelet en el baño de hierro con escoria disminuyó.

El incremento en la velocidad de fusión podría deberse a la disolución de la densa escoria con alto punto de fusión formada en la interfase donde se da la fusión del pelet. Sin embargo, la cantidad de óxido de hierro disuelto en la escoria líquida se incrementó al aumentar la cantidad de estas adiciones. En la Figura 2.12 se observa que el tiempo requerido para fundir un pelet aumenta con estas adiciones (confirmando los reportes de Elliot), se observa también que este aumento en el tiempo de fusión es mayor en el baño de hierro fundido sin escoria que con escoria.

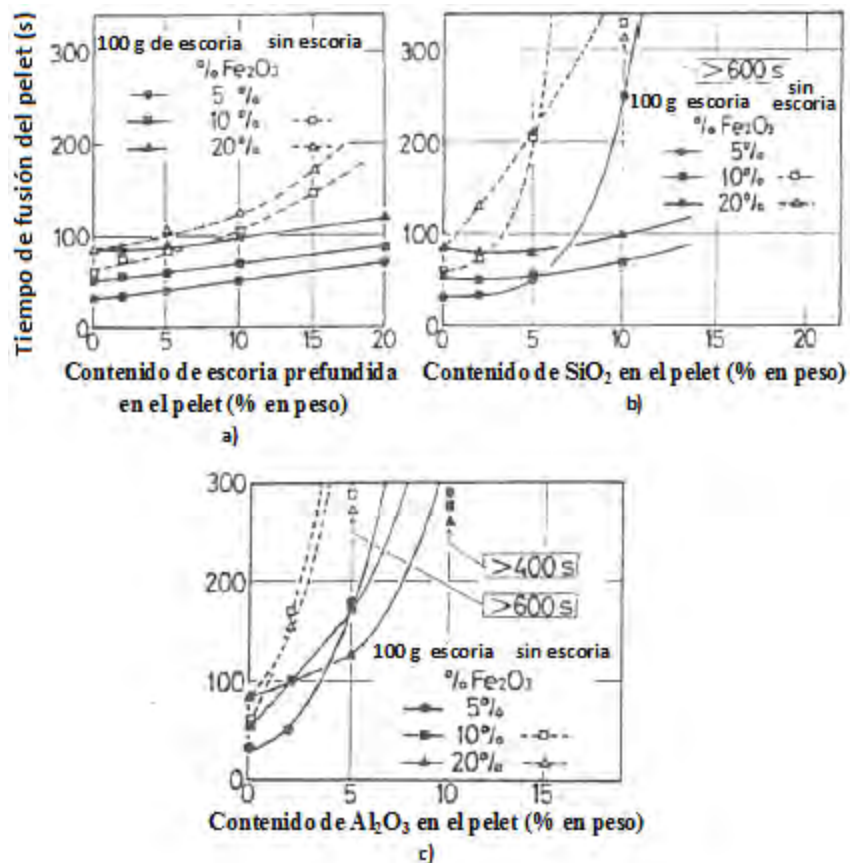


Figura 2.12. Efecto de a) escoria profundida, b) SiO_2 y c) Al_2O_3 contenido en los pelets en el tiempo para su fusión a 1520°C (15).

Sato también estudió el efecto que tiene el contenido de Fe_2O_3 en los pelets al fundirse en la escoria. Observó un descenso en la velocidad de fusión de los pelets con alto contenido de Fe_2O_3 , hecho que atribuyó al cambio de la mojabilidad entre el pelet y la escoria además de la disminución de emisión de gas CO del pelet. La Figura 2.13 muestra el efecto del Fe_2O_3 en la velocidad de fusión del pelet, donde se observa una mayor rapidez de fusión para las pelets con una composición química en el rango de 2 a 10% de Fe_2O_3 .

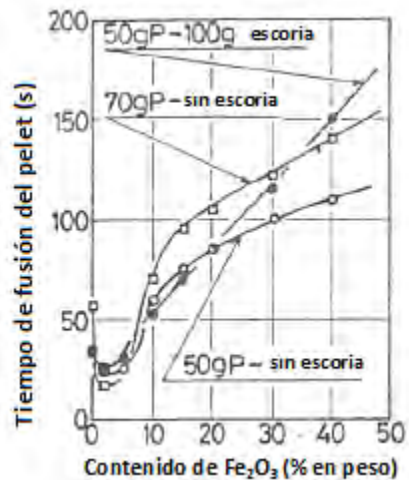


Figura 2.13. Efecto del contenido de Fe_2O_3 en el tiempo requerido para fundir el pelet.

El contenido de Fe_2O_3 tiene un efecto significativo en la relación entre la temperatura y el tiempo de fusión del pelet. Este efecto es más notorio para pelets con Fe_2O_3 que para pelets sin Fe_2O_3 . Esta dependencia entre tiempo y temperatura también se ve afectada por la relación de CaO/SiO_2 de la escoria, sin embargo, para pelets sin Fe_2O_3 el efecto casi no es considerable. La Figura 2.14 muestra esta dependencia donde se utilizaron escorias de diferentes basicidades.

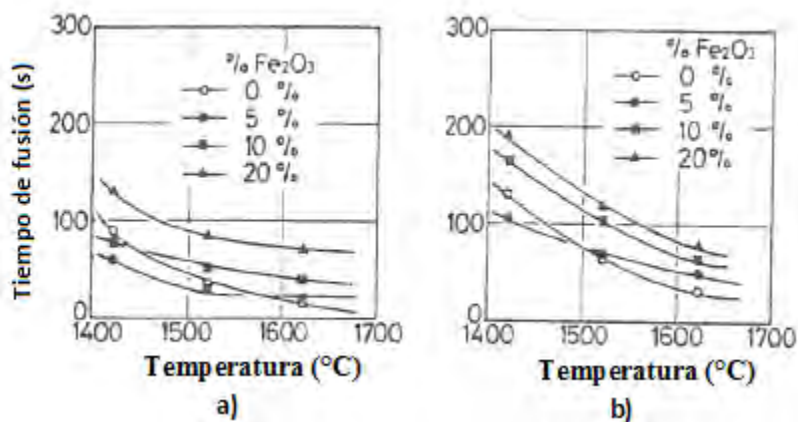


Figura 2.14. Dependencia del tiempo requerido para fundir un pelet inmerso en una escoria con una relación de CaO/SiO_2 de a)1 y b)2 (15).

El efecto que causan otras adiciones en el pelet como a) CaO, b) CaCO₃, c) C y d) fundentes (una adición simultanea de CaO y SiO₂, CaO/SiO₂=1) en el tiempo de fusión de las partículas es pequeño como se ilustra en la Figura 15. En esas figuras se observa un mínimo en el tiempo de fusión del pelet cuando la concentración de cada uno de estos aditivos es de aproximadamente 2%.

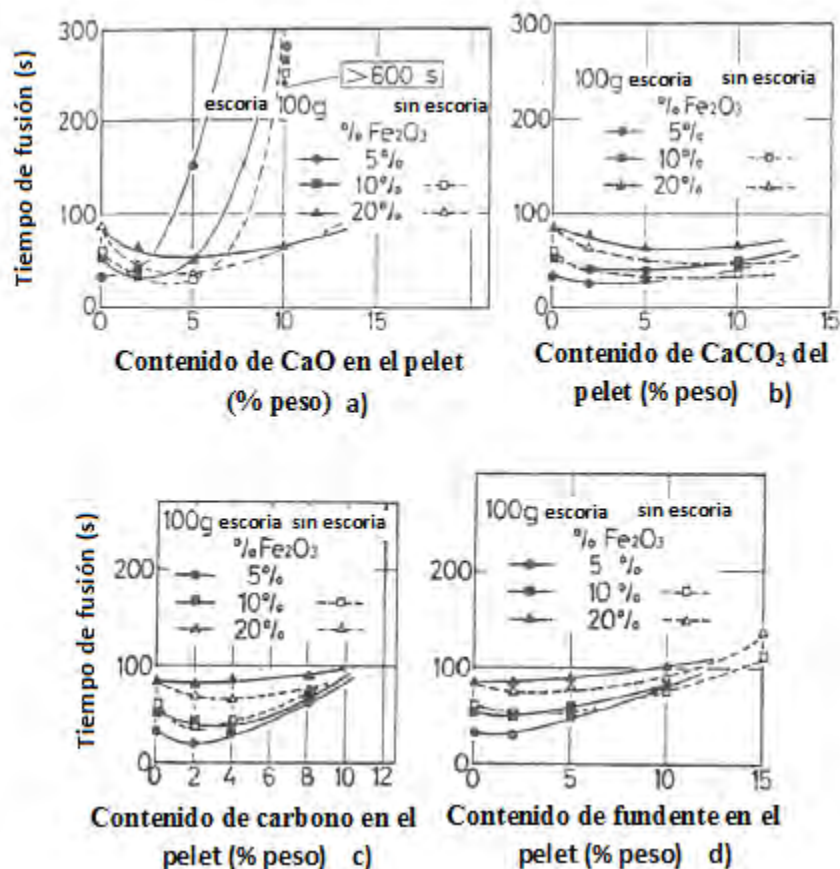


Figura 2.15. Efecto de adiciones de a) CaO, b) CaCO₃, c) C y d) fundentes (una adición simultanea de CaO y SiO₂, CaO/SiO₂=1) en el tiempo de fusión de los pelets de HRD a 1520°C (15).

Como se ha mostrado, la composición química del pelet juega un papel importante para determinar el tiempo de fusión del mismo en la escoria. De manera semejante, las propiedades físicas del pelet (como por ejemplo su tamaño y su densidad) también influyen en la cinética de fusión.

Elliot (12) por su parte obtuvo resultados que muestran que en una escoria con burbujeo vigoroso los tiempos de fusión de los pelets inmersos dependen fuertemente de su tamaño. El incrementar la densidad del material aparentemente no tiene un efecto significativo hasta que se alcanzan valores en el rango de 3 g/cm^3 . Por lo tanto pelets más grandes de aproximadamente 8 mm y densidades iniciales más grandes que la de la escoria burbujeando, tienden a pasar relativamente rápido a la interfase escoria-metal donde pueden fundirse rápidamente, provocando que el baño metálico esté lo suficientemente caliente para completar la fusión del pelet.

Los cálculos de Elliot indicaron que la rapidez de fusión se incrementó para pelets en un rango de metalización de entre 80 y 90%, también se incrementó dicha rapidez con la disminución de su tamaño como se muestra en la Figura 2.16.

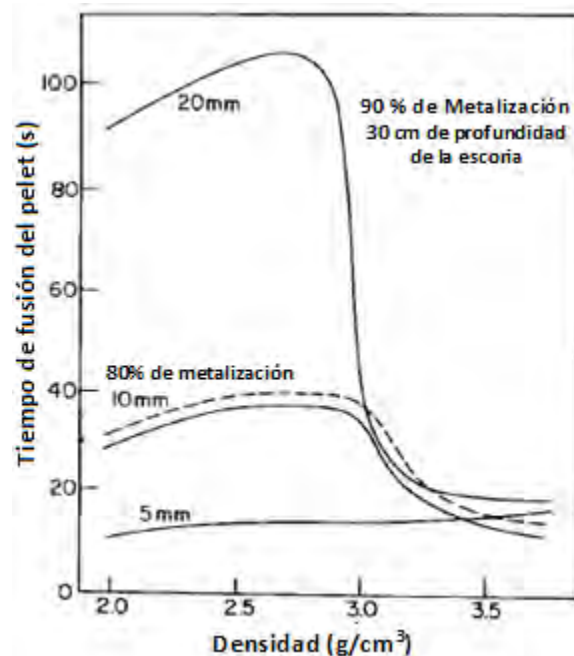


Figura 2.16. Tiempos para la fusión de pelets de reducción directa individuales como función de la densidad, para pelets inmersos en un burbujeo vigoroso, dentro de una escoria líquida caliente a 1600°C en un horno de arco eléctrico (12).

2.2. Fusión de hierro esponja en hierro fundido o en acero líquido

A pesar de que el problema de este trabajo se centra en la fusión de pelets de hierro esponja en una baño de escoria fundida, es importante también estudiar el caso de fusión de estas partículas en un baño de hierro fundido, ya que es en este caso donde más investigaciones se han llevado a cabo, a partir del entendimiento de los modelos ya desarrollados en este campo se podría construir una analogía para de la fusión de hierro esponja en escorias del horno de arco eléctrico.

De acuerdo a Sato et al (15), la disolución de un pelet en acero líquido es un proceso complejo debido a la interacción de diferentes fenómenos físico-químicos. De acuerdo a su análisis existen cuatro principales etapas durante el proceso de fusión:

1. Transferencia de calor del baño al pelet.
2. Transferencia de carbono del hierro fundido a la interfase de fusión.
3. Transferencia de hierro del pelet hacia el baño.
4. Reducción de óxidos de hierro en el pelet por carbono en el baño.

Sato estudió la rapidez de fusión de pelets en un baño de hierro fundido saturado en carbono. De acuerdo a su trabajo la rapidez de fusión de los pelets se favoreció incrementando: el contenido de carbono en el baño metálico, el contenido de carbono en el pelet y el oxígeno residual presente en el pelet. La rapidez de fusión se determinó midiendo la cantidad de CO producido por la reducción de los óxidos de hierro del pelet por el carbón presente en el baño metálico.

La Figura 2.13 muestra el efecto del Fe_2O_3 contenido en los pelets sobre la rapidez de fusión en un baño de hierro fundido saturado en carbono a 1520°C . La Figura 2.17 muestra la dependencia del tiempo de fusión de pelets con diferentes concentraciones de Fe_2O_3 respecto a la temperatura del baño metálico saturado en carbono. Se observa que conforme aumenta la temperatura aumenta también la rapidez de fusión y conforme aumenta el contenido de Fe_2O_3 en el pelet disminuye la rapidez de fusión.

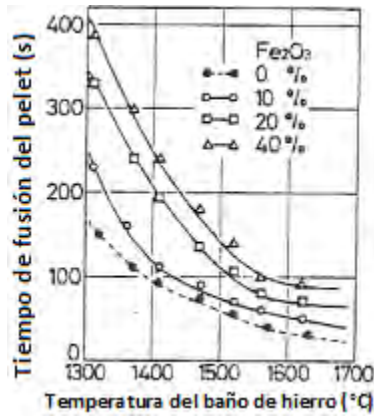


Figura 2.17. Dependencia de la temperatura y el tiempo de fusión de un pelet con diferentes contenidos de Fe₂O₃ inmerso en un baño de hierro fundido saturado en carbono (18).

La Figura 2.18 muestra la dependencia del tiempo necesario para fundir un pelet con diferentes concentraciones de carbono en el baño de hierro fundido a 1520°C y con pelets con diferentes contenidos de Fe₂O₃. La velocidad de fusión de los pelets sin Fe₂O₃ incrementó conforme aumentó el contenido de carbono en el baño, pero las rapidezces de fusión de los pelets con un contenido de 10, 20 y 40% de Fe₂O₃ mostraron un máximo alrededor de 3.3, 3.0 y 2.5% de carbono, respectivamente (18).

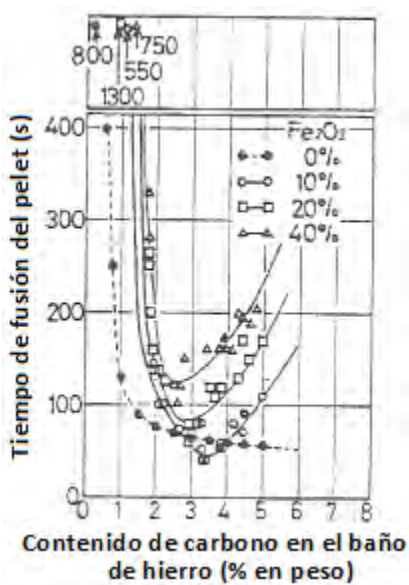
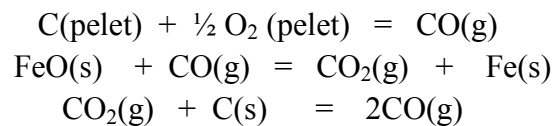


Figura 2.18. Dependencia del tiempo de fusión del pelet con diferentes concentraciones de Fe₂O₃ de acuerdo al contenido de carbono en el baño metálico (18).

Analizando las 4 etapas propuestas por Sato, Seaton y colaboradores (19) estudiaron la fusión de pelets de HyL, Midrex y Sartejans en acero líquido, su modelo se basó en las etapas 1 y 3 propuestas por Sato, sin embargo, los pelets utilizados fueron de un contenido de carbono más alto que el contenido de carbono del baño de acero, por lo tanto, en la etapa 2, Seaton supuso que debería de ser reversible y la interacción entre óxidos de hierro y carbono del mismo pelet debería de ser mas fuerte que la interacción de estos óxidos con el carbono contenido en el baño de acero.

Bajo condiciones experimentales en este trabajo, los aspectos más influyentes del proceso de fusión del pelet, son las interacciones químicas dentro del pelet y en la interfase pelet - baño de acero. Basado en sus observaciones y en otras investigaciones, es posible considerar dos mecanismos importantes para la generación de gases en el pelet, estos son:

- 1) Reacciones químicas entre el grafito o carbono depositado en la superficie de los granos del pelet con oxígeno atrapado dentro de los pelets para producir principalmente CO. Este CO podría reaccionar con el óxido de hierro reduciéndolo y generando CO₂. Por lo tanto las siguientes reacciones son posibles:



- 2) Reacciones químicas entre el carbono del pelet y el oxígeno disuelto en el baño para producir CO.

Los resultados de Seaton difieren de los de Elliot. Elliot supuso la presencia de cementita durante la reducción hierro esponja en la escoria, mientras que Seaton comprobó por medio de microscopia electrónica Auger la ausencia de esta fase. Sin embargo, hay que considerar que la composición química de los pelets utilizados en cada investigación es diferente. Además, el fenómeno de la reducción de los óxidos de hierro se da en un ambiente químico muy diferente como lo es el baño de acero y la escoria.

Finalmente los resultados de Seaton indicaban que el tiempo de fusión del pelet HyL y el Midrex es de 15 y 25 segundos respectivamente, mientras que el tiempo del pelet de Sartejans tomó de 25 a 70 segundos en fundirse.

Estudios similares fueron realizados por Ramírez y colaboradores (20), quienes elaboraron un modelo matemático donde se evaluó la velocidad de fusión de HRD en un horno de arco eléctrico trifásico. De acuerdo a su modelo, el tamaño de la partícula aumenta 41% al entrar en contacto con el acero líquido independientemente de la cantidad de calor que se le suministre al baño con los arcos eléctricos. El modelo predice un tiempo

de fusión de aproximadamente 13 segundos para una partícula de un tamaño inicial de 12 mm. El grosor de la capa sólida es de aproximadamente 5 mm y le toma cerca de 6 segundos refundirse. La Figura 2.19 describe el crecimiento de la capa sólida de acero que aparece alrededor del pelet tan pronto como entra en contacto con el baño metálico.

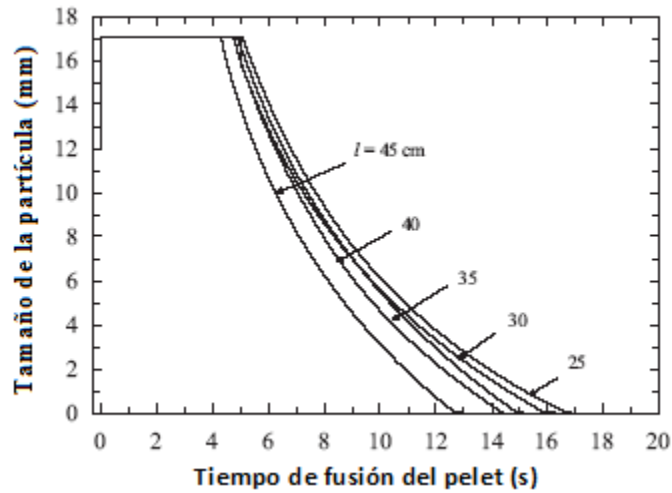


Figura 2.19. Coraza solidificada en la periferia del pelet de HRD y tiempo de fusión (20).

La Figura 2.20 muestra el crecimiento de la coraza sólida de varias partículas de diferentes tamaños iniciales de partícula y para una longitud de arco de 45 cm. Se observa que conforme el tamaño inicial de la partícula se incrementa, aumenta también el grosor de la coraza sólida, y consecuentemente la velocidad de fusión decrece. Partículas más grandes requieren tiempos de refusión más grandes también.

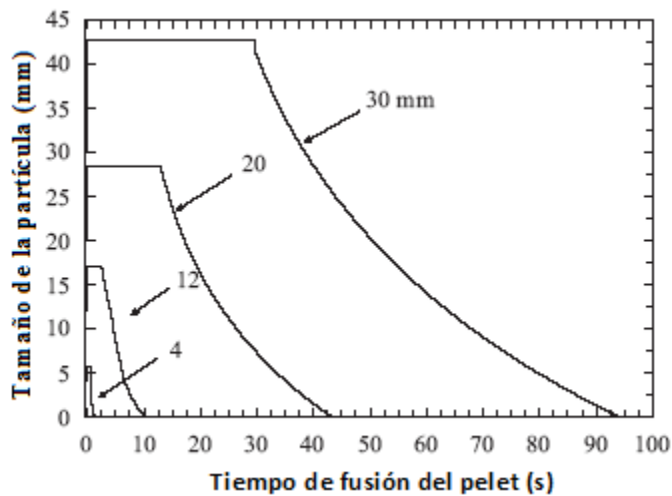


Figura 2.20. Velocidad de fusión en función del tamaño inicial de la partícula (20).

Los resultados indicaron que el tiempo de fusión para una partícula de 10 mm es de solo 15 segundos. Elliot en sus experimentos calculó un tiempo de fusión de 35 segundos para una partícula del mismo tamaño. Esta diferencia puede ser fácilmente explicada debido a la alta conductividad térmica del acero en comparación con la escoria, además también se observó que el tiempo de fusión para refundir la coraza sólida es más pequeño en comparación con el tiempo que le toma en fundir al centro de la partícula, lo que puede ser explicado en términos de las diferencias de masas involucradas.

Erich y colaboradores (21), estudiaron la cinética de fusión de hierro esponja de manera experimental y analítica. Sus experimentos consistieron en fundir hierro esponja en hierro puro y en mismo hierro esponja, así como hierro en hierro. En su modelo suponen la formación de la coraza sólida de metal solidificado en la periferia del pelet. Para el caso de fusión de hierro esponja en hierro puro se reportó que el tiempo de fusión de una partícula de hierro esponja de 10 mm de diámetro es de 9, 14 y 24 segundos para las temperaturas de 1650, 1600 y 1570°C respectivamente como se muestra en la Figura 2.21.a. Se observa que conforme aumenta la temperatura del baño metálico el tiempo de fusión de la partícula disminuye.

Otro aspecto importante en su investigación es el efecto de la temperatura inicial del hierro esponja en el tiempo de fusión. La Figura 2.21.b muestra que mientras mayor grande sea la temperatura inicial de la partícula el tiempo de fusión disminuye; para el pelet inicialmente a temperatura ambiente el tiempo de fusión es de aproximadamente 14 segundos, mientras que es de 9 segundos para partículas alimentadas a 1000°C.

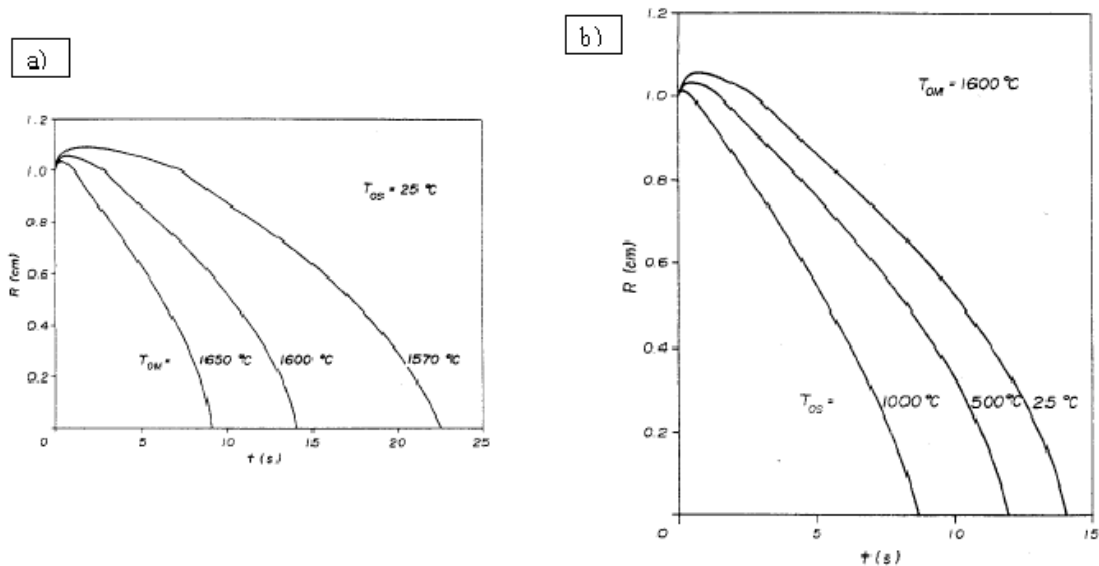


Figura 2.21. a) Radios de la partícula de hierro esponja a diferentes temperaturas del baño. b) Variación del radio de la partícula sumergida en acero líquido a 1600°C en función del tiempo y temperatura inicial de la partícula (21).

Para el caso de fusión de hierro esponja en mismo hierro esponja (22), se observó que el tiempo de fusión de las partículas es muy similar al caso de fusión en hierro, sin embargo, como se puede observar en la Figura 2.22 el tiempo de fusión es menor para el caso de fusión en mismo hierro esponja. Modelar un fenómeno de solidificación y fusión de una coraza de diferentes propiedades a las del hierro esponja requiere un modelo matemático más complejo puesto que la conductividad térmica en la interfase hierro esponja-coraza no está bien definida y requiere satisfacer la continuidad de flujo de calor y de temperaturas en esa interfase.

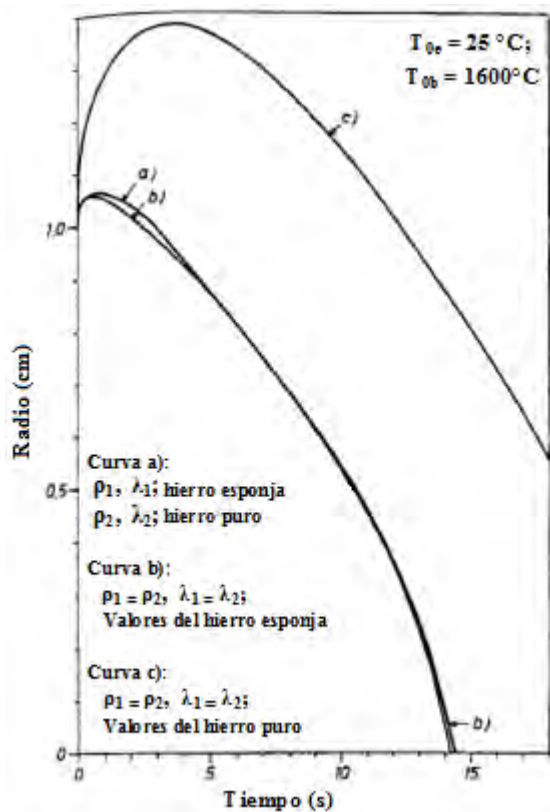


Figura 2.22. Resultados de los cálculos obtenidos para fusión de pellets en un baño metálico de su misma composición (curvas b y c) en comparación con los obtenidos de fundir el pellet en un baño de diferentes propiedades (curva a) (21).

Otro trabajo similar fue realizado por Zhang (23), quien también realizó un modelo matemático para predecir el tiempo de fusión de hierro esponja sumergido en un baño de acero líquido. Al igual que los modelos anteriores se tomó en cuenta la capa de hierro solidificada en la superficie de las partículas esféricas. Zhang hace énfasis en la importancia del número de Biot durante la fusión de las partículas. Al resolver las ecuaciones de Fourier analíticamente se obtuvieron tiempos de fusión de alrededor de 25 segundos para partículas de hierro puro a inmersas a temperatura ambiente. Si la partícula se precalienta el tiempo de fusión disminuye como se observa en la Figura 2.23.a. La Figura 2.23.b. muestra el efecto de la temperatura del baño de hierro sobre el tiempo de fusión de la partícula. Se observa que a menor temperatura del baño de hierro el tiempo de fusión de la partícula aumenta.

Este investigador estudió también la influencia del número de Nusselt. La Figura 2.23.c muestra que mientras más pequeño sea este valor, el tiempo de fusión disminuye. Además se estudió el efecto de la velocidad de la partícula sobre el tiempo de fusión como lo muestra la Figura 2.23.d, en donde se observa que a menor velocidad de las partículas los tiempos de fusión son mayores.

Finalmente, se realizaron los mismos experimentos con partículas con un contenido del 2% de carbono y se observó que las partículas fundían más rápidamente. Para partículas alimentadas a temperatura ambiente, el tiempo de fusión fue de aproximadamente 15 segundos y 10 segundos para partículas con una mayor temperatura inicial. Esto concuerda con el análisis de Sato (15) acerca del efecto de la saturación del baño con carbono.

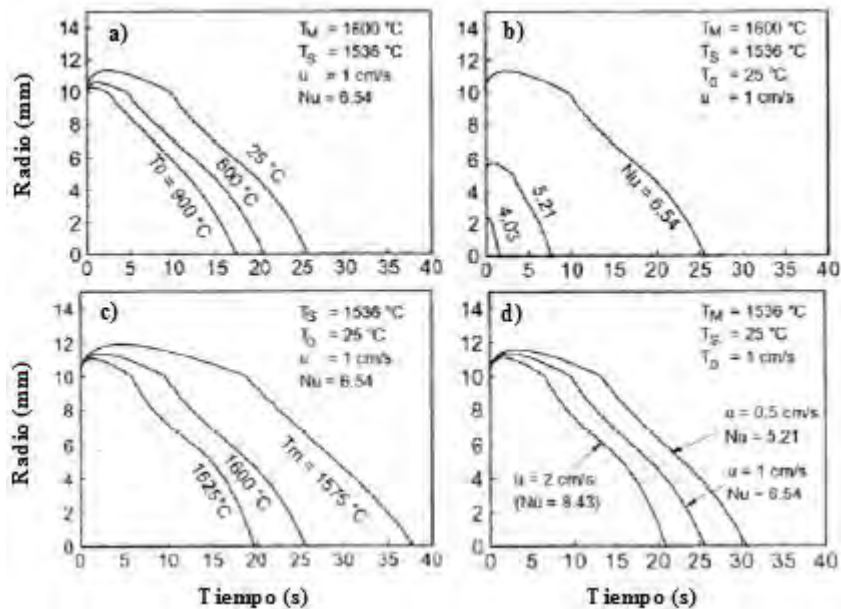


Figura 2.23. Cinética de fusión del hierro esponja en acero líquido puro.

Otro aspecto muy importante de estudiar en la fusión de pelets es la transferencia de calor por convección ya sea esta natural o forzada. Guthrie y colaboradores (24), elaboraron un modelo de transferencia de calor para obtener los tiempos de fusión de esferas de hierro de varios tamaños. En su trabajo ellos analizaron los efectos que causan en la cinética de disolución el tamaño de la esfera, las propiedades térmicas, el precalentamiento, el punto de fusión del pelet y la temperatura del baño. Encontraron que incluso en la ausencia de corrientes de convección forzada, las corrientes de convección térmica generadas por el proceso de fusión pueden jugar un papel muy importante en determinar las rapidezces de fusión, especialmente para adiciones de gran tamaño.

La medición de la velocidad de fusión de la esfera de hierro se llevó a cabo sumergiendo las esferas en un baño estacionario sin agitación. El primer objetivo fue demostrar que las velocidades de fusión son considerablemente más grandes que las que predicen el modelo debido a las corrientes de convección natural en la interfase de fusión. En la Figura 2.24 se comparan los resultados que predice el modelo con los obtenidos experimentalmente. Como se puede ver, las curvas experimentales de fusión son similares a las calculadas por el modelo en ambos casos, pero los tiempos de fusión determinados experimentalmente son aproximadamente 25% menores que los calculados. Esto demuestra que la transferencia de calor por convección natural es importante para determinar la rapidez fusión de las esferas de hierro.

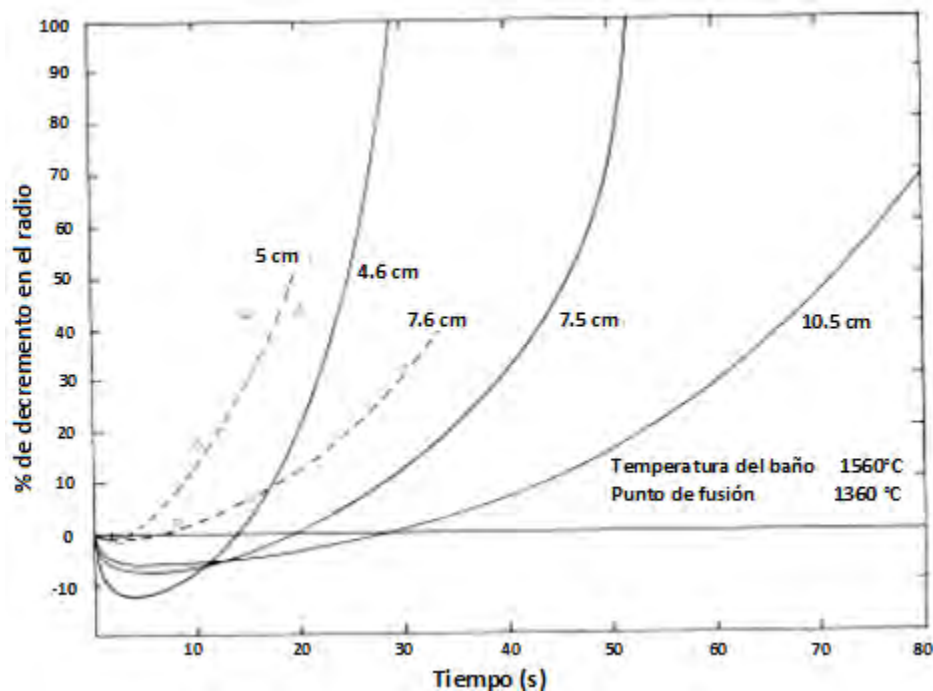


Figura 2.24. Cambio de radio (%) predicho y experimental con el tiempo, para esferas de varios diámetros (curvas experimentales ---, curvas predichas por el modelo —) (24).

Los tiempos requeridos para completar la fusión dependen de la combinación de varios factores incluyendo el tamaño de la esfera, altas temperaturas del baño metálico, la temperatura de precalentamiento de la esfera, su punto de fusión y sus propiedades térmicas. Por lo tanto, altas temperaturas de precalentamiento, altas temperaturas en el baño y bajos puntos de fusión llevan a tiempos cortos de fusión y viceversa. Los resultados cuantitativos obtenidos del tiempo de fusión de estos parámetros se observan en las Figuras 2.25, 2.26 y 2.27 respectivamente, para varios tamaños de esferas. En todos los casos, se supone la solidificación y fusión de una coraza de acero del baño metálico en la esfera de hierro.

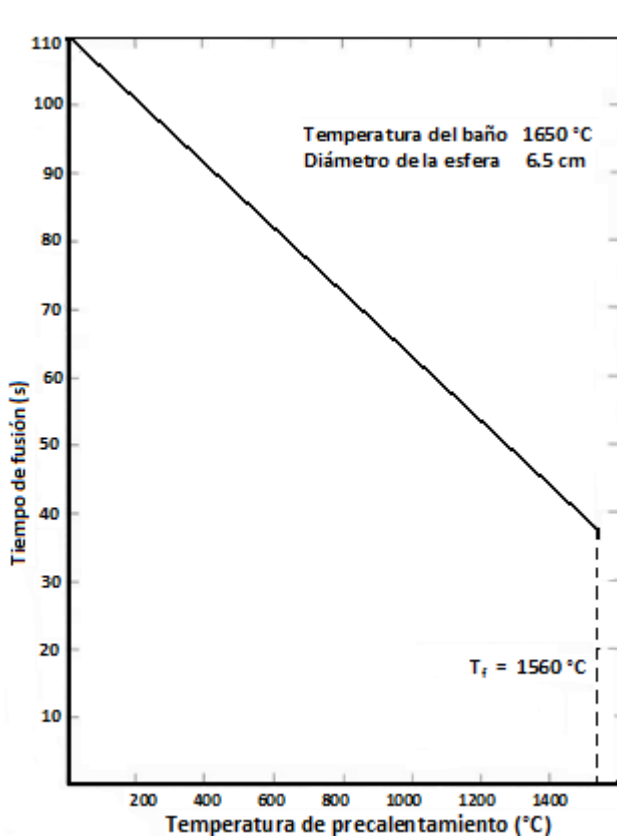


Figura 2.25. Tiempo de fusión contra la temperatura de precalentamiento de una esfera de hierro puro de 6.5 cm de diámetro en un baño estacionario a 1640°C (24).

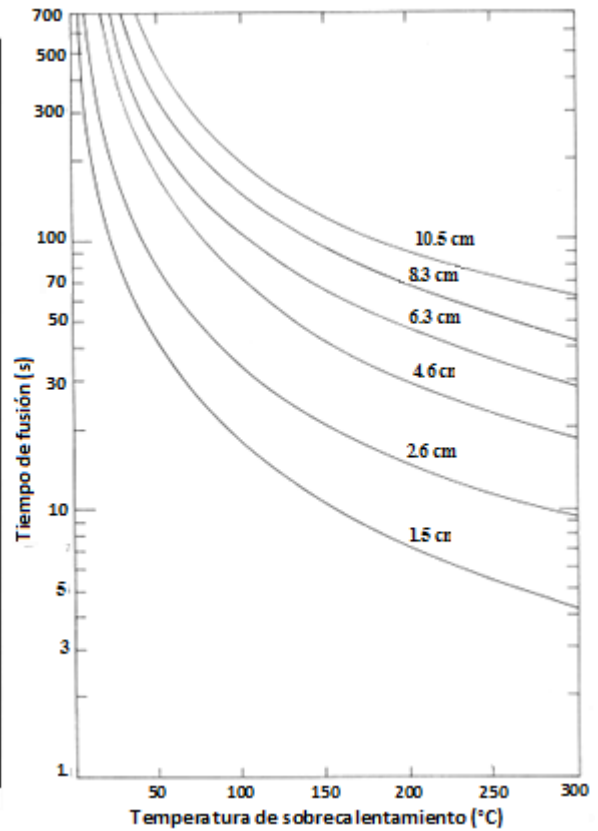


Figura 2.26. Tiempo de fusión calculado contra la temperatura de sobrecalentamiento del baño para esferas de diferentes diámetros inmersas en un baño estacionario (24).

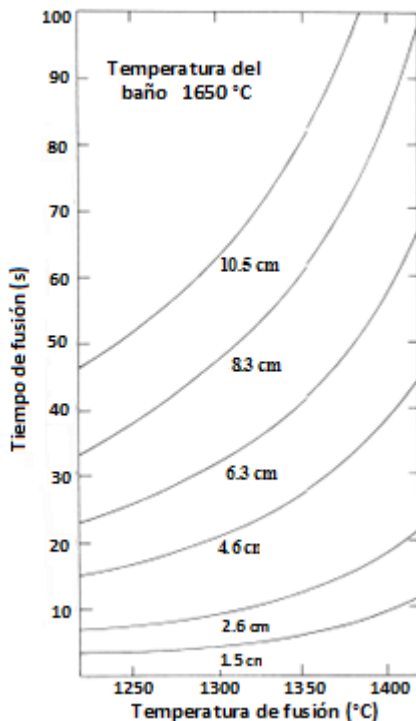


Figura 2.27. Tiempo de fusión calculado contra el punto de fusión de la aleación para esferas de diferentes diámetros inmersas en un baño estacionario a 1560°C (24).

Hasta aquí se han mencionado una serie de investigaciones acerca de la fusión de partículas metálicas en baños metálicos quiescentes, es decir sin agitación. Sin embargo el estudio de la fusión de partículas en baños agitados es también importante. Reza y colaboradores (25), desarrollaron un modelo de flujo de fluidos y transferencia de calor para analizar la fusión de un pelet de HRD en un baño de acero agitado con gas inerte. Este modelo tiene la particularidad de que no considera la etapa de solidificación y fusión de la coraza de acero en la periferia del pelet. Según Reza, debido a la vigorosa agitación del baño metálico la etapa de formación y fusión de la coraza de acero es despreciable, ofrece una explicación al afirmar que debido a las condiciones de agitación el número de Nusselt aumenta considerablemente y por lo tanto se puede ignorar esta etapa ya que de acuerdo con Engh (26) el periodo de solidificación y fusión de la coraza disminuye conforme aumentan el número de Nusselt y la temperatura del baño metálico.

Es predecible que la rapidez de fusión del pelet inmerso en un baño metálico con agitación sea considerablemente más grande que en un baño quiescente, esto se debe al alto coeficiente de transferencia de calor entre la partícula y el baño metálico con agitación. En la Figura 2.28 se presentan la rapidez de fusión de un pelet de HRD en un baño de acero líquido agitado con argón y la correspondiente a un baño sin agitación; se puede observar que un pelet con las mismas características físicas y químicas funde casi 10 segundos más rápidamente en un baño agitado por gas que en un baño sin agitación.

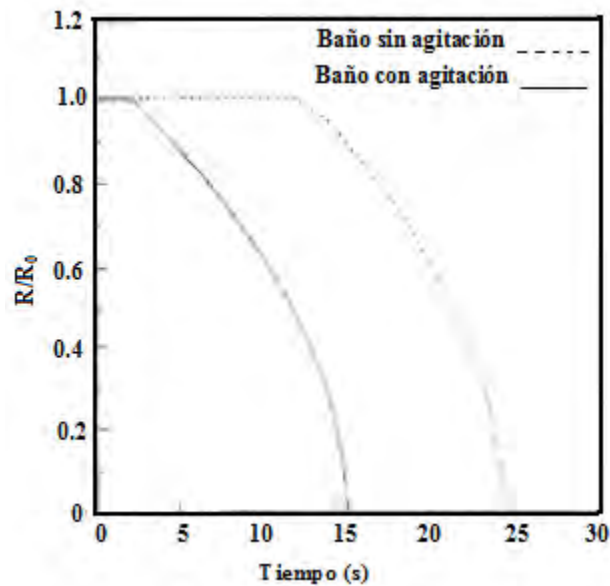


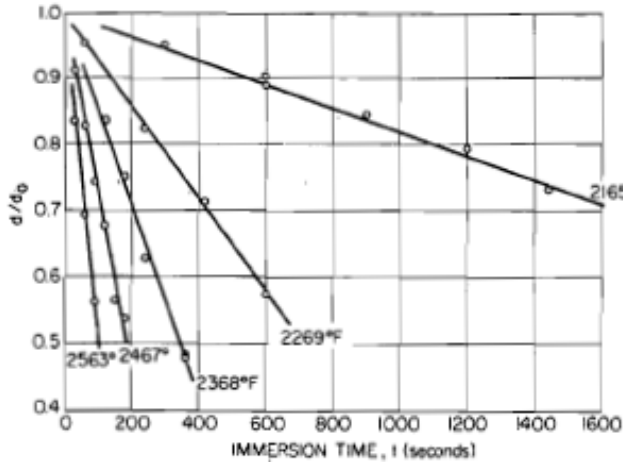
Figura 2.28. Efecto de la agitación del baño metálico en la fusión de pelets de HRD en un baño de acero líquido (25).

En los trabajos anteriores se pondera la importancia del estudio del flujo de fluidos y la transferencia de calor para comprender el fenómeno de fusión de una partícula metálica en hierro fundido, en acero o en escoria, sin embargo, el estudio de este fenómeno requiere un análisis más completo que incluya fenómenos que involucren no solo flujo de fluidos y transferencia de calor si no también fenómenos de transferencia de masa.

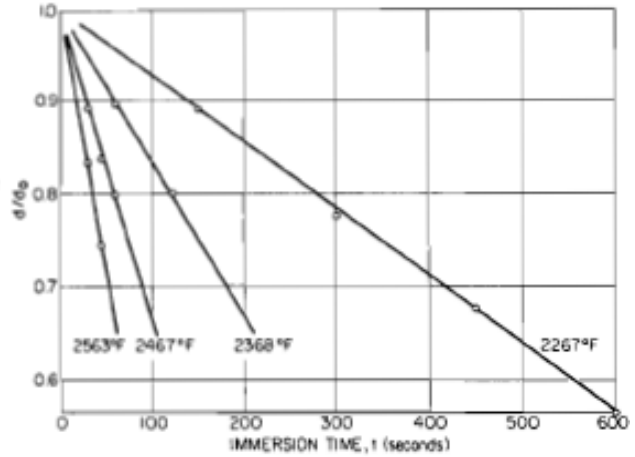
Cuando una aleación sólida de hierro-carbono entra en contacto con un baño líquido de metal fundido de otra aleación de hierro-carbono de mayor contenido de carbono, los átomos de carbono se difunden desde el baño líquido hacia la superficie del sólido, disminuyendo el punto de fusión del sólido en la interfase y las reacciones de transformación de fases en la superficie se llevan a cabo con la absorción de las energías de reacción.

Pehlke y colaboradores (27) estudiaron la rapidez de disolución de piezas cilíndricas de hierro puro y de diferentes aceros en un baño metálico de acero bajo condiciones "isotérmicas". En su trabajo la disolución de las piezas cilíndricas resultó ser función de la temperatura, el contenido de carbono y las condiciones fluidinámicas del sistema (agitación). Diferentes especímenes de hierro puro y de acero fueron calentados hasta la temperatura del baño de metal fundido y posteriormente sumergidos en él. Estos experimentos fueron hechos tanto en condición estática como en rotación del espécimen de hasta 1800 rpm. Los datos experimentales fueron ajustados con correlaciones adimensionales de transferencia de masa para un cilindro vertical, en reposo y girando. Cuando el espécimen estuvo estacionario, la transferencia de masa fue dominada por la convección natural del baño líquido, mientras que cuando el espécimen se mantuvo girando, la convección forzada prevaleció y controló la velocidad de transferencia de masa.

Según Pehlke la velocidad de disolución bajo condiciones isotérmicas depende de las concentraciones de carbono tanto en el sólido como en el líquido, también depende de las condiciones fluidinámicas del sistema dado que dichas condiciones determinan el coeficiente de transferencia de masa. La Figura 2.29 muestra como el diámetro de un cilindro de hierro puro a) y de acero b) decrece linealmente con el tiempo de inmersión, la rapidez de disolución es constante para condiciones isotérmicas. También se observa que la rapidez de disolución es más lenta en hierro puro que en el acero. Donde d_0 es el diámetro del cilindro en el tiempo $t = 0$ y d es el diámetro en el tiempo t .



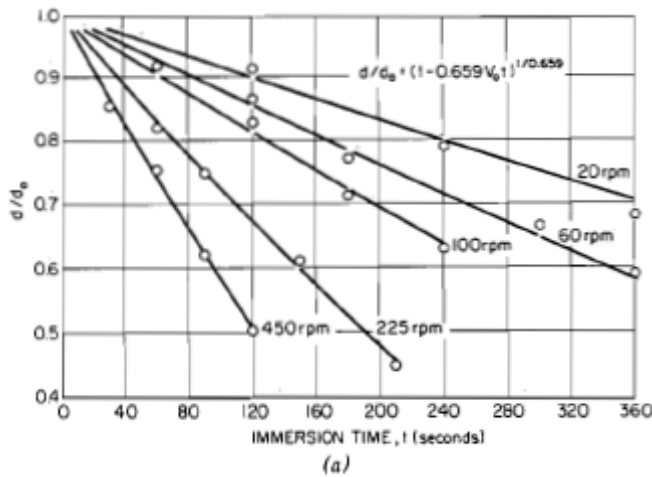
a)



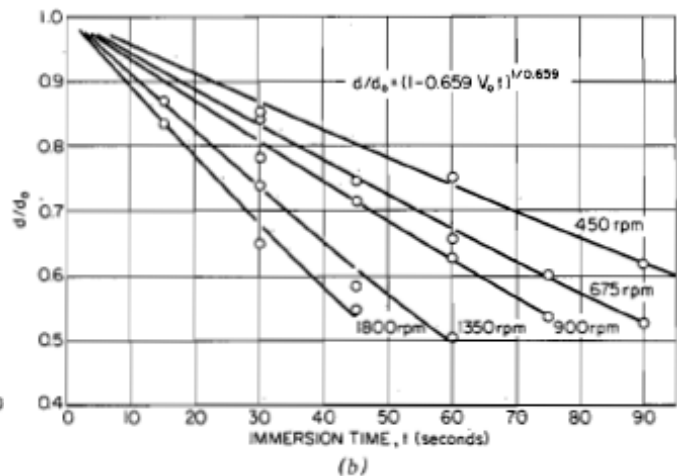
b)

Figura 2.29. Disolución de a) hierro puro y b) acero 1045 en condición estática y en un baño de hierro saturado de carbono. Donde d_0 es el diámetro del cilindro en el tiempo $t = 0$ y d es el diámetro en el tiempo t (27).

Por otro lado bajo condiciones de rotación del espécimen la rapidez de disolución aumenta notoriamente como se observa en la Figura 2.30, para un cilindro de hierro puro agitado desde 450 rpm hasta 1800 rpm en un baño de hierro fundido saturado en carbono. Se observa que entre más rápido gira el cilindro en el baño mayor es la rapidez de disolución.



(a)



(b)

Figura 2.30. Disolución en rotación de hierro puro en un baño líquido de hierro saturado en carbón a 2278°F para diversos valores de la velocidad de rotación (en rpm). Donde d_0 es el diámetro del cilindro en el tiempo $t = 0$ y d es el diámetro en el tiempo t (27).

En resumen, bajo condiciones isotérmicas (inmersión del cilindro a la misma temperatura del baño), la disolución de las piezas metálicas está controlada por la difusión del carbono a la interfase del cilindro lo cual baja el punto de fusión de la aleación debido a un incremento instantáneo en la composición de carbono en la superficie del sólido provocando que la composición de la superficie se desplace hacia la derecha del diagrama hierro-carbono antes del punto eutéctico y consecuentemente baje el punto de fusión la aleación.

Pehlke y colaboradores (28) en otro de sus trabajos repiten sus experimentos pero ahora bajo condiciones "no isotérmicas", es decir cilindros de hierro puro precalentados a varias temperaturas por debajo de la temperatura del baño. Evaluaron los efectos de transferencia de calor incluyendo la costra metálica solidificada en la superficie del sólido que posteriormente se funde de nuevo y desarrollaron un modelo analítico del proceso que posteriormente validaron con los resultados obtenidos experimentalmente.

De acuerdo con los resultados obtenidos se concluyó que en la disolución de los cilindros de hierro puro en el baño de hierro líquido saturado con carbono, la transferencia de calor es importante, mientras que el efecto producido por la difusión del carbono es insignificante en la etapa de formación de la coraza de acero solidificada en la superficie del cilindro. El periodo de transición de solidificación y fusión a disolución es muy corto como se muestra en la Figura 2.31; después de los 20 segundos se observa que ha comenzado la etapa de disolución isotérmica donde solo es necesario calor latente suministrado por el baño metálico hasta fundir completamente el espécimen.

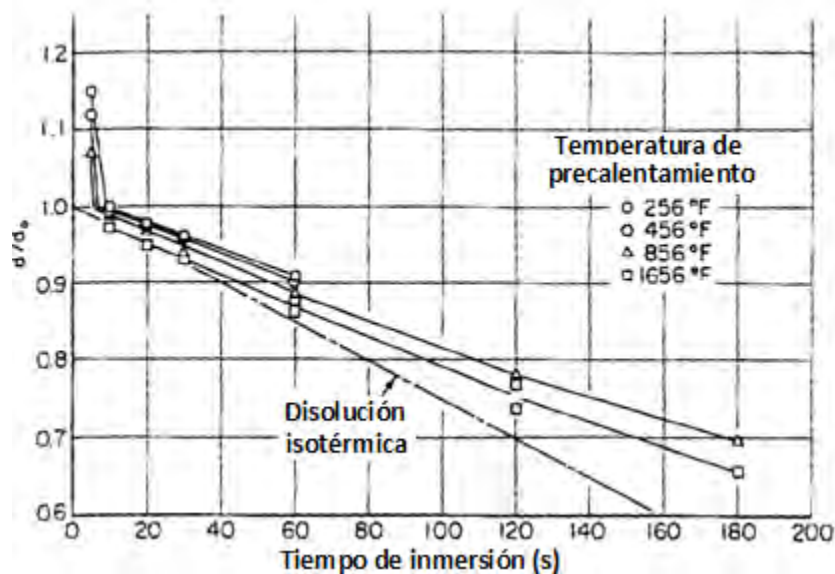


Figura 2.31. Disolución no isotérmica de hierro puro en un baño líquido de hierro saturado en carbono a 2448°F. Donde d_0 es el diámetro del cilindro en el tiempo $t = 0$ y d es el diámetro en el tiempo t . (28).

La Figura 2.32 muestra el radio adimensional, $F(\tau)$, contra el tiempo t en segundos, calculado por el modelo junto con los datos experimentales obtenidos para 5 segundos y diferentes condiciones de precalentamientos del cilindro. Se observa que el grosor de la coraza llega a un máximo y después se funde de nuevo gradualmente.

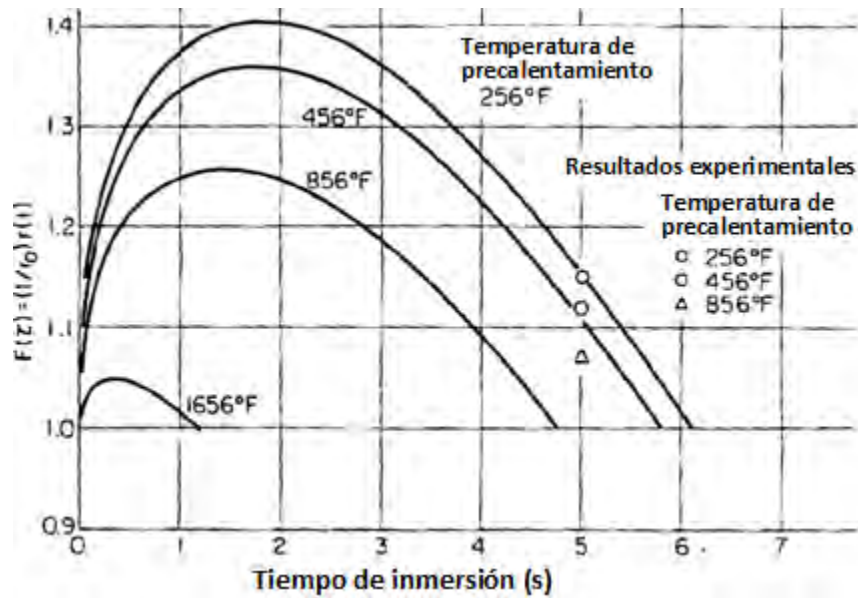


Figura 2.32. Formación de coraza y fusión de un cilindro de media pulgada de diámetro de hierro puro a diferentes temperaturas de precalentamiento inmerso en un baño de hierro saturado en carbono a 2448°F (28).

Las distribuciones de temperatura radial para las temperaturas de precalentamiento de a) 256 y b) 856°F se muestran en la Figura 2.33.

Para el caso de fusión de hierro esponja en escoria de este trabajo, el fenómeno de disolución no es considerado, ya que las adiciones que tienen mayor punto de fusión que el punto de fusión del baño se disuelven, mientras que las adiciones que tienen menor punto de fusión que el baño se funden. Debido a que el hierro esponja tiene menor temperatura de fusión que la escoria, para la elaboración de este modelo se desprecia el fenómeno de disolución y de transporte de masa.

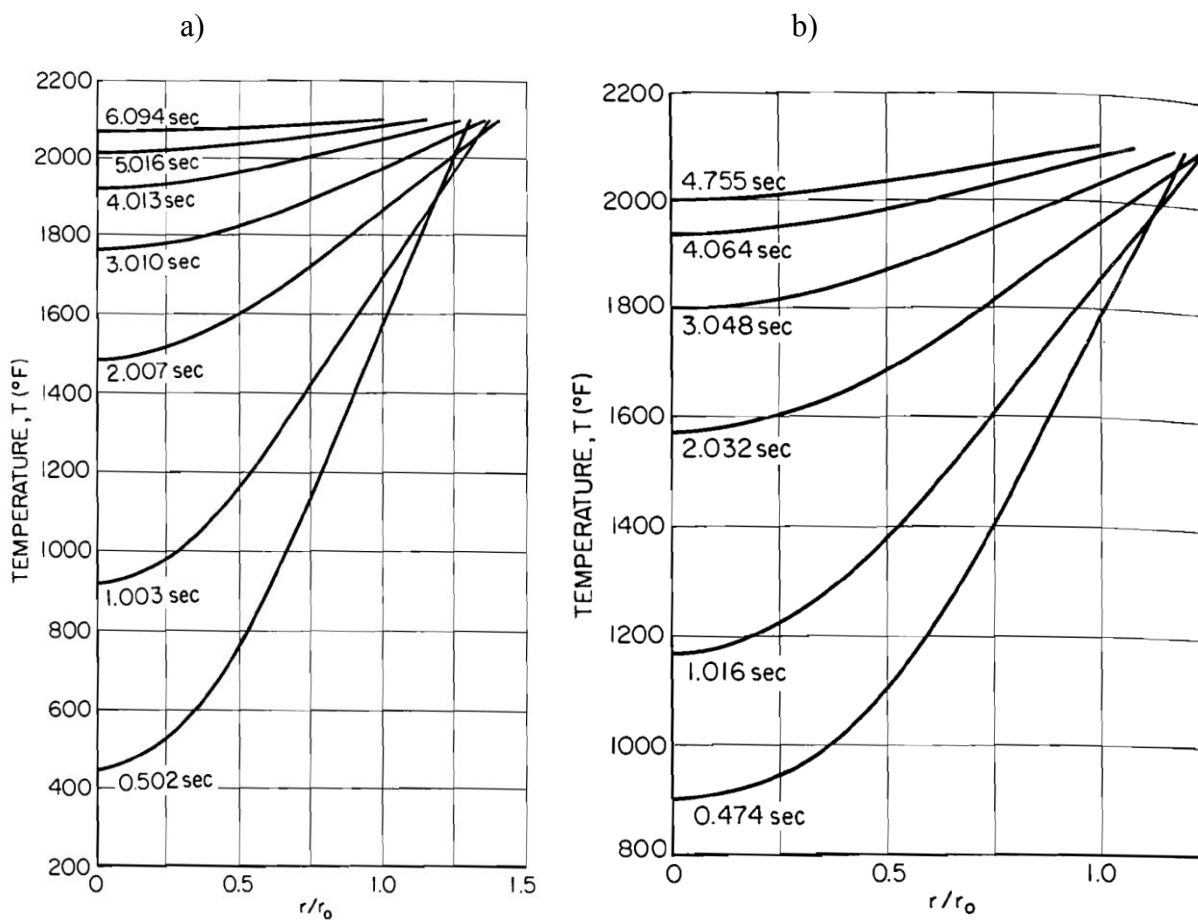


Figura 2.33. Distribución de temperatura radial para un cilindro de hierro puro inmerso en un baño de hierro fundido saturado en carbono a 2448°C con temperaturas de precalentamiento de a) 256 y b) 856°F (28).

2.3 Fusión de partículas no ferrosas en baños líquidos no ferrosos.

Las investigaciones realizadas acerca de la fusión de partículas metálicas no ferrosas en baños fundidos no ferrosos son de gran utilidad para estudiar la fusión de hierro esponja en escoria, puesto que muchos de los fenómenos de transporte que ocurren en el proceso son análogos, a tal grado que los modelos matemáticos desarrollados podrían utilizarse para el caso de fusión de HRD en escoria con simplemente cambiar las propiedades físicas y químicas del material así como del medio en que es fundido.

Un modelo muy similar al de Ehrich fue desarrollado por Taniguchi y colaboradores (29), quienes estudiaron la fusión de esferas de aluminio en baños fundidos de mismo aluminio y de otra aleación de aluminio-silicio. Sus experimentos fueron realizados en condiciones de reposo y de agitación del baño. La agitación se logró con inyección de gas argón con flujos que oscilaron en promedio entre 0.059 y 0.53 NI/min. Este modelo se basa en resolver las ecuaciones de transferencia de calor y de masa por diferencias finitas, también hace un análisis matemático para determinar los valores de los coeficientes de transferencia de masa y de calor.

De acuerdo con sus observaciones, la fusión de una esfera de aluminio en un baño de aluminio fundido está controlada por el proceso de transferencia de calor, mientras que para el caso de fusión de aluminio en un baño de aleación aluminio-silicio fundido, el proceso de fusión está asociado con el cambio de concentración en el baño en la periferia de la esfera, por lo tanto, este proceso involucra transferencia de masa además de transferencia de calor.

Para el caso de fusión de aluminio en mismo aluminio fundido la variación del radio de la esfera en condiciones de inmersión con y sin agitación se muestra en la Figura 2.34. Se observa en la Figura 2.34a) que el tiempo de fusión es más grande para el caso de un baño sin reposo puesto que el proceso de fusión está gobernado solamente por la transferencia de calor dada por convección natural mientras que para el caso de agitación con inyección argón (Figura 2.32b)) el proceso de transferencia de calor está controlado por convección forzada.

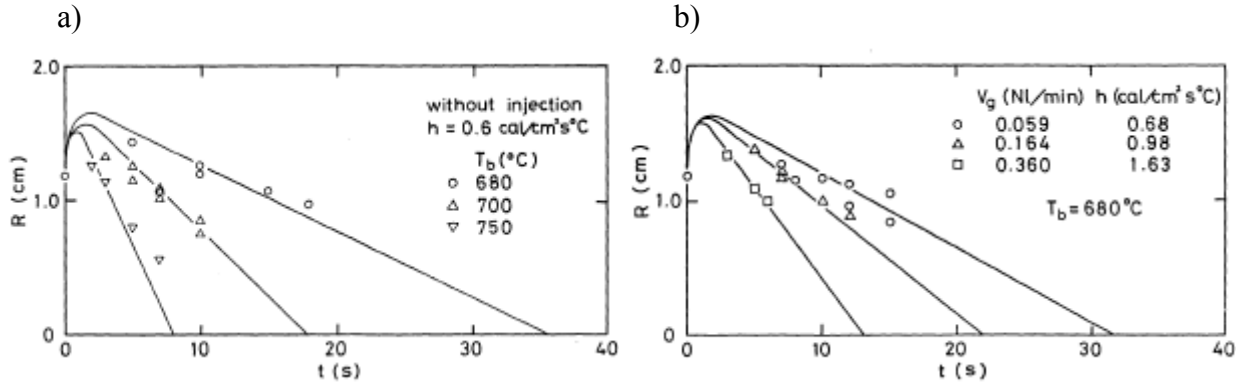


Figura 2.34. Variación del radio de la esfera con el tiempo, las líneas sólidas muestran los valores calculados. a) Baño sin agitación y b) baño agitado con argón (29).

Finalmente, para la fusión de esferas de aluminio en baños de aleación aluminio-silicio se remite al lector a la Figura 2.35. En este caso la concentración de silicio en el baño alrededor de la esfera varía conforme la esfera de aluminio funde, por lo que la temperatura de liquidus también varía. Por lo tanto, la rapidez de fusión es influida tanto por la transferencia de calor como por la transferencia de masa. Se observa en ambas figuras que entre más intenso es el flujo de argón más corto es el tiempo de fusión, y entre más grande sea la temperatura del baño (T_b), más alta es la rapidez de fusión.

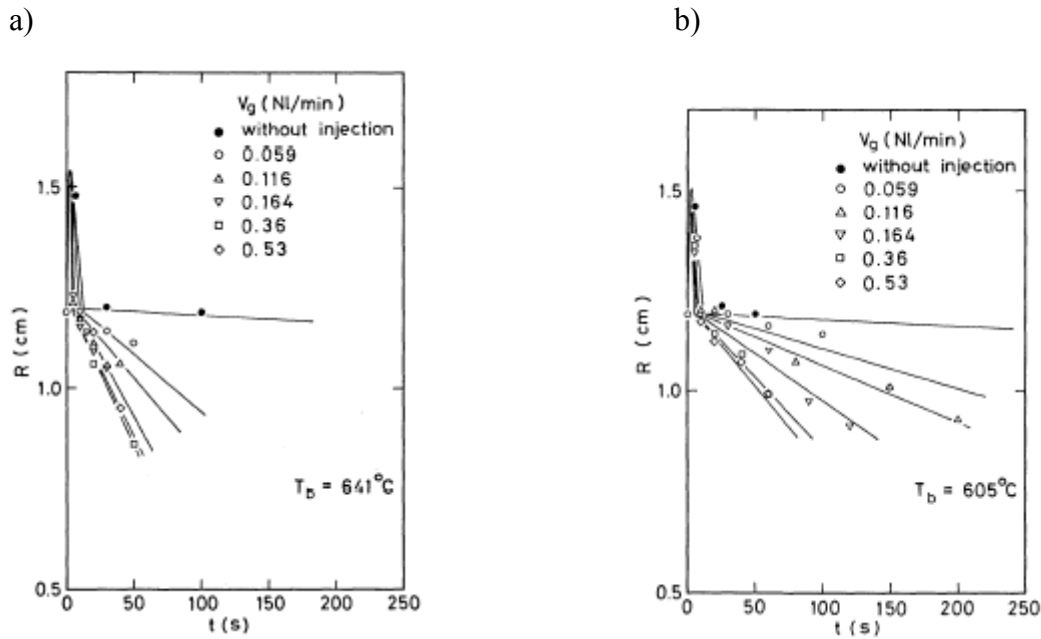


Figura 2.35. Variación del radio de la esfera inmersa en baños de a)Al-6.0%Si y b)Al-11.49%Si. Las líneas sólidas muestran los valores calculados (29).

Estos datos experimentales fueron retomados y validados por la solución analítica desarrollada por Jiao mencionada anteriormente. En la Figura 2.36 se observan los datos experimentales de Taniguchi comparados con los del modelo de Jiao para una partícula esférica de aluminio sumergida en un baño fundido de aluminio a diferentes temperaturas, mostrando una satisfactoria concordancia.

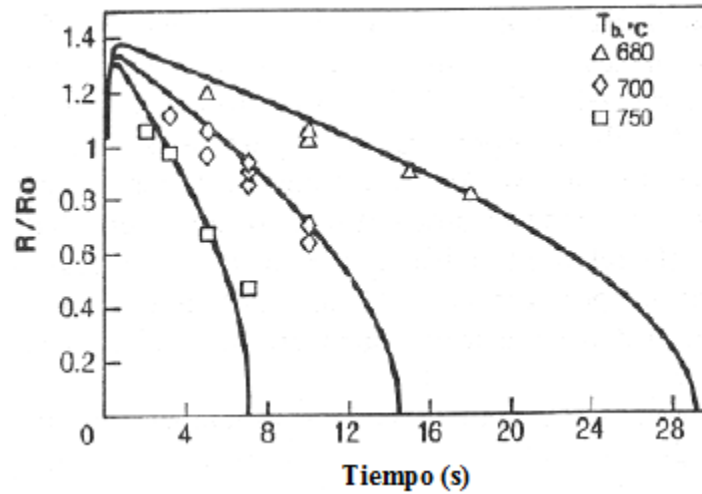


Figura 2.36. Comparación de la fracción de tamaño de la partícula calculado por Jiao contra el tiempo usando los resultados experimentales obtenidos por Taniguchi (13).

2.4 Modelos matemáticos para la fusión de partículas metálicas en baños fundidos.

Son varios los autores mencionados hasta aquí que han elaborado modelos matemáticos para predecir la fusión de hierro esponja en escoria, en hierro fundido o en mismo hierro esponja o fusión de partículas no ferrosas en acero o en baños fundidos no ferrosos. Sin embargo, el planteamiento básico del modelo es el mismo para todos, la diferencia radica en el método utilizado para resolver la ecuación de la segunda ley de Fourier con sus respectivas condiciones iniciales y de frontera, ya sean soluciones analíticas o numéricas.

Un ejemplo representativo de este modelo se plantea a continuación para el caso de la fusión de hierro esponja en un baño de hierro puro como se muestra en la Figura 2.37. Una esfera metálica a una temperatura inicial T_{0e} y radio R_0 es sumergida en un tiempo $t = 0$ en un medio infinito de metal líquido a temperatura T_b . El gradiente de temperatura es discontinuo en $r = R_0$ debido a las diferentes conductividades térmicas del pelet y de la coraza de hierro formada por choque térmico. Después de alcanzar un crecimiento máximo la coraza de hierro llega a un máximo y posteriormente comienza a desaparecer. En el tiempo $t = t_c$ la coraza de hierro ha desaparecido nuevamente, y subsecuentemente la esfera de hierro esponja comienza a fundirse.

Con el objetivo de poder plantear ecuaciones matemáticas que tengan una solución razonablemente asequible, se hacen las siguientes suposiciones:

- (1) Las propiedades físicas del sistema permanecen constantes durante el proceso, es decir, no dependen de la temperatura y por lo tanto son independientes del tiempo.
- (2) El perfil de temperatura dentro del pelet es simétrico respecto a su coordenada radial.
- (3) Las temperaturas de fusión del pelet y del baño metálico permanecen constantes durante el proceso.
- (4) La transferencia de calor desde el baño metálico hacia la interfase sólido-líquido está gobernada por el mecanismo de convección.

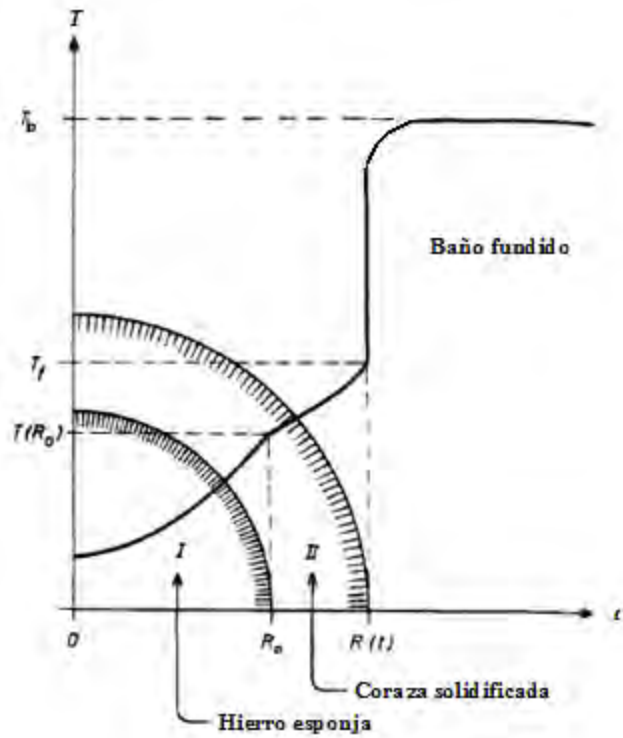


Figura 2.37. Descripción del problema de flujo de calor (21).

Las ecuaciones gobernantes y las condiciones iniciales de frontera dependen del tiempo y del espacio de la siguiente forma:

Para la región de la esfera de hierro esponja en el tiempo $t < t_c$:

Ecuación gobernante

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_e} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{para } 0 < r < R_0 \quad (2.1)$$

Condición inicial

$$1) \quad T = T_{0e}, \quad r \leq R_0 \quad (2.2)$$

Condiciones de frontera

$$1) \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0 \quad \text{por simetría} \quad (2.3)$$

$$2) T_e = T_c, \quad r = R_0 \quad (2.4)$$

Para la región de la coraza sólida en el tiempo $t < t_c$

Ecuación gobernante

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_c} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{para } R_0 < r < R \quad (2.5)$$

Condición inicial

$$T = T_e, \quad r = R_0, \quad t = 0 \quad (2.6)$$

Condiciones de frontera

$$1) T_e = T_c, \quad r = R_0$$

$$2) T = T_f, \quad r = R \quad (2.7)$$

Y el balance de calor en la frontera $r = R$ queda de la siguiente forma:

Condición de frontera

$$\lambda_c \frac{\partial T}{\partial r} - h(T_b - T_f) = \frac{dR}{dt} \rho_c \Delta H_c \quad \text{en } r = R \quad (2.8)$$

Condición inicial

$$R = R_0, \quad t = 0 \quad (2.9)$$

Ambas ecuaciones diferenciales pueden ser acopladas por la expresión

$$T_{e.R_0} = T_{c.R_0} \quad (2.10)$$

$$\lambda_e \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{e.R_0} = \lambda_c \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{c.R_0} \quad (2.11)$$

Lo cual establece el hecho de que la temperatura y el flujo de calor son continuos en $r = R_0$.

Finalmente, una vez que la coraza se ha fundido completamente (en el tiempo $t = t_c$) el modelo de fusión del pelet es el siguiente:

Condición inicial

$$T = T(r, t_c), \quad r \geq R_0, \quad t = t_c \quad (2.12)$$

Condiciones de frontera

$$1) \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0 \quad \text{por simetría}$$

$$2) \quad T = T_f, \quad r = R$$

Y el balance de calor en $r = R$ es el siguiente:

Condición inicial

$$1) \quad R = R_0, \quad t = t_c$$

Condición de frontera

$$1) \quad \lambda_e \frac{\partial T}{\partial r} - h(T_b - T_f) = \frac{dR}{dt} \rho_e \Delta H_e \quad \text{en } r = R \quad (2.13)$$

Resolviendo estas ecuaciones se puede calcular el tiempo de fusión del hierro esponja u otra partícula metálica en otro medio diferente como el hierro puro o escoria. Si el problema consiste en fundir partículas en un baño de sus mismas propiedades, el problema se simplifica ya que $\alpha_1 = \alpha_2$, $\rho_1 = \rho_2$ y $\lambda_1 = \lambda_2$, y la ecuación (2.5) se resuelve utilizando las condiciones iniciales y de frontera (2.2), (2.3), (2.6)-(2.8).

2.4.1 Soluciones numéricas

Las soluciones numéricas son una muy buena alternativa para resolver las ecuaciones diferenciales parciales planteadas en el modelo. A pesar de que representan una aproximación con un determinado porcentaje de error, se pueden obtener resultados muy buenos y reducir el error a un valor muy pequeño si se utiliza una técnica adecuada de solución. A continuación se describirán las soluciones numéricas más importantes que resuelven al modelo planteado.

2.4.1.1 Solución numérica para resolver integrales de funciones de Green

Ehrich (21) utilizó el método de funciones de Green para transformar las ecuaciones diferenciales parciales del modelo en ecuaciones integrales, en términos de sus condiciones iniciales y de frontera. La solución numérica consiste en una discretización de los intervalos de tiempo para resolver las ecuaciones integrales. Su método consiste básicamente en transformar las ecuaciones diferenciales (1)-(4) mencionadas anteriormente en su forma adimensional utilizando las siguientes expresiones.

$$U = \frac{T - T_f}{T_f - T_{0e}} \quad Fo = \frac{t\alpha_1}{R_0^2} \quad s = \frac{r}{R_0} \quad S = \frac{R}{R_0} \quad (2.14)$$

$$Ph = \frac{\Delta H}{Cp(T_f - T_{0e})} \quad Bi = \frac{hR_0}{\lambda} \quad U^* = \frac{T_b - T_f}{T_f - T_{0e}} \quad (2.15)$$

Quedando las ecuaciones adimensionales de la siguiente forma:

$$\frac{1}{s^2} \cdot \frac{\partial}{\partial s} \left(s^2 \frac{\partial U}{\partial s} \right) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial U}{\partial Fo} \quad \text{para } 0 < s < S \quad (2.16)$$

Condiciones iniciales

$$1) U(s, Fo < 0) = -1 \quad (2.17)$$

Condiciones de frontera

$$\frac{\partial U}{\partial s} = 0, \quad \text{para } s = 0 \text{ y } Fo > 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial U}{\partial s} - BiU^* = Ph \frac{dS}{dFo} \quad \text{para } s = S \text{ y } Fo > 0 \quad (2.19)$$

Una vez planteadas estas ecuaciones son transformadas en su forma integral y su solución solo puede ser numérica discretizando el paso del tiempo. La solución general del método de funciones de Green es la siguiente, donde G es la función de Green en coordenadas esféricas:

$$U(s, Fo) = \int_0^1 4\pi\xi^2 \left(Ph \frac{dS}{dFo} + BiU^* \right) \cdot G|_{\xi=S} \cdot d\tau - \int_0^1 \pi\xi^2 \cdot G|_{\tau=0} \cdot d\xi \quad (2.20)$$

Este planteamiento de Ehrich tiene mucha aceptación puesto que prácticamente es reproducido por varios de los investigadores que se han mencionado como *Seaton* (19) y *Jiao* (13) y fue también utilizado por otros para proponer soluciones analíticas como *Zhang* (23).

2.4.1.2 Solución numérica por el método de diferencias finitas

Un método numérico alternativo se basa en la técnica de diferencias finitas. El modelo pionero fue desarrollado por *O'Malley* (30) quien utilizó la formulación explícita para determinar las etapas más importantes de la fusión de hierro esponja en un baño de escoria fundida. De acuerdo a su modelo se pueden predecir las siguientes cantidades dependientes del tiempo para diferentes condiciones del baño líquido:

1. La historia térmica (temperatura vs tiempo) a varias posiciones radiales dentro del pelet y la coraza de escoria.
2. El grosor de la coraza de escoria.
3. La evolución del diámetro del pelet durante la fusión.
4. El volumen de gas que se desprende del pelet.

El método consiste en discretizar el dominio en k capas esféricas como se muestra en la figura 2.38. Para incorporar a la coraza de escoria se agregan elementos adicionales desde $k + 1$ hasta m . El elemento m contiene la interfase móvil sólido/líquido de la escoria (o del pelet durante la fusión). La posición exacta de la interfase está dada por δ , que es la distancia de la pared interior del elemento m a la interfase sólido/líquido.

Durante un tiempo finito, Δt , el calor fluye hacia el centro de i a partir de $i + 1$, y sale hacia $i - 1$. El cambio total en la cantidad de calor en el elemento i produce un cambio en la temperatura del elemento durante el periodo de tiempo. Por lo tanto, este balance de calor se puede escribir de la siguiente manera:

$$V_i \rho_i C p_i \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} = \lambda_{i+1/2} \cdot A_{i+1/2} \cdot \frac{T_{i+1}^t - T_i^t}{\Delta r_{i+1,i}} - \lambda_{i-1/2} \cdot A_{i-1/2} \cdot \frac{T_i^t - T_{i-1}^t}{\Delta r_{i,i-1}} + q_1 V_1 \quad (2.21)$$

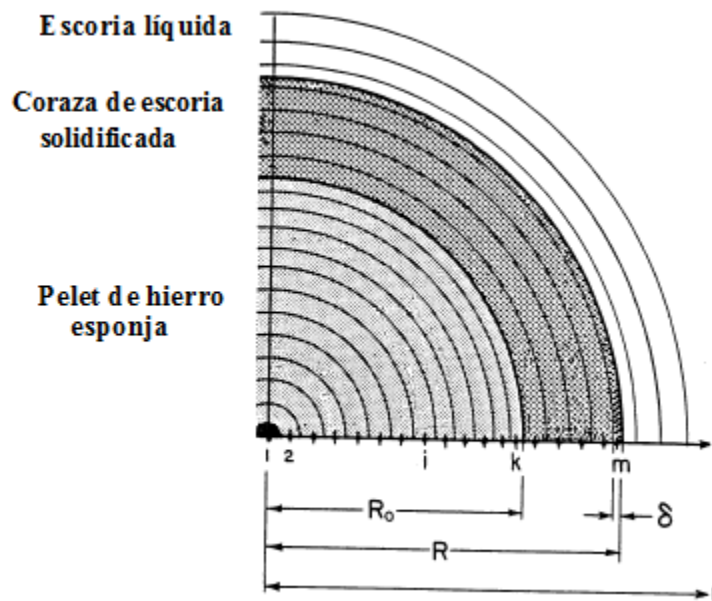


Figura 2.38. Elementos en capas esféricas utilizadas en el modelo de diferencias finitas (30).

Región de la interfase pelet-coraza:

Para la región de la interfase pelet-coraza de escoria existe una discontinuidad en el perfil de temperatura y por lo tanto la ecuación 2.20 no se puede satisfacer satisfactoriamente, por lo tanto, un nodo extra sin "masa térmica" se posiciona en la interfase como se observa en la Figura 2.39. Este nodo se utiliza para garantizar la continuidad del flujo y del perfil de temperaturas en la interfase asignando una temperatura al nodo interfacial que satisfaga la continuidad.

Para calcular la temperatura del nodo de la interfase se hace un balance de calor y se obtiene la siguiente expresión:

$$\lambda_k \frac{T_{\text{int}} - T_k}{\Delta r_{\text{int},k}} = \lambda_{k+1} \frac{T_{k+1} - T_{\text{int}}}{\Delta r_{k+1,\text{int}}} \quad (2.22)$$

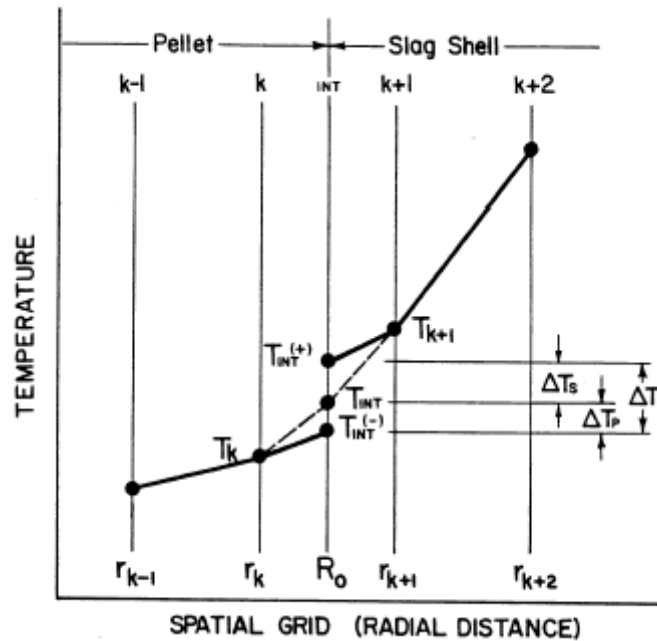


Figura 2.39. Representación con diferencias finitas del perfil de temperatura en la interfase pelet-escoria (30).

Intercara de fusión o solidificación:

Los movimientos de la interfase líquido-sólido de la escoria durante la solidificación y fusión, y el movimiento de la superficie del pelet durante la fusión, son descritos con el siguiente balance en la frontera móvil, donde el calor que entra por convección, menos el calor que sale por conducción, es igual al calor que se acumula en la intercara. Este calor sirve para fundir si es positivo o provoca la solidificación si es negativo.

$$\lambda_{m-1/2} \frac{(T_f - T_{m-1})}{\Delta r_{\delta, m-1}} - h(T_b - T_{f, M}) = \frac{(R - R_0)}{\Delta t} \rho_m \Delta H_M \quad (2.23)$$

Región de calentamiento de la superficie del pelet:

Después de que la coraza sólida de escoria desaparece completamente, el calor se transfiere a la superficie del pelet por convección desde el baño de escoria. Cuando la temperatura de la superficie del pelet se encuentra por debajo de su temperatura de fusión el balance de calor queda de la siguiente forma:

$$h(T_b - T_{int}) = \lambda_k \frac{(T_{int} - T_k)}{\Delta r_{int, k}} \quad (2.24)$$

Esta ecuación puede ser reordenada de la siguiente forma para definir la temperatura en el nodo extra en la interfase, T_{int} .

$$T_{int} = \frac{h\Delta r_{int, k} T_b + \lambda_k T_k}{\lambda_k + h\Delta r_{int, k}} \quad (2.25)$$

Esta solución de O'Malley es la solución utilizada básicamente para todos los modelos que resuelven el problema por diferencias finitas mencionados durante esta revisión con la excepción de que la mayoría de ellos omiten esta última parte del calentamiento de la superficie del pelet y suponen que la temperatura en el nodo conectivo es igual a la temperatura de fusión del pelet.

2.4.2 Soluciones analíticas

Algunas de las soluciones analíticas son solo aproximaciones de la solución exacta y además sólo pueden ser aplicadas en algunos casos límite o asintóticos, por lo tanto son muy ideales. A pesar de eso, son muy útiles para verificar resultados obtenidos por soluciones numéricas como se verá en el capítulo IV. A continuación se hará una reseña de las soluciones analíticas más relevantes desarrolladas por algunos investigadores.

2.4.2.1 Solución analítica de Ehrich

Según Ehrich (21), debería de esperarse que la velocidad de crecimiento de la esfera en $t = 0$ coincida con la de una superficie planar. Para un sobrecalentamiento de cero ($T_f = T_b$) la solución analítica de la ecuación 2.25 es válida en donde k es la constante parabólica adimensional de rapidez que se expresa con la ecuación 2.26.

$$\frac{\sqrt{k}}{2} \cdot Ph_2 \sqrt{\pi} \exp \frac{k}{4} \left(\operatorname{erf} \frac{\sqrt{k}}{2} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}} \right) = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (2.26)$$

$$k = \frac{(S-1)^2}{Fo} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (2.27)$$

Cuando $t \rightarrow \infty$ se obtienen las siguientes expresiones

Radio máximo de la esfera:

$$R_{\max} = \sqrt[3]{1 + \frac{\rho_1 Cp_1 (T_f - T_{0e})}{\Delta H \rho_2}} \cdot R_0 \quad (2.28)$$

Tiempo en que desaparece la coraza:

$$t_c = \frac{(R_{\max} - R_0) \Delta H \rho_2}{h(T_b - T_f)} \quad (2.29)$$

Radio de la esfera en función del tiempo:

$$R = R_{\max} - \left[\frac{h(T_b - T_f)}{\Delta H \rho_2} \right] \cdot t \quad \text{para } t < t_c \quad (2.30)$$

y

$$R = R_0 - \left[\frac{h(T_b - T_f)}{\Delta H \rho_2} \right] \cdot (t - t_c) \quad \text{para } t > t_c \quad (2.31)$$

2.4.2.2 Solución analítica de Zhang

Zhang (23) desarrolló otra solución analítica utilizando las siguientes suposiciones para la fusión de hierro esponja en hierro puro:

1. La resistencia a la transferencia de calor se presenta principalmente en el hierro esponja por su baja conductividad térmica. La temperatura de la coraza de hierro es uniforme. La conductividad térmica en la coraza es infinitamente grande por lo tanto la temperatura tanto en el interior de la coraza como en la superficie de la esfera es igual a la temperatura de solidificación.
2. Mientras existe la coraza de hierro, la superficie original de la partícula es usada para hacer los cálculos de transferencia de calor en lugar de la superficie que incluye la coraza de hierro. Como esta superficie es más pequeña que la superficie de la coraza, la transferencia de calor es por lo tanto subestimada. Zhang dice que éste error se compensa con la primera suposición.

Para llegar a la solución es necesario calcular el flujo de calor adimensional BiU^* desde el baño a la partícula. Cuando $BiU^* \leq 1$ la coraza de hierro existe en el tiempo $Fo > 1/\pi$ y por otro lado la coraza de hierro desaparece para $BiU^* > 1$ en un tiempo $Fo < 1/\pi$. Finalmente la solución analítica para el tiempo adimensional es la siguiente:

$$Fo = \frac{4}{\pi(BiU^* + 1)^2} \quad \text{para } BiU^* > 1 \quad (2.32)$$

y

$$Fo = \frac{1}{\pi BiU^*} \quad \text{para } BiU^* \leq 1 \quad (2.33)$$

El máximo grosor de la coraza se logra con la condición $dS/dFo = 0$ y se obtiene:

$$Fo = \frac{1}{\pi(BiU^* + 1)^2} < \frac{1}{\pi} \quad (2.34)$$

donde:

$$BiU^* = \frac{Nu}{2} \cdot \frac{\lambda_b}{\lambda_e} \cdot \frac{T_b - T_f}{T_f - T_{0e}} \quad (2.35)$$

Con este modelo analítico Zhang propone expresiones para calcular algunos parámetros importantes tales como la cantidad total de calor transferido a la partícula desde su precalentamiento hasta la fusión:

$$Q_{tot} = Cp\rho V_0(T_f - T_{0e}) + \rho V_0 \Delta H \quad (2.36)$$

2.4.2.3 Solución analítica de Engh

Engh (26) por su parte desarrolla un modelo analítico para calcular en todas las etapas el tiempo de fusión de adiciones metálicas con un punto de fusión más bajo que el punto de fusión del baño metálico en que se sumergen, tal es el caso de hierro esponja en hierro o en escoria. Propone expresiones para facilitar la solución de la ecuación gobernante y sus condiciones de frontera para finalmente obtener los valores más importantes del proceso.

Una característica de su modelo es que establece relaciones entre el número de Biot y el tiempo adimensional Fo_c para calcular el tiempo de fusión de la coraza como se observa en la Figura 2.40.

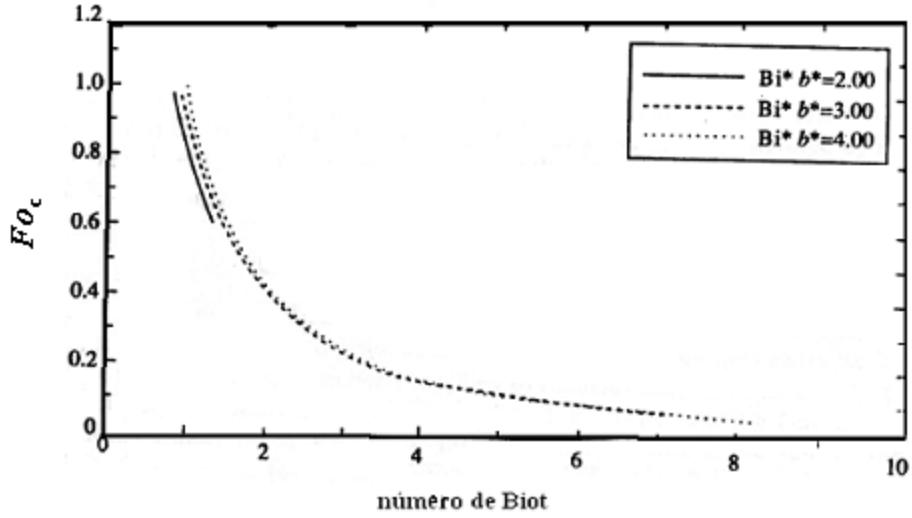


Figura 2.40. Tiempo de la coraza Fo_c en función del Biot y de $Bi \cdot b^*$ (26).

Donde:

$$Bi \cdot b^* = \frac{(\Delta H \rho_2 - C p_1 \rho_1 (T_b - T_{fb})) 4 \alpha_1}{C p_2 \rho_2 (T_{fb} - T_{0e}) \alpha_2} \quad (2.37)$$

Con esto se puede calcular el tiempo en que existe la coraza

$$t_c = \frac{Fo_c R^2}{4 \alpha_1} \quad (2.38)$$

Para obtener el tiempo total de fusión de la esfera se debe calcular primero cuanto calor sensible entra al pelet durante el periodo de la coraza.

$$H_c = (T_f - T_{0e}(t = 0)) \pi R^2 C p \rho \left\{ a_1 \left(\frac{4 Fo_c^{1/2}}{\pi^{1/2}} - Fo_c \right) + a_2 \left(\pi^{1/2} Fo_c^{1/2} - \frac{2}{3} Fo_c \right) + a_3 \left(\frac{8 Fo_c^{1/2}}{3 \pi^{1/2}} - \frac{Fo_c}{2} \right) \right\} \quad (2.39)$$

donde a_n es la constante de proporcionalidad y se calcula con la siguiente expresión:

$$a_n = (-1)^n \frac{2}{n \pi} \quad (2.40)$$

Para obtener el tiempo adimensional de la partícula Fo_p Engh obtiene la relación de la Figura 2.41.

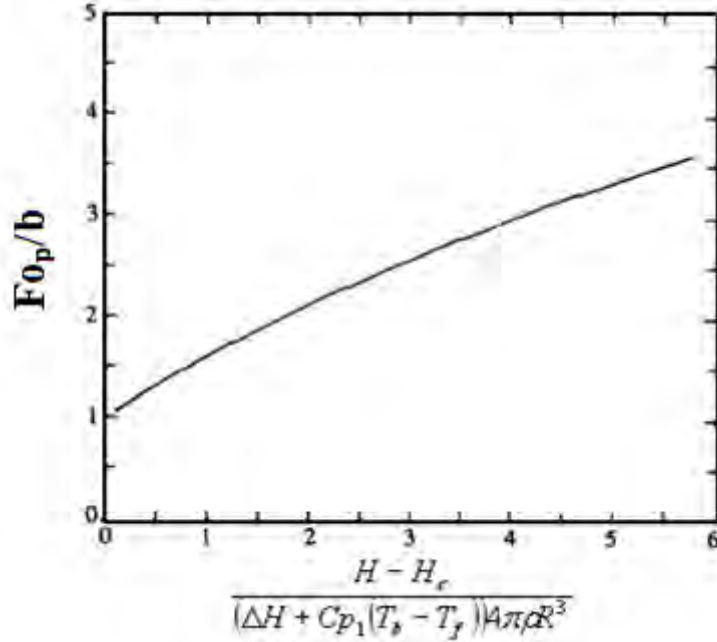


Figura 2.41. Tiempo de fusión de la adición Fo_p en función de b (tiempo de fusión si la partícula se encontraba a la temperatura de fusión) y el promedio entre el calor sensible remanente y el calor necesario para la fusión (26).

Donde H es el calor sensible de la adición que se puede obtener de tablas y b es el tiempo de fusión si la adición estaba a la temperatura de fusión y se calcula con la siguiente expresión:

$$b = \frac{(\Delta H \rho - C_{p_l} \rho_l (T_b - T_f)) 4\alpha}{h(T_b - T_f) R} \quad (2.41)$$

Donde el subíndice l denota la fase líquida de la adición

Finalmente una vez calculado el tiempo en que tarda en fundir la adición con la ecuación 2.37 se puede calcular el tiempo total de fusión de la partícula.

$$t_{tot} = t_c + t_p \quad (2.42)$$

Hasta aquí se han mencionado los modelos más importantes para resolver el problema en cuestión. La Tabla 2-1 muestra un resumen de los modelos propuestos por los investigadores más importantes en este campo.

Autor	Materiales (sólido en líquido)	Características particulares	Métodos Numéricos	Ecuación gobernante, condiciones de iniciales y de frontera
<i>Ehrich</i> (21)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en hierro ➤ DRI en DRI ➤ Hierro en hierro 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Transforma las ecuaciones diferenciales en su forma adimensional 	Método para resolver ecuaciones integrales utilizando funciones de Green	Ecuación gobernante: $\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$
<i>Seaton</i> (19)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en acero 			
<i>Jiao</i> (13)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Escoria-escoria ➤ Al en Al ➤ DRI en Escoria ➤ Cu-Ni en Cu₂S 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Resuelve las ecuaciones en su forma adimensional. 	Diferencias finitas Método explícito	1) $\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0$ 2) $T = T_f, \quad r = R$ 3) $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} - h(T_b - T_f) = \frac{dR}{dt} \rho \Delta H$
<i>Taniguchi</i> (29)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Al en Al ➤ Al en aleación de Al 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ No transforman las ecuaciones en ecuaciones adimensionales. 		Condiciones iniciales:
<i>Nauman</i> (31)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en escoria 			$R = R_0 \quad t = 0$
<i>O'Malley</i> (30)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en escoria 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Difiere con la condición de frontera 2 en el nodo convectivo cuando $t > t_c$ $T_{\text{int}} = \frac{h\Delta r_{\text{int},k} T_b + \lambda_k T_k}{\lambda_k + h\Delta r_{\text{int},k}}$		En la interfase: $T_{1,R_0} = T_{2,R_0}$ $\lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{1,R_0} = \lambda_2 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{2,R_0}$

Autor	Material	Características particulares	Soluciones Analíticas	Ecuación gobernante, condiciones de iniciales y de frontera
<i>Ehrich</i> (21)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en hierro ➤ DRI en DRI ➤ Hierro en hierro 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Transforma las ecuaciones diferenciales en su forma adimensional 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Radio máximo (R_{max}) ➤ Etapa de la coraza (t_c) ➤ Evolución del radio 	<p>Ecuación gobernante:</p> $\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$ <p>Condiciones de frontera:</p>
<i>Zhang</i> (23)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DRI en hierro 	<p>Condición de frontera 2 en $R = R_0$:</p> $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} 4\pi R_0^2 - h(T_b - T_f) 4\pi R^2 = 4\pi R^2 \frac{dR}{dt} \rho_1 \Delta H$ <p>Suposiciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Desprecia la conducción de calor en la coraza ➤ Se compensa lo anterior cuando $4\pi R^2$ es remplazado por $4\pi R_0^2$ en la condición de frontera 2. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fo_{max} ➤ Fo ➤ Calor para fundir la partícula (Q_{tot}) ➤ Evolución del radio 	<ol style="list-style-type: none"> 1) $\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0$ 2) $T = T_f, \quad r = R$ 3) $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} - h(T_b - T_f) = \frac{dR}{dt} \rho \Delta H$ <p>Condiciones iniciales:</p> $R = R_0 \quad t = 0$ <p>En la interfase:</p> $T_{1,R_0} = T_{2,R_0}$ $\lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{1,R_0} = \lambda_2 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{2,R_0}$
<i>Engh</i> (26)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Adiciones metálicas con menor punto de fusión que el baño líquido 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Puede calcular la temperatura en cualquier tiempo cuando el perfil de temperatura se vuelva lineal. ➤ Establece relaciones entre el número de Biot y el tiempo adimensional Fo_0. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ t_c ➤ Tiempo de fusión ➤ Evolución del radio ➤ Fo ➤ Q_{tot} ➤ Calor sensible (H) 	<p>Ecuación gobernante:</p> $\alpha \frac{\partial^2 (rT)}{\partial r^2} = \frac{\partial (rT)}{\partial t}$ <p>Condiciones de frontera:</p> $\frac{rT}{RT_f} = \pm 1 \quad r = \pm R$

CAPITULO III

MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Se ha desarrollado un modelo matemático que simula la transferencia de calor a una partícula metálica fría inmersa en un baño metálico fundido a alta temperatura, tal y como sucede en algunos procesos industriales reales como el Horno de Arco Eléctrico que funde pelets de hierro esponja. El modelo utiliza datos disponibles en la literatura de las propiedades físicas tanto de hierro esponja como de escorias típicas de aceración. Este modelo puede ser utilizado para analizar resultados experimentales obtenidos en otros trabajos e incluso puede ser aplicado directamente para analizar la fusión de hierro esponja cuando es alimentado al horno de arco eléctrico.

Debido a que el propósito principal de este modelo es conocer la cinética de fusión de hierro esponja en escoria, los siguientes cálculos son necesarios:

1. Transferencia de calor por convección del líquido hacia el sólido.
2. Movimiento de la interfase entre la esfera sólida y el baño de escoria.
3. Perfil de temperaturas en la coraza de escoria.
4. Perfil de temperaturas en el hierro esponja.

En este capítulo se describe el modelo matemático que predice de la fusión de hierro esponja en escoria y su solución numérica por el método de diferencias finitas.

3.1 Planteamiento del modelo matemático

Supóngase un pelet de hierro esponja a una temperatura inicial T_{0e} y radio R_0 que es alimentado a la escoria del horno de arco eléctrico a temperatura T_b en un tiempo inicial $t = 0$ donde $T_b > T_{0e}$. Como resultado de la transferencia de calor hacia la esfera, una coraza de escoria solidifica en la periferia de la partícula; la coraza crece hasta alcanzar un máximo y posteriormente comienza a fundir. Si el baño de escoria tiene una temperatura suficientemente alta el pelet de hierro esponja fundirá eventualmente. El perfil de temperaturas tanto en la coraza de escoria como en la esfera de hierro esponja se puede apreciar en la Figura 3.1.

Con el objetivo de poder plantear ecuaciones matemáticas que describan la cinética del proceso de fusión, se hacen las siguientes suposiciones:

1. Las propiedades físicas de los materiales permanecen constantes durante el proceso.
2. El perfil de temperaturas dentro del pelet es simétrico respecto a sus coordenadas angulares.

3. La temperatura de fusión del pelet y del baño metálico permanecen constantes durante el proceso.
4. Se desprecian cambios de composición química respecto al tiempo en el pelet, la coraza y el baño metálico.
5. La transferencia de calor desde el baño metálico hacia la interfase sólido-líquido está gobernada por el mecanismo de convección.
6. La coraza comienza a solidificar instantáneamente después de la inmersión del pelet en el baño fundido.

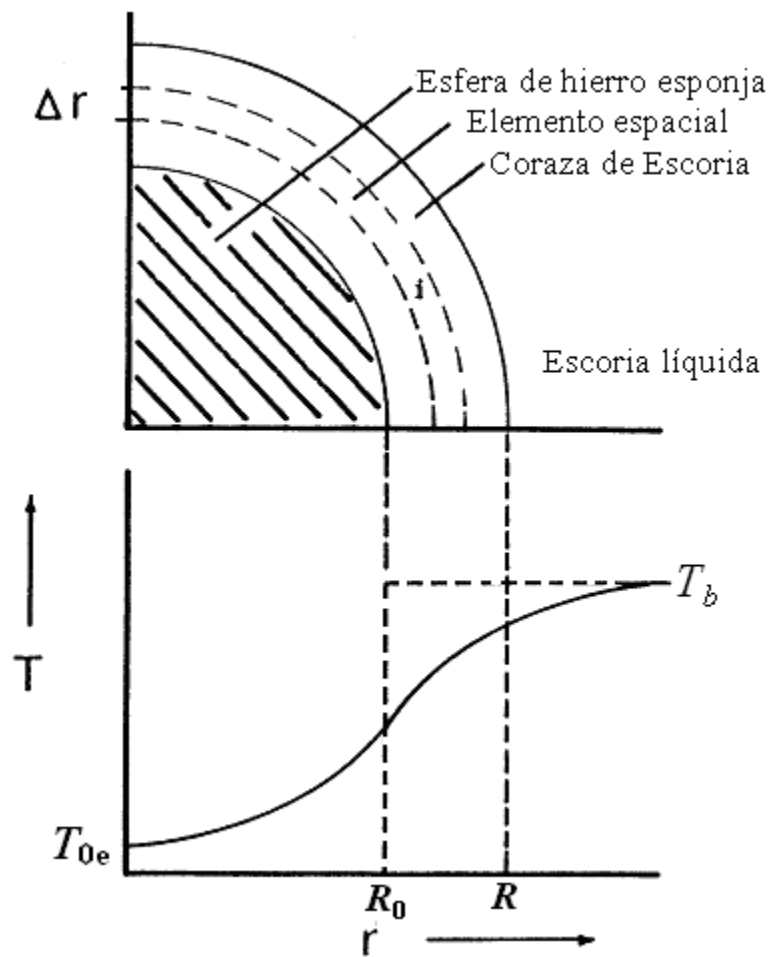


Figura 3.1. Perfil de temperaturas de una esfera fría de hierro esponja inmersa en escoria líquida caliente.

Las ecuaciones gobernantes, condiciones de frontera e iniciales propuestas son las siguientes:

Durante la etapa de tiempo mientras existe coraza ($t < t_c$) la ecuación gobernante corresponde a la ecuación de transporte de energía en estado inestable, unidireccional y sin considerar calores latentes de cambios de fase.

Para la región de hierro esponja:

Ecuación gobernante:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_{HRD}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{para } 0 < r < R_0 \quad (3.1)$$

Condición inicial:

$$T = T_{0HRD}, \quad r \leq R_0 \quad \text{temperatura uniforme} \quad (3.2)$$

Condiciones de frontera

$$1) \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0 \quad \text{por simetría} \quad (3.3)$$

$$2) T_{HRD} = T_{esc}, \quad r = R_0, \quad t > 0 \quad (3.4)$$

Para la región de la coraza de escoria:

Ecuación gobernante

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_{esc}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{para } R_0 < r < R \quad (3.5)$$

Condiciones iniciales

$$T = T_{HRD}, \quad r = R_0, \quad t = 0 \quad (3.6)$$

$$R = R_0, \quad t = 0 \quad (3.7)$$

Condiciones de frontera

$$1) \quad T_{HRD} = T_{esc}, \quad r = R_0 \quad t > 0$$

$$2) \quad \lambda_{esc} \frac{\partial T}{\partial r} - h(T_b - T_{fesc}) = \frac{dR}{dt} \rho_{esc} \Delta H_{esc} \quad \text{en } r = R \quad (3.8)$$

La condición de la ecuación 3.8 representa el balance de energía en la interfase sólido-líquido (recuérdese que es una interfase móvil) y toma en cuenta a los calores latentes de solidificación o fusión de la coraza de escoria formada. Para hacer el balance de calor en esta frontera se hace la suposición de que la temperatura en la superficie de la coraza de escoria al solidificar es instantáneamente igual a la temperatura de fusión como se expresa en la ecuación 3.9.

$$T = T_f, \quad r = R \quad (3.9)$$

Para hacer continuo el perfil de temperatura y el flujo de calor en la interfase hierro esponja-escoria solidificada en $r = R_0$, es necesario igualar las temperaturas y los flujos en la interfase pelet - coraza de la siguiente manera:

$$T_{HRD \cdot R_0} = T_{esc \cdot R_0} \quad (3.10)$$

$$\lambda_{HRD} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{HRD \cdot R_0} = \lambda_{esc} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{esc \cdot R_0} \quad (3.11)$$

Finalmente, una vez que la coraza de escoria se ha fundido completamente (en el tiempo $t = t_c$) el modelo de fusión del pelet queda de la siguiente forma:

Ecuación gobernante:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_{HRD}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{para } 0 < r < R \quad (3.12)$$

Condiciones iniciales

$$T = T(r, t_c), \quad r \leq R_0, \quad t = t_c \quad (3.13)$$

$$R = R_0, \quad t = t_c \quad (3.14)$$

Condiciones de frontera

$$1) \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0 \quad \text{por simetría}$$

La segunda condición de frontera es para el caso de que la temperatura en la superficie del pelet sea menor que la temperatura de fusión:

$$\lambda_{HRD} \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_b - T_{Superficie}) \quad \text{en } r = R_0 \quad (3.15)$$

Y una vez que la superficie ha alcanzado la temperatura de fusión, la segunda condición de frontera queda de la siguiente forma:

$$\lambda_{HRD} \frac{\partial T}{\partial r} - h(T_b - T_f) = \frac{dR}{dt} \rho_{HRD} \Delta H_{HRD} \quad \text{en } r = R \quad (3.16)$$

3.2 Método de solución por diferencias finitas.

La solución numérica utilizada para resolver las ecuaciones del modelo corresponde al método explícito de diferencias finitas. En el apéndice A se puede consultar en qué consiste este método.

3.2.1 Conducción de calor por diferencias finitas

En la técnica de diferencias finitas el sistema (esfera) se divide en elementos esféricos con un grosor finito Δr , como se muestra en la Figura 3.2. El flujo neto de calor en el elemento esférico i es la suma algebraica del flujo de calor del elemento $i+1$ y el elemento $i-1$ hacia el elemento i . Considerando un estado no estacionario, el balance de calor se escribe en su forma de diferencias finitas para el nodo i de la siguiente forma:

$$V_i \rho_i C p_i \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} = \lambda_i A_i \cdot \frac{T_{i+1}^t - T_i^t}{\Delta r} + \lambda_i A_{i-1} \cdot \frac{T_{i-1}^t - T_i^t}{\Delta r} + \dot{q}_i V_i \quad (3.17)$$

Donde $\dot{q}_i V_i$ representa el término de generación de calor en el elemento i en un volumen i .

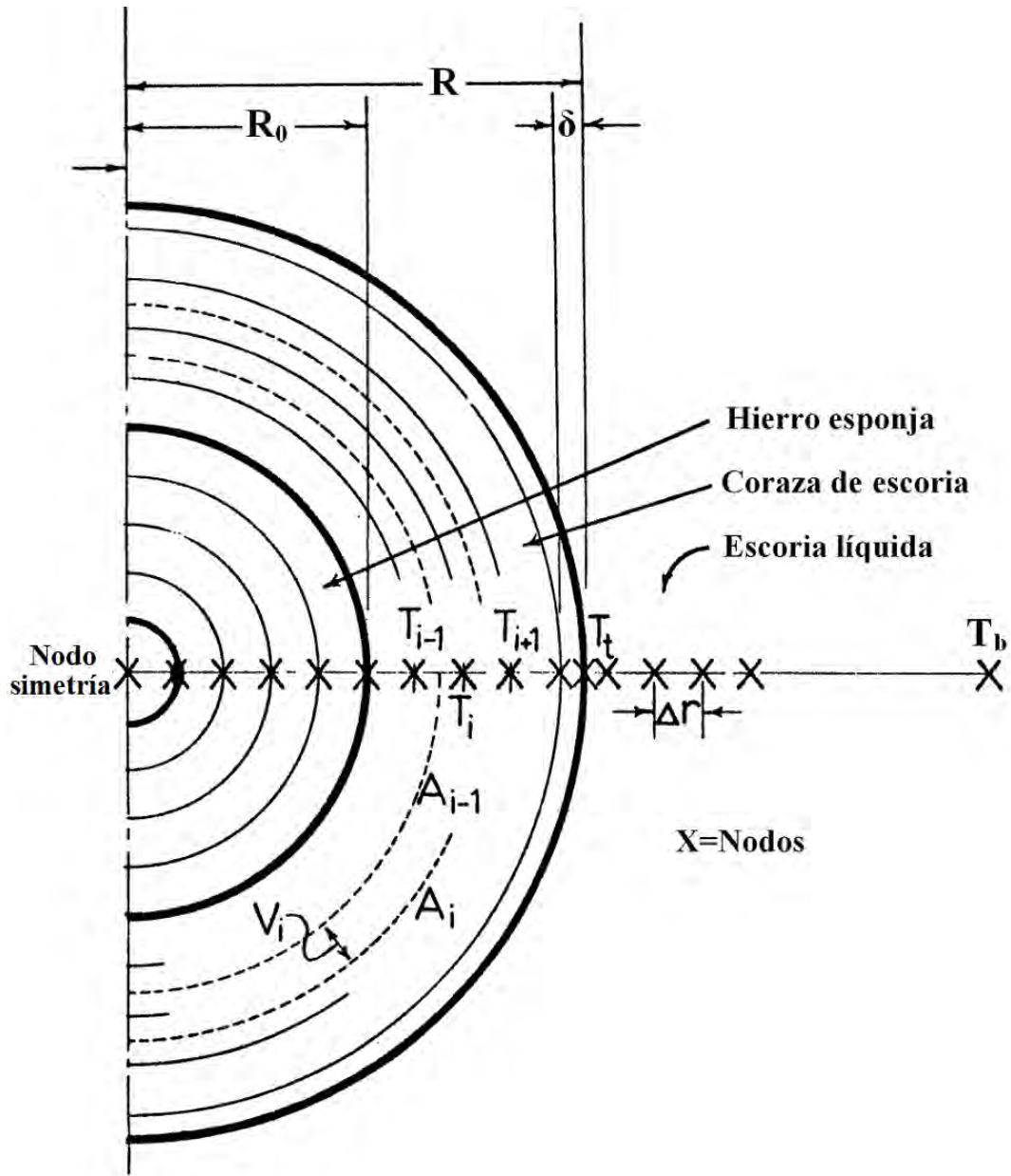


Figura 3.2. Discretización del problema en elementos finitos para calcular la temperatura en el hierro esponja y en la coraza de escoria

Balance de calor en el nodo simetría:

Para el balance de calor en el nodo de simetría el elemento $i-1$ no existe, por lo tanto el tercer término de la ecuación 3.9 es igual a cero y la ecuación se simplifica. Para encontrar la expresión de este nodo en diferencias finitas es necesario conocer el área por donde entra el flujo de calor.

$$A_i = \pi \Delta r^2 \quad (3.18)$$

La expresión para el volumen del elemento i del nodo simetría queda de la siguiente forma:

$$V_i = \frac{\pi \Delta r^3}{6} \quad (3.19)$$

y sabiendo que

$$\Delta Fo_i = \frac{\alpha_i \Delta t}{\Delta r^2} \quad (3.20)$$

la expresión que calcula la temperatura en el nodo origen es la siguiente:

$$T_i^{t+\Delta t} = T_1^t (1 - 6\Delta Fo_{HRD}) + 6\Delta Fo_{HRD} T_2^t \quad (3.21)$$

En esta técnica explícita una condición necesaria para la convergencia es que tiene que cumplirse con los llamados criterios de estabilidad. Esta condición es tan importante que implica ciertas restricciones al tamaño del paso de tiempo; para que esta condición se satisfaga es necesario que todos los coeficientes de todas las T_i^t en las expresiones $T_i^{t+\Delta t}$ (coeficientes primarios) sean mayores o iguales a cero para todos los nodos i . Por lo tanto el incremento de tiempo de cálculo entre dos nodos consecutivos queda limitado por el siguiente criterio de estabilidad.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta r^2}{6\alpha_{HRD}} \quad (3.22)$$

Balance en el nodo central i-esimo:

En los nodos centrales tanto en la región del hierro esponja como en la coraza de escoria, el calor que fluye a través del nodo i entra por A_i y sale por A_{i-1} . Las expresiones para calcular las áreas de las caras interior y exterior del elemento i son las siguientes:

$$A_i = 4\pi\Delta r^2 (i - 1/2)^2 \quad (3.23)$$

$$A_{i-1} = 4\pi\Delta r^2 (i - 3/2)^2 \quad (3.24)$$

el volumen de este elemento se expresa de la manera siguiente

$$V_i = \frac{4\pi\Delta r^3}{3} \left[(i - 1/2)^3 - (i - 3/2)^3 \right] \quad (3.25)$$

Finalmente el balance de calor en los nodos centrales queda descrito por la expresión 3.23.

$$\begin{aligned} T_i^{t+\Delta t} = T_i^t & \left[1 - 3\Delta Fo_i \frac{(i - 3/2)^2 + (i - 1/2)^2}{(i - 1/2)^3 - (i - 3/2)^3} \right] \\ & + T_{i-1}^t 3\Delta Fo_i \frac{(i - 3/2)^2}{(i - 1/2)^3 - (i - 3/2)^3} + T_{i+1}^t 3\Delta Fo_i \frac{(i - 1/2)^2}{(i - 1/2)^3 - (i - 3/2)^3} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Y el criterio de estabilidad para esta ecuación es:

$$\Delta t \leq \frac{V_i \Delta r}{\alpha_i (A_{i-1} + A_i)} \quad (3.27)$$

3.2.2 Interfase pelet-escoria.

El balance de calor en la interfase implica un problema adicional debido a una discontinuidad en el perfil de temperaturas como se muestra en la Figura 2.39 del capítulo II. Para hacer continuo este perfil es necesario igualar los flujos de calor en la interfase de la siguiente manera,

$$\lambda_{HRD} \frac{T_{int} - T_i}{\Delta r} = \lambda_{esc} \frac{T_{i+1} - T_{int}}{\Delta r} \quad (3.28)$$

Para que estos flujos sean iguales y representen adecuadamente la física de transporte de energía en casos en los que los materiales tienen conductividades muy diferentes. Patankar (32) propone calcular una conductividad térmica en la interfase que haga continuo el perfil de temperaturas.

El procedimiento más sencillo para obtener la conductividad térmica en la interfase λ_{int} consiste en suponer una variación lineal de λ entre los dos nodos vecinos P y E que se muestran en la figura 3.3.

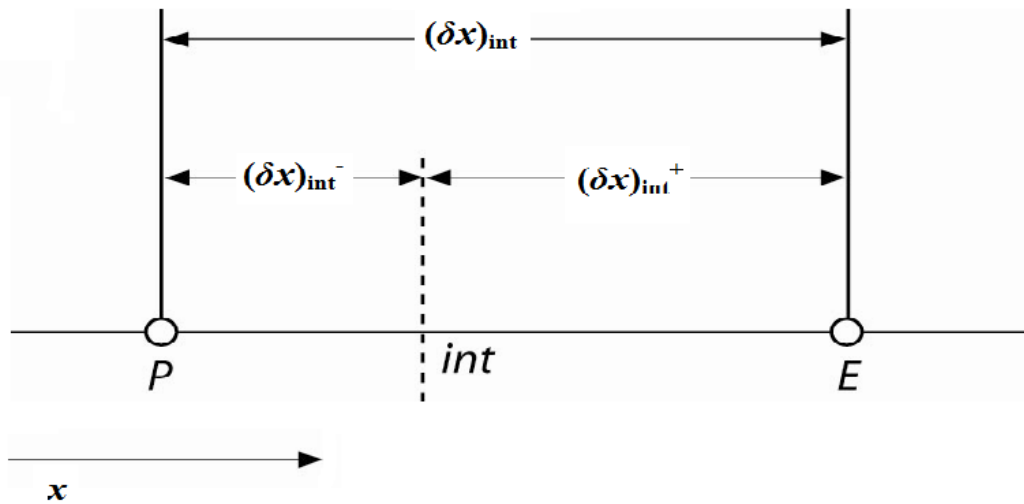


Figura 3.3 Distancias asociadas con la interfase *int* entre nodos vecino *P* y *E*.

Suponiendo dicha variación lineal se llega a la siguiente expresión:

$$\lambda_{int} = f_{int} \lambda_P + (1 - f_{int}) \lambda_E \quad (3.29)$$

Donde el factor de interpolación f_{int} es una relación definida en términos de las distancias mostradas en la Figura 3.3.

$$f_{int} \equiv \frac{(\delta x)_{int+}}{(\delta x)_{int}} \quad (3.30)$$

La expresión 3.26 es conocida como la media aritmética de λ_P y λ_E . Cuando la interfase *int* se encuentra a la mitad entre *P* y *E* tenemos que $f_{int}=0.5$ es la media aritmética. En algunos casos la media aritmética conduce a algunos errores y no puede manejar con precisión cambios abruptos de conductividad térmica como sucede con materiales compuestos como en nuestro caso con hierro esponja y escoria. Es por eso que cuando la interfase entre los nodos vecinos *P* y *E* se encuentra a la mitad, es mejor opción utilizar una media armónica de λ_P y λ_E . Esta conductividad media armónica se calcula con la siguiente ecuación:

$$\lambda_{int} = \frac{2\lambda_P\lambda_E}{\lambda_P + \lambda_E} \quad (3.31)$$

Regresando al caso de la interfase hierro esponja-escoria, es necesario calcular la conductividad térmica en esta región ya sea con la media aritmética o la media armónica según sea el caso. Respecto al balance de energía, hay un cambio en las ecuaciones de los nodos adyacentes a la interfase pelet- escoria que se muestran en la Figura 3.4.

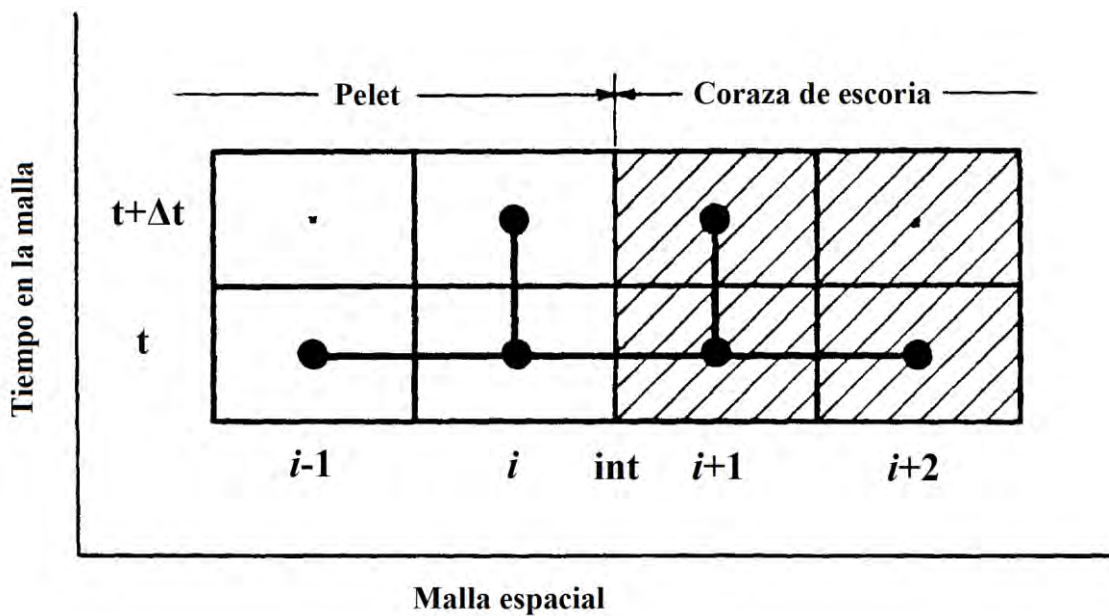


Figura 3.4 Posición espacial de los nodos adyacentes a la interfase hierro esponja-coraza de escoria.

De manera similar en la interfase existen valores de difusividad térmica diferentes para la coraza de escoria y el pelet. La difusividad térmica de la interfase en la región del hierro esponja y en la región de la coraza de hierro esponja se calculan con las ecuaciones 3.32 y 3.33 respectivamente.

$$\alpha_{HRD-int} = \frac{\lambda_{int}}{\rho_{HRD} C p_{HRD}} \quad (3.32)$$

$$\alpha_{esc-int} = \frac{\lambda_{int}}{\rho_{esc} C p_{esc}} \quad (3.33)$$

Las expresiones para el delta de tiempo adimensional para ambas regiones quedan de la siguiente forma:

$$\Delta Fo_{HRD-int} = \frac{\alpha_{HRD-int} \Delta t}{\Delta r^2} \quad (3.34)$$

$$\Delta Fo_{esc-int} = \frac{\alpha_{esc-int} \Delta t}{\Delta r^2} \quad (3.35)$$

Una vez calculados estos valores se puede hacer el balance de calor en los nodos adyacentes a la interfase. Para el nodo i de la interfase en la región del hierro esponja el balance de energía corresponde a la ecuación 3.36.

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t \left\{ 1 - \left[\frac{3(\Delta Fo_{HRD-int} (i-1/2)^2 + \Delta Fo_{HRD} (i-3/2)^2)}{(i-1/2)^3 - (i-3/2)^3} \right] \right\} \quad (3.36)$$

$$+ T_{i-1}^t 3\Delta Fo_{HRD} \frac{(i-3/2)^2}{(i-1/2)^3 - (i-3/2)^3} + T_{i+1}^t 3\Delta Fo_{HRD-int} \frac{(i-1/2)^2}{(i-1/2)^3 - (i-3/2)^3}$$

En la Figura 3.4 se puede asignar como i al segundo nodo adyacente a la interfase que corresponde a la región de la coraza de escoria, e $i-1$ al nodo adyacente que corresponde a la región de hierro esponja. Aplicando un balance de energía, la ecuación resultante es la expresión 3.37.

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t \left\{ 1 - \left[\frac{3(\Delta Fo_{esc} (i-1/2)^2 + \Delta Fo_{esc-int} (i-3/2)^2)}{(i-1/2)^3 - (i-3/2)^3} \right] \right\} \quad (3.37)$$

$$+ T_{i-1}^t 3\Delta Fo_{esc-int} \frac{(i-3/2)^2}{(i-1/2)^3 - (i-3/2)^3} + T_{i+1}^t 3\Delta Fo_{esc} \frac{(i-1/2)^2}{(i-1/2)^3 - (i-3/2)^3}$$

3.2.3 Calentamiento de la superficie del pelet

La condición de frontera de la expresión 3.9 es muy útil para el caso de cuando la temperatura de fusión del hierro esponja es menor o igual a la temperatura de fusión de la escoria. Sin embargo, en el caso contrario para el que la temperatura de fusión del hierro esponja es mayor que la de la escoria esta condición de frontera no es aceptable. El asignarle el valor al nodo convectivo n igual a la temperatura de fusión del hierro esponja inmediatamente después de que fundió la coraza de escoria puede resultar en un significativo error en la cinética de fusión de la partícula.

Una vez que la coraza de escoria se ha fundido completamente, se transfiere calor hacia la superficie del pelet por convección con el baño de escoria líquida. Cuando la temperatura en la superficie del pelet se encuentra por debajo de la temperatura de fusión se satisface la condición de frontera 3.38

$$\lambda_{HRD} \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta r} = h(T_b - T_n) \quad (3.38)$$

Para el nodo ubicado en la superficie del pelet el calor fluye a través de las áreas A_n y A_{n-1} ,

$$A_n = 4\pi R^2 \quad (3.39)$$

$$A_{n-1} = 4\pi \left(R - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \quad (3.40)$$

su volumen es,

$$V = \frac{\pi \Delta r^3}{6} (12n^2 - 30n + 19) \quad (3.41)$$

y sabiendo que

$$\Delta Bi = \frac{h \Delta r}{\lambda} \quad (3.42)$$

el balance de energía en el nodo convectivo n propuesto en la ecuación 3.38 se satisface con la ecuación 3.43

$$\begin{aligned}
T_n^{t+\Delta t} &= T_n^t \left[1 - \frac{6\Delta Fo_{HRD}}{12n^2 - 30n + 19} (4n^2 - 12n + 9 + 4\Delta Bi(n^2 - 2n + 1)) \right] \\
&+ T_{n-1}^t \frac{6\Delta Fo_{HRD}}{12n^2 - 30n + 19} [(4n^2 - 12n + 9) + T_b 4\Delta Bi(n^2 - 2n + 1)]
\end{aligned} \tag{3.43}$$

3.2.4 Superficies en solidificación o fusión

Los movimientos en la interfase sólido-líquido de la escoria durante su fusión o su solidificación, o el movimiento de la superficie del pelet durante su fusión, son descritos por el siguiente balance de energía en la frontera móvil,

$$\lambda_M \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta r} - h(T_b - T_{f,M}) = \rho_M \Delta H_M \frac{R^{t+\Delta t} - R^t}{\Delta t} \tag{3.44}$$

Donde M es el material de la frontera en movimiento, ya sea hierro esponja ($M=HRD$) o escoria ($M=esc$). Esta ecuación puede ser reordenada para calcular la posición de la interfase sólido-líquido después de un tiempo finito Δt .

$$R^{t+\Delta t} = \left\{ \lambda_M \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta r} - h(T_b - T_{f,M}) \right\} \frac{\Delta t}{\rho_M \Delta H_M} + R^t \tag{3.45}$$

La asignación de la temperatura en los nodos de la interfase se muestra en la Figura 3.5. La posición relativa de la interfase dentro del elemento m está dada por δ , que es la distancia desde la pared interior del elemento m a la interfase sólido-líquido en el tiempo t . La distancia en el tiempo $t + \Delta t$ está dada por $\delta^{t+\Delta t}$, por lo tanto $(R^{t+\Delta t} - R^t) = (\delta^{t+\Delta t} - \delta)$ y la ecuación 3.45 cuando la interfase permanece dentro del elemento m , se puede escribir como:

$$\delta^{t+\Delta t} = \left\{ \lambda_M \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta r} - h(T_b - T_{f,M}) \right\} \frac{\Delta t}{\rho_M \Delta H_M} + \delta^t \tag{3.46}$$

Si el grosor $\delta^{t+\Delta t}$ cae fuera del rango, $0 < \delta^{t+\Delta t} < P_m$ (donde P_m es la profundidad del elemento m), entonces el número espacial de elementos incrementa o disminuye un elemento.

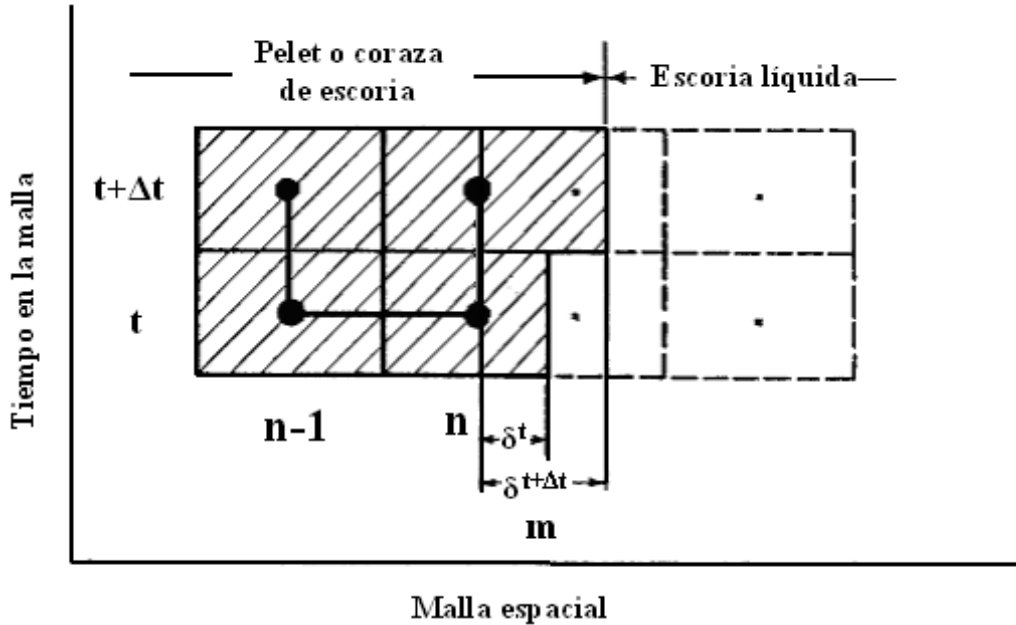


Figura 3.5. Posición de los nodos en la interfase móvil. $\delta^{t+\Delta t} - \delta$ indica la distancia que se mueve la interfase (dentro del elemento m) durante un paso de tiempo. La temperatura en el elemento de la superficie permanece constante a T_f .

Un problema adicional aparece cuando el número de elementos aumenta (solidificación de escoria). En este caso, el número de elementos en el paso de tiempo $t + \Delta t$ excede el número de elementos en el paso anterior de tiempo t . Por lo tanto existe un elemento desconocido más que calcular en el balance de energía total. Esto lleva a una temperatura indeterminada en el elemento $n-1$ en el paso de tiempo $t + \Delta t$ como se muestra en la Figura 3.6. Sin embargo, puesto que la temperatura en la superficie en el nodo convectivo se asigna como constante en T_f , se puede estimar la temperatura del elemento $n-1$ con una interpolación lineal como se muestra en la ecuación 3.47.

$$T_{n-1}^{t+\Delta t} = \left(\frac{\Delta r(n-2) - \Delta r(n-3)}{\Delta r(n-1) - \Delta r(n-3)} \right) (T_{fesc} - T_{n-2}^{t+\Delta t}) + T_{n-2}^{t+\Delta t} \quad (3.47)$$

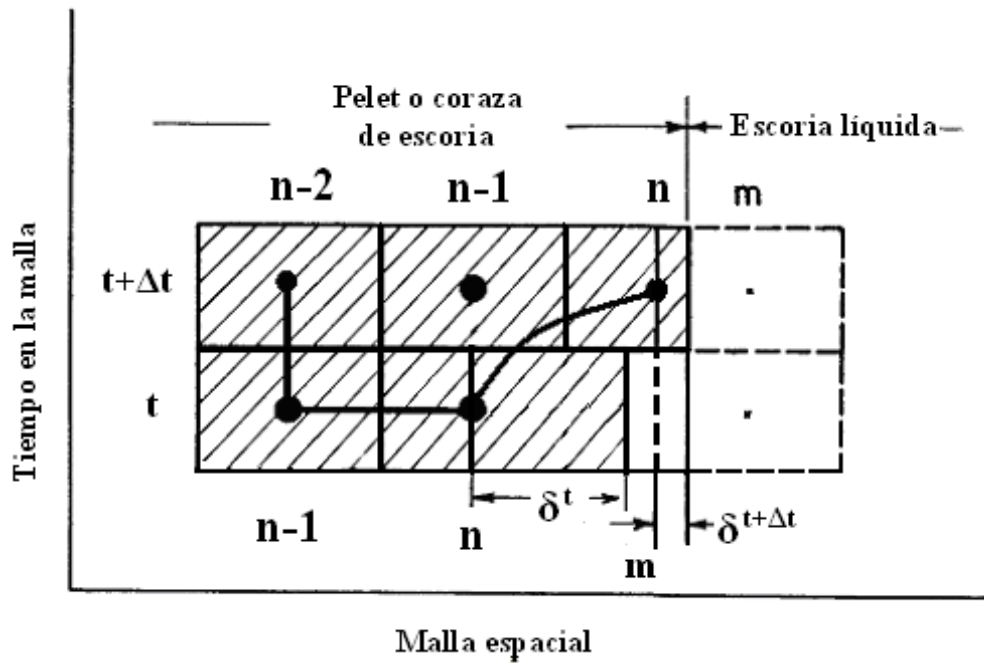


Figura 3.6. Posición del nodo cuando la interfase se mueve a un nuevo elemento. Debido a que se debe de agregar un nuevo elemento espacial en el tiempo $t + \Delta t$, la temperatura en el nodo $n-1$ en el tiempo $t + \Delta t$ queda indefinida.

Para resolver las ecuaciones por diferencias finitas, se utilizó el lenguaje de programación Visual Fortran 8.0. El algoritmo y el código del programa se pueden consultar en el apéndice C.

CAPITULO IV

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestra la validación del modelo matemático tanto experimental como analíticamente. Una vez que se haya comprobado que el modelo es robusto y que los resultados numéricos concuerdan con los resultados medidos en experimentos reales, se hará un riguroso análisis de las variables principales que determinan la cinética de fusión del hierro esponja en un baño de escoria. Para adquirir un conocimiento más general acerca del proceso de fusión de las partículas es necesario estudiar el efecto que causan sobre el proceso de fusión del pelet las condiciones fluidinámicas del baño fundido de escoria y las propiedades físicas del pelet.

4.1 Validación del modelo matemático.

Se obtuvieron resultados de la fusión de un material en su mismo baño metálico o en un baño de diferente composición, tales como hierro puro en hierro puro, aluminio en aluminio, hierro esponja en hierro y hierro esponja en escoria para compararlos con resultados independientes y así validar al modelo matemático. En la Tabla 4-1 se muestra un listado de las propiedades físicas de los materiales utilizados.

El modelo de transferencia de calor para la fusión de un material en su mismo medio (como el caso de hierro en hierro o aluminio en aluminio) es el modelo más sencillo de resolver puesto que la única interfase que existe es la interfase de fusión y por lo tanto no existen cambios abruptos en las propiedades físicas de los materiales que conduzcan a una discontinuidad en el perfil de temperaturas. La solución de este modelo es más sencilla ya que no es necesario un desarrollo matemático tan complejo como el planteado en el capítulo III donde la posición de los nodos es fija y se adicionan elementos conforme cambia el radio de la esfera. Para este caso el número de nodos es constante y lo único que cambia en función del tiempo es la distancia Δr que existe entre ellos. La descripción de este algoritmo se encuentra en el Apéndice B.

Tabla 4-1. Propiedades Físicas del hierro, hierro esponja, aluminio y escoria.

	Hierro (21)	Hierro esponja 1 (Erich (21))	Hierro esponja LR-2J-1 (30)	Hierro esponja LR-1B-1 (30)	Aluminio (33)	Escoria 1 (30)	Escoria 2 (30)
$\rho(\text{Kg/m}^3)$	7650	2600	3370	2020	2550	2900	2900
$C_p(\text{J/Kg}^\circ\text{K})$	820	820	820	620	900	1004	1171
$\lambda(\text{W}/^\circ\text{Km})$	37.65	2.13	3.7656	1.8828	200	1.1715	1.3589
$T_f(^\circ\text{K})$	1809	1809	1803	1812	933	1589	1809
$\Delta H_f(\text{J/kg})$	277400	277400	251040	251040	400000	920480	426768

4.1.1 Modelo de fusión de un material en un baño de su misma composición

En este modelo no existen cambios abruptos de las propiedades fisico-químicas de los materiales, ya que tanto el pelet como el baño metálico son de la misma composición química, y no existen interfases en estado sólido donde el perfil de temperaturas sufra alguna discontinuidad. La solución de este problema se puede obtener ya sea modificando el número de nodos, o bien, variando la distancia Δr entre nodos conforme el sistema cambia de radio con la fusión o solidificación como ya se ha mencionado.

4.1.1.1 Fusión de pelets de hierro puro en un baño de hierro puro

En la Figura 4.1 se comparan los resultados numéricos obtenidos por el modelo con los resultados experimentales obtenidos por Erich (21) para la fusión de un pelet hierro puro de 1.5cm de radio inicial originalmente a 303K y 1473K en su mismo baño a temperatura de 1873 y 1848K respectivamente. Los resultados se grafican como la variación del radio del pelet con el tiempo. Se puede apreciar que la curva que describe la cinética de fusión del pelet de hierro obtenida por el modelo se ajusta de una manera satisfactoria a los puntos medidos experimentalmente desde el momento de la inmersión al baño líquido hasta que se ha fundido totalmente.

El perfil de temperaturas medido y calculado en el centro del pelet durante la fusión del mismo bajo las mismas condiciones que las mostradas en la Figura 4.1, se observa en la Figura 4.2. Se aprecia también un ajuste aceptable del perfil de temperaturas predicho por el modelo (línea sólida) con las mediciones experimentales (símbolos).

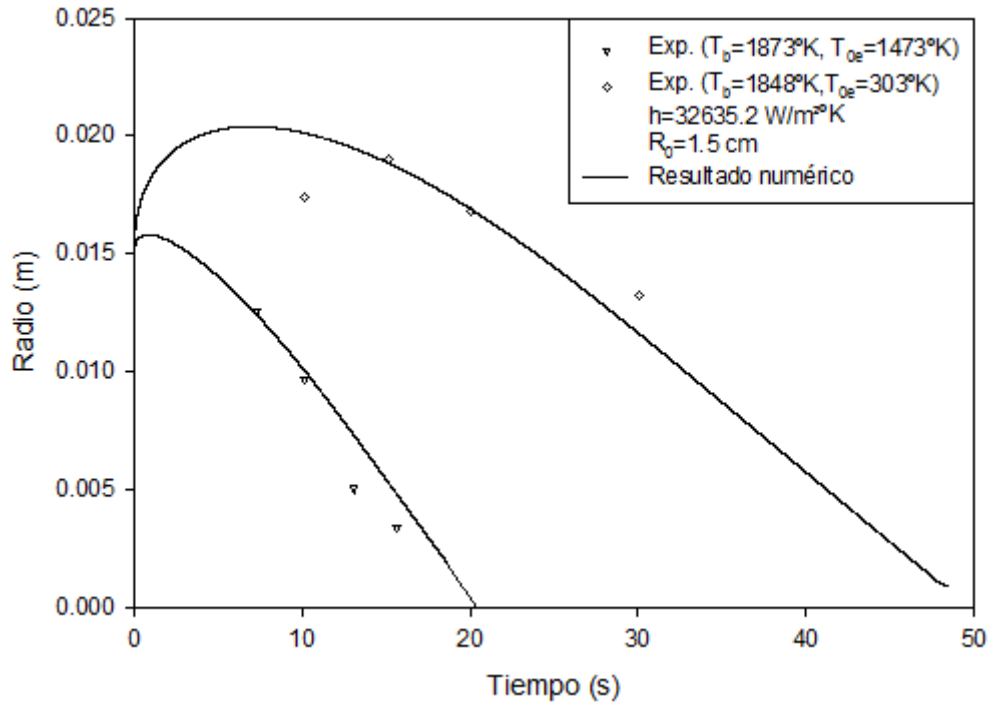


Figura 4.1. Evolución del radio de la esfera con respecto al tiempo para dos condiciones experimentales distintas. Comparación entre el resultado numérico (líneas) y el experimental (puntos) (22).

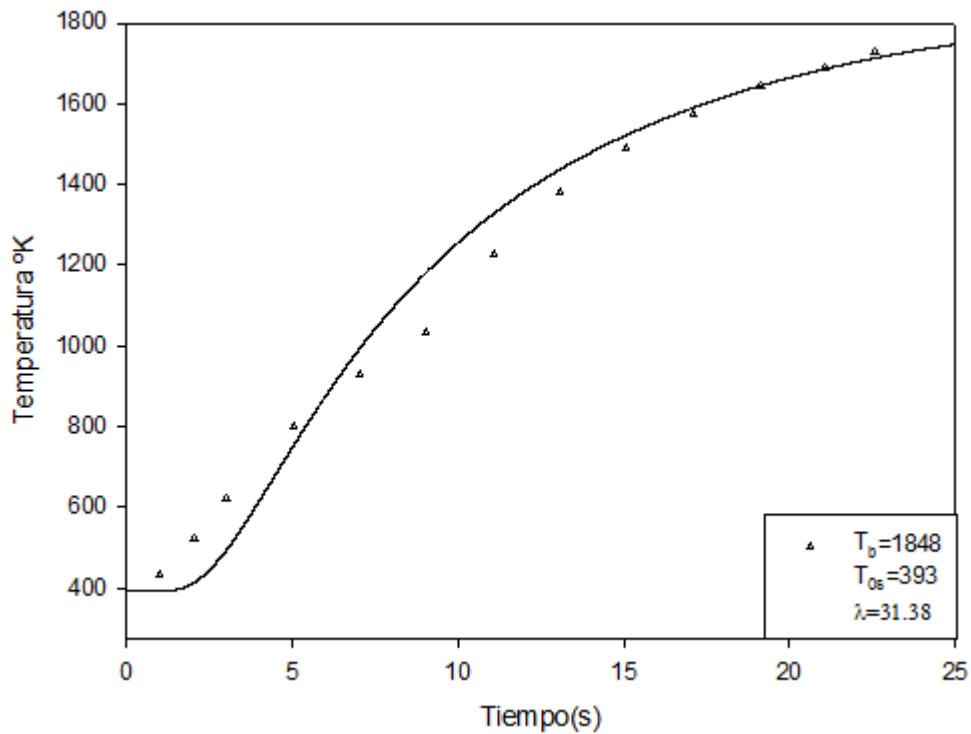


Figura 4.2 Cambio de temperatura en el centro de la esfera con respecto al tiempo. Comparación entre el resultado numérico (línea) y experimental (símbolos) (22).

4.1.1.2 Fusión de pelets de aluminio en un baño de aluminio

Se confirmó la validación del modelo matemático tomando como referencia la fusión de un segundo material. Para ello se utilizaron los datos experimentales obtenidos por Taniguchi (29) para el caso de la fusión de pelets de aluminio puro en un baño de aluminio puro fundido. En la Figura 4.3 se observa como los resultados arrojados por el modelo concuerdan satisfactoriamente con los datos medidos experimentalmente por Taniguchi. Para estos cálculos se utilizó un diámetro de la partícula de 2.38 cm para tres temperaturas diferentes del baño metálico de aluminio. Los valores de las propiedades físicas necesarias para estos cálculos se encuentran en la Tabla 4-1.

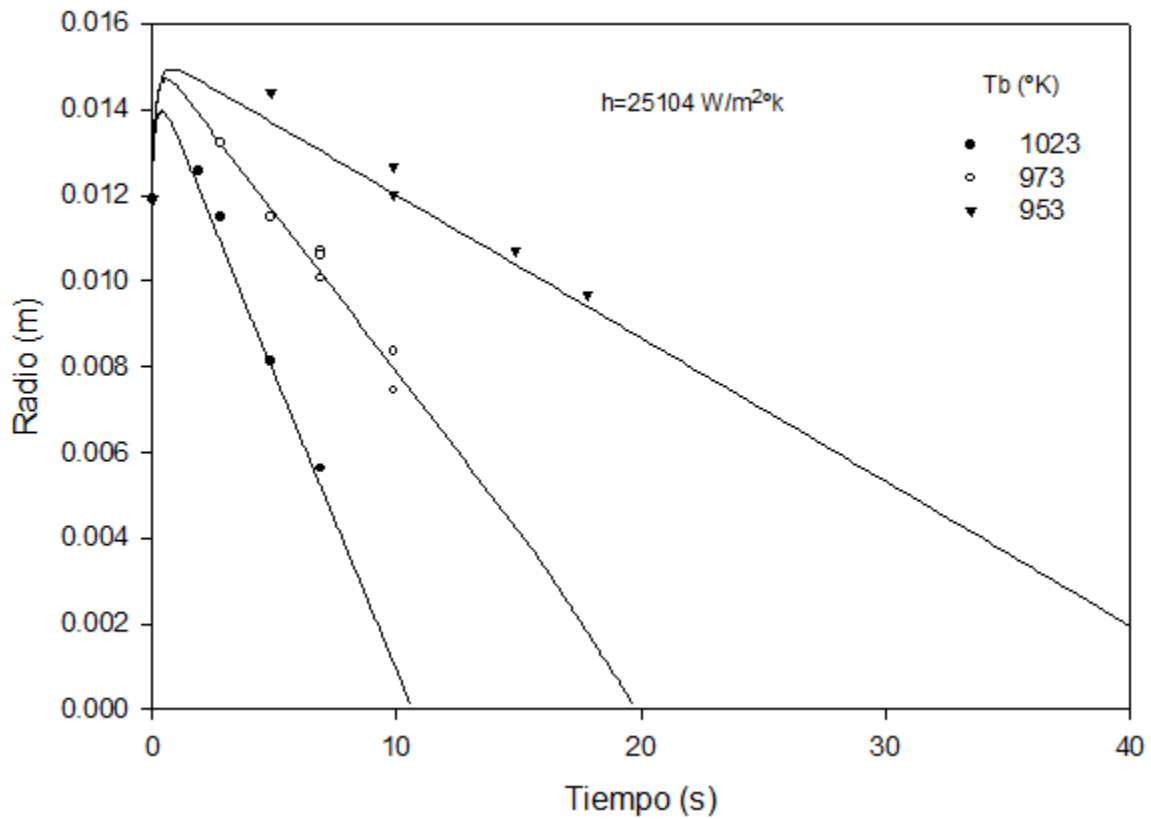


Figura 4.3. Cambio del radio en función del tiempo de un pelet de aluminio de 1.19 cm de radio inmerso en un baño metálico de aluminio fundido a tres temperaturas diferentes. La línea sólida representa los resultados obtenidos con el modelo y los puntos representan los resultados experimentales (29).

4.1.2 Modelo de fusión de un material en un baño de diferente composición química

Para este caso sí existe una interfase en estado sólido entre los dos materiales, por lo tanto, los cambios drásticos de las propiedades físicas conducen al problema ya descrito de la discontinuidad en el perfil de temperaturas. Consecuentemente en este modelo es necesario realizar cálculos adicionales para satisfacer la conservación de energía en la interfase. Este modelo solamente se puede resolver con el algoritmo que aumenta o disminuye nodos cuando el radio cambia y que se describe en el Apéndice C.

4.1.2.1 Solución analítica y numérica de la fusión de hierro esponja en hierro puro

Con el objetivo de asegurar que la solución numérica del modelo sea robusta, se comparó la fusión de hierro esponja en un baño de hierro puro fundido utilizando las soluciones analíticas propuestas por Erich que se mencionan en el capítulo 2.4.2. Las soluciones analíticas son usadas para estimar el tiempo en que funde la coraza, el radio máximo asintótico de la esfera y el radio de la esfera antes y después de la fusión de la coraza, y el tiempo total de fusión de la partícula. En la Figura 4.4 se puede observar como la solución numérica del modelo coincide satisfactoriamente con la solución analítica; las propiedades de ambos materiales se pueden ver en la Tabla 4-1.

Es necesario remarcar que estas soluciones son válidas solo bajo ciertas situaciones límite. Tal es el caso del radio máximo que alcanza la esfera, para el cual se hace la consideración de que las conductividades térmicas tanto la del baño fundido y del pelet son infinitas, por lo que el radio máximo crece instantáneamente desde R_0 hasta R_{max} . Entonces, es de esperarse que el radio máximo calculado con conductividades térmicas finitas se encuentre por debajo del valor del radio máximo analítico, tal y como se observa en la Figura 4.4.

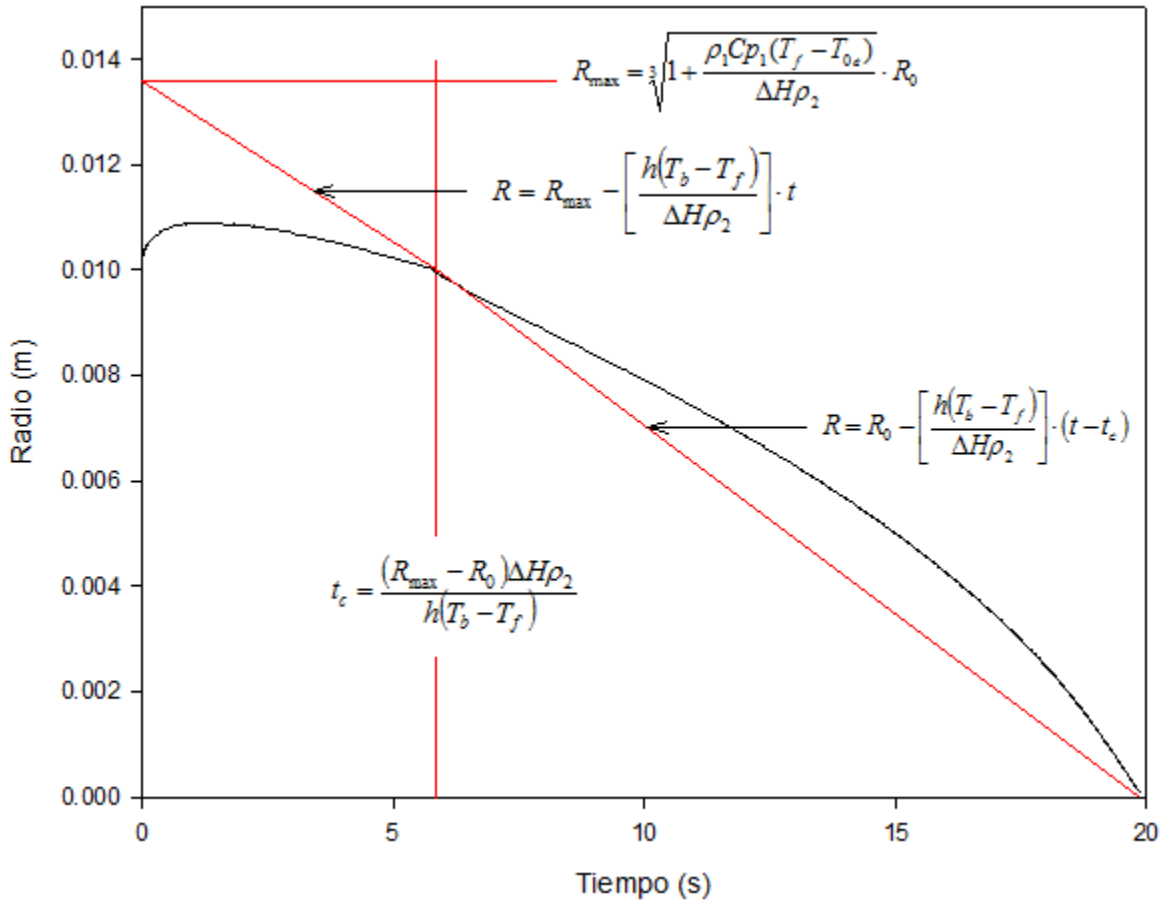


Figura 4.4. Soluciones analíticas y numérica para la fusión de un pelet de hierro esponja de 1cm de radio en un baño de hierro puro fundido a 1843 °K y un coeficiente de transferencia de calor por convección de 27104 W/m²°K.

Una vez comparada exitosamente la solución numérica con soluciones analíticas en la fusión de un material en un baño de diferente composición química, se puede asegurar que el flujo de calor en la interfase se ha igualado y es continuo, por lo tanto, el modelo es correcto.

4.1.2.2 Fusión de hierro esponja en escoria

Finalmente el modelo se validó con resultados experimentales (historias térmicas en el centro del pelet) obtenidos por O'Malley (30) para pelets de hierro esponja LR-1B-1 y LR-2J-1 no reactivos en un baño de escoria 1 como se puede apreciar en las Figuras 4.5 y 4.6. Las curvas obtenidas numéricamente predicen correctamente el historial térmico del hierro esponja en el centro. Las propiedades del hierro esponja y de la escoria se muestran en la Tabla 4-1.

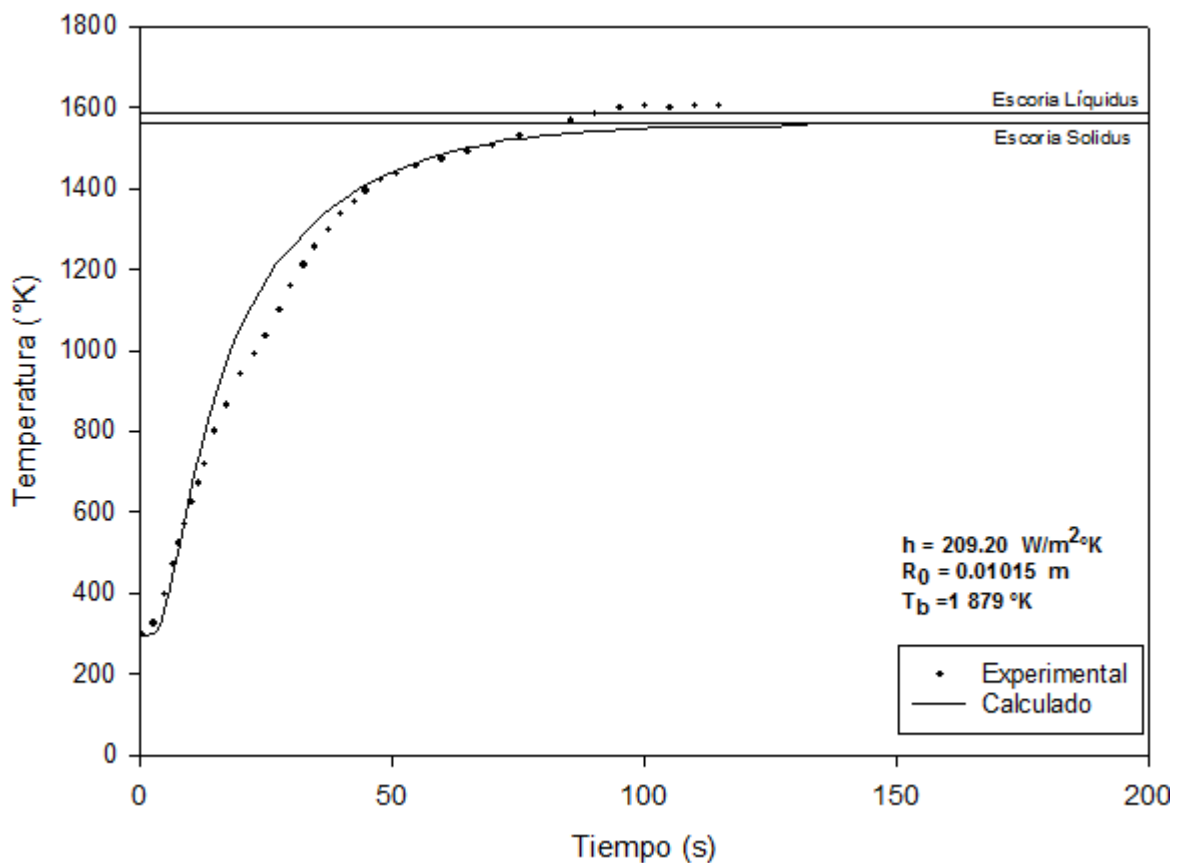


Figura 4.5. Comparación entre los resultados numéricos obtenidos por el modelo con los resultados obtenidos experimentalmente. La gráfica muestra el cambio de la temperatura en el centro del pelet en función del tiempo para un pelet de hierro esponja LR-2J-1 (30).

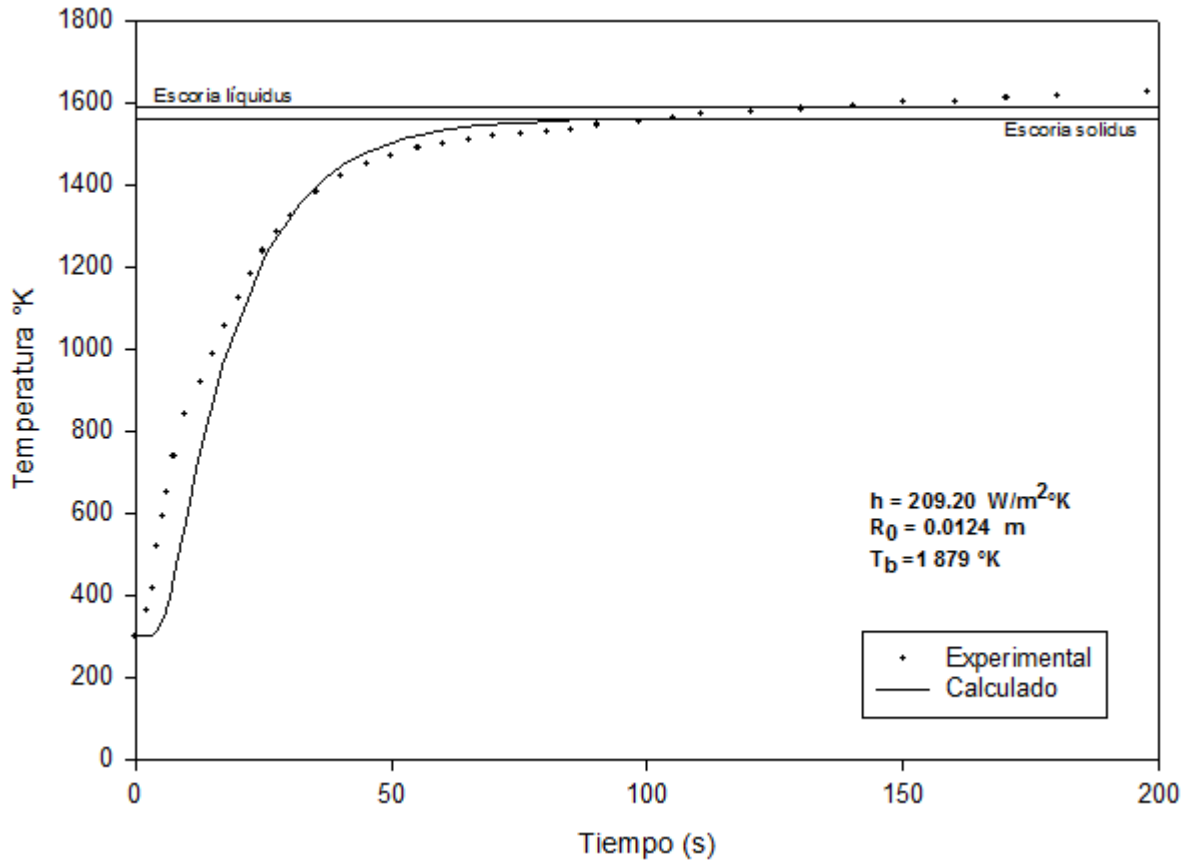


Figura 4.6 Perfil de temperaturas en el centro del pelet de hierro esponja LR-1B-1. Comparación entre los valores calculados por el modelo con los medidos experimentalmente.

En la cercanía de la temperatura solidus de la escoria, el perfil de temperaturas experimental de las Figuras 4.5 y 4.6 cruza por arriba de la temperatura solidus antes de que el modelo prediga la fusión de la coraza de escoria. Esta discrepancia se debe a perturbaciones que ocurren debido a fusión local en la coraza de escoria cuando el gradiente de temperaturas entre la coraza de escoria y el pelet son pequeños (30).

4.2 Predicciones del modelo para la fusión de hierro esponja no reactivo en escoria.

Finalmente una vez que se ha validado satisfactoriamente el modelo se pueden estudiar los principales parámetros que determinan la fusión de hierro esponja no reactivo en un baño de escoria fundida típica del horno de arco eléctrico. Los cálculos de esta sección fueron considerados bajo la premisa de que la fusión del pelet ocurre posterior a la fusión de la coraza de escoria formada, debido a que no se consideran reacciones químicas de transformaciones de fases o de emisión de gases en el seno del pelet que aceleren el calentamiento y fusión del pelet antes de que la coraza desaparezca.

Los cálculos fueron hechos suponiendo un solo pelet de hierro esponja en un baño fundido de escoria con el objetivo de evaluar los efectos de las propiedades del pelet y los cambios en las condiciones del medio sobre la cinética de fusión del pelet. Se estudiaron las siguientes variables:

1. Radio inicial del pelet
2. Porosidad del pelet
3. Densidad del pelet y de la escoria
4. Conductividad térmica del pelet y de la escoria
5. Calor específico del pelet y de la escoria
6. Temperatura del baño de escoria
7. Temperatura inicial del pelet
8. Coeficiente de transferencia de calor por convección

4.2.1 Radio del pelet de hierro esponja

Claramente, el principal parámetro que determina el tiempo de fusión del pelet desde el momento en que entra en contacto con la escoria hasta que se funde por completo, es su tamaño. El tiempo de fusión de los pelets se ve sensiblemente afectado cuando se varía el radio inicial de la partícula; para radios iniciales grandes se tienen tiempos de fusión más grandes y viceversa, a radios iniciales más pequeños se tienen también tiempos de fusión más pequeños. En la Figura 4.7 se muestran curvas de fusión de pelets de diferentes radios iniciales, a través de la presentación de la evolución del radio adimensional del pelet con el tiempo. Este radio adimensional es el radio instantáneo dividido sobre el radio inicial del pelet y se usa este radio para presentar una mejor y más fácil comparación de resultados. Las propiedades físicas del hierro esponja y de la escoria se pueden consultar en la tabla 4-1 para hierro esponja 1 y escoria 1.

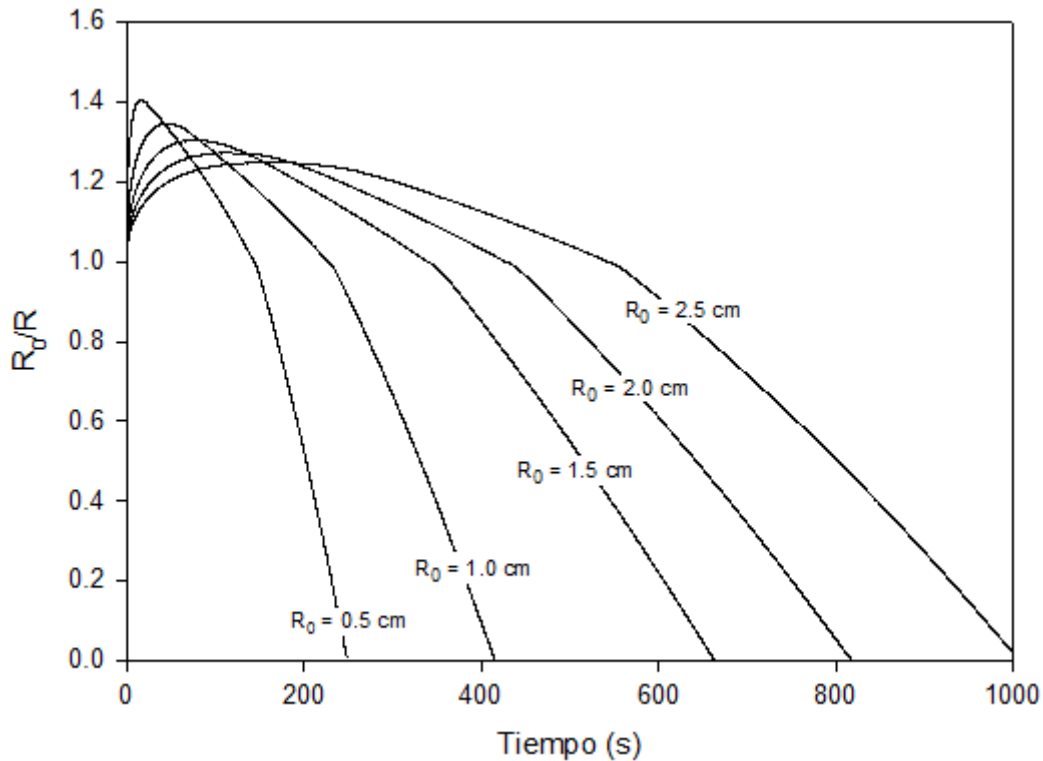


Figura 4.7 Evolución del radio adimensional del pelet de hierro esponja con el tiempo de inmersión en un baño de escoria líquida a 1873°K con un coeficiente de transferencia de calor de $630 \text{ W/m}^2\text{K}$. El pelet se alimenta a temperatura ambiente.

Cuando el radio inicial del pelet aumenta el tiempo de fusión aumenta como se observa en la Figura 4.8. Esto es lógico, ya que a mayor masa, mayor energía se requiere para lograr la fusión y en condiciones iguales de agitación y temperatura del baño, esto se traduce en mayor tiempo de fusión. Al aumentar el tiempo de fusión del pelet, aumenta también el tamaño máximo de la coraza formada, por lo tanto el tamaño de la coraza es también una función del radio inicial de la partícula como se observa en la Figura 4.9. Es muy importante considerar la cantidad de escoria solidificada, puesto que refundirla determina parte de la eficiencia energética del proceso.

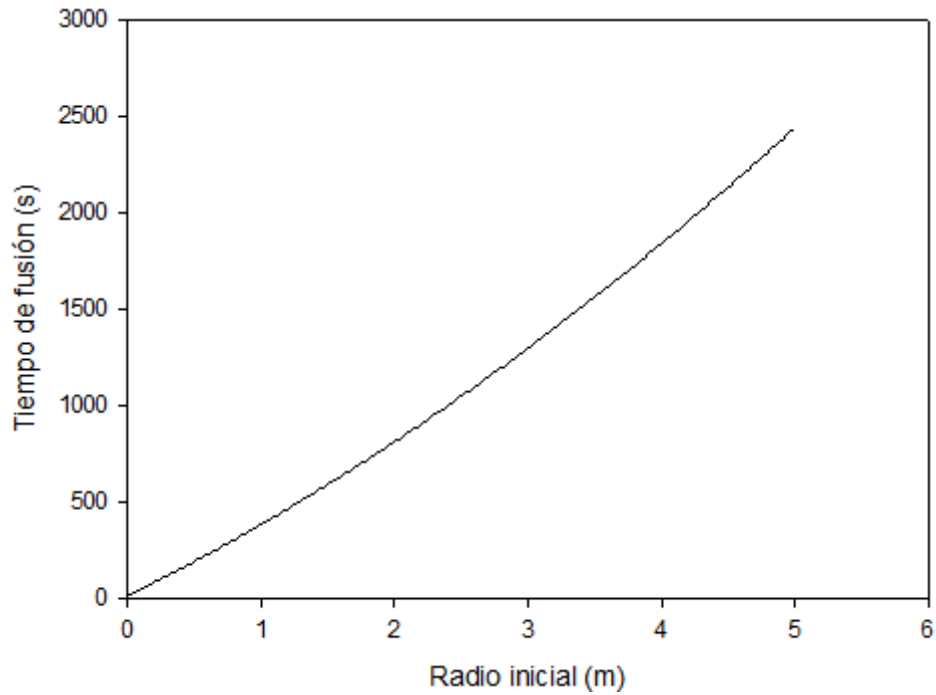


Figura 4.8 Dependencia del tiempo de fusión con el radio inicial del pelet.

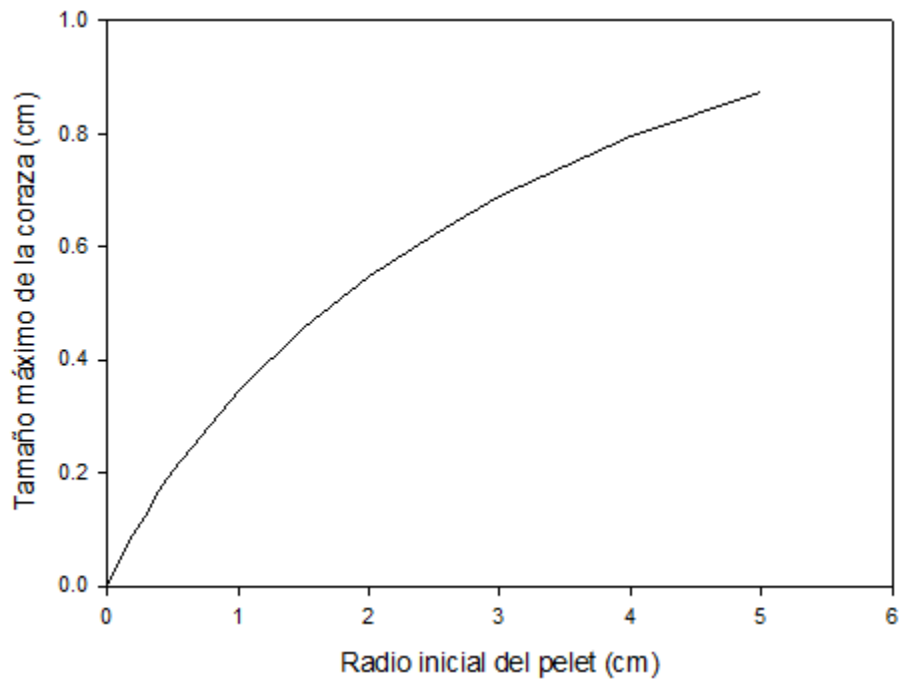


Figura 4.9 Tamaño máximo de la coraza de escoria solidificada como función del radio inicial del pelet de hierro esponja.

Es cierto que entre más pequeño es el radio inicial de la partícula se tiene un tiempo de fusión de la partícula más corto; sin embargo, esto no significa que tener radios más pequeños sea económicamente la mejor opción en condiciones reales de operación en el horno, ni tampoco que la carga de hierro esponja alimentada se funda más rápido, ya que si se tienen partículas más pequeñas el área superficial de la carga es más grande pues se tiene un número mayor de partículas en contacto con la escoria por tonelada de carga, y como consecuencia una masa de escoria solidificada más grande como se muestra en la Figura 4.10.

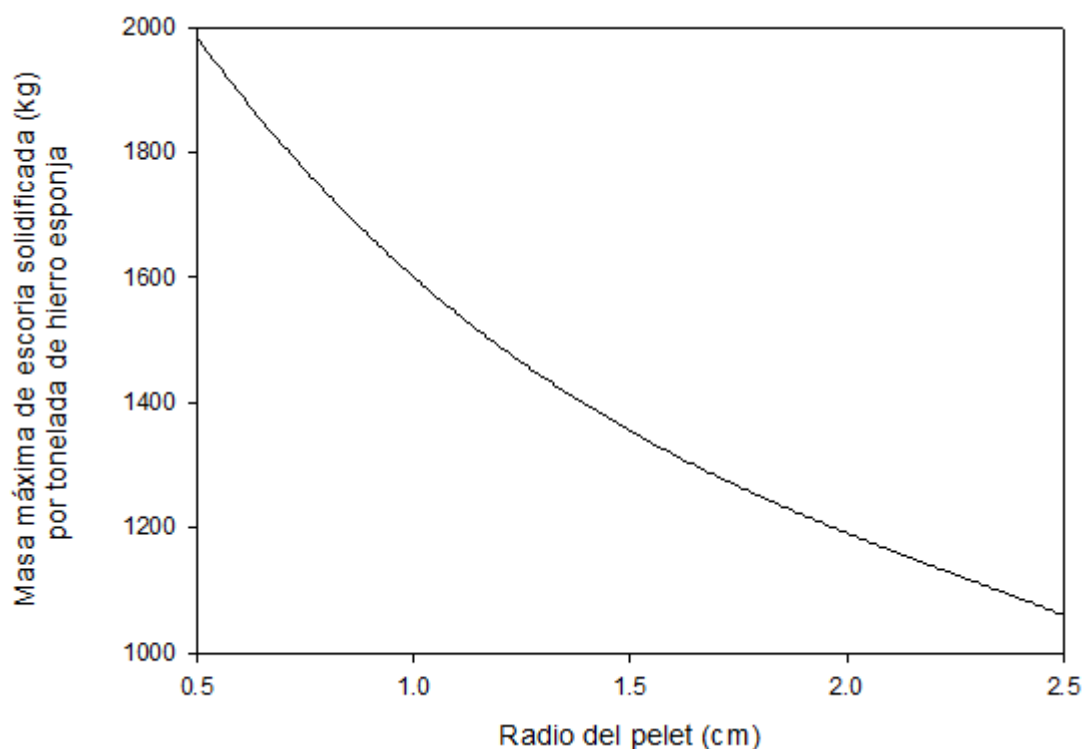


Figura 4.10 Masa máxima de escoria solidificada sobre los pelets por tonelada de hierro esponja de diferentes radios alimentado a una escoria a 1923°K.

El volumen de escoria solidificada puede ser un problema crítico al aumentar la demanda de energía del horno para fundir el pelet y la coraza. En la Tabla 4-2 se puede observar que el calor latente de fusión de la escoria es mucho más grande que el calor de fusión del pelet; esto quiere decir que se requiere más energía para fundir la coraza de escoria que el pelet. Esta energía adicional para fundir a la escoria se puede observar en la Figura 4.11, donde se aprecia como el requerimiento energético para fundir una tonelada de

carga aumenta sensiblemente conforme disminuye el radio inicial del pelet. Estos resultados representan el caso hipotético de una tonelada de pelets que son alimentados al baño de escoria donde se forma libremente la coraza en la periferia de cada pelet, sin embargo, las condiciones reales son diferentes, ya que los pelets en la escoria se aglomeran y forman colonias impidiendo cuantificar la cantidad total real de escoria solidificada. A pesar de esto, se puede concluir que alimentar pelets pequeños implica mayor gasto energético para fundir la carga y cuando el radio es muy pequeño (finos), el pelet puede ser arrastrado por los gases del horno que son continuamente extraídos del mismo sin siquiera tocar la escoria. El ahorro de la energía consumida entre la fusión de una tonelada de pelets grandes de 2.5cm con respecto a pelets finos de 0.5cm de radio es del 42% (de 1479 MJ a 859 MJ), representando aproximadamente unos 172 KWh/ton de acero para una colada convencional de una hora. Si tomamos en cuenta que un horno moderno consume alrededor de 480 kWh/Ton fundiendo HRD (34), queda claro que se puede ahorrar mucha energía y por lo tanto hacer tremendamente eficiente al proceso si se funden pelets más grandes, aunque se debe de tomar en cuenta que los pelets no necesariamente están separados unos de otros, que son reactivos y por lo tanto las reacciones que suceden dentro de estos ayudan a la fusión y que no necesariamente están siempre en contacto con la escoria, pudiendo tocar en algún momento el baño de acero líquido. La cantidad de energía para fundir un pelet de diferentes radios y otros valores importantes se pueden consultar en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Resultados obtenidos por el modelo de la energía necesaria para fundir una tonelada de hierro esponja en escoria fundida utilizando pelets de diferentes radios.

R_0 (cm)	Masa (g)	R_{max} (cm)	Número de pelets por tonelada	Masa de escoria solidificada por partícula (g)	Masa de escoria solidificada por tonelada (kg)	Energía necesaria para fundir una tonelada de HRD (MJ)
0.5	1.36	0.7029	734560	2.7014	1984.35	1478.948413
1	10.89	1.3448	91820	17.3991	1597.59	1239.710473
1.5	36.75	1.9559	27206	49.90	1357.72	1075.730681
2	87.12	2.5469	11477	103.5	1188.04	958.467224
2.5	170.1	3.1236	5876	180.4	1060.21	858.74802

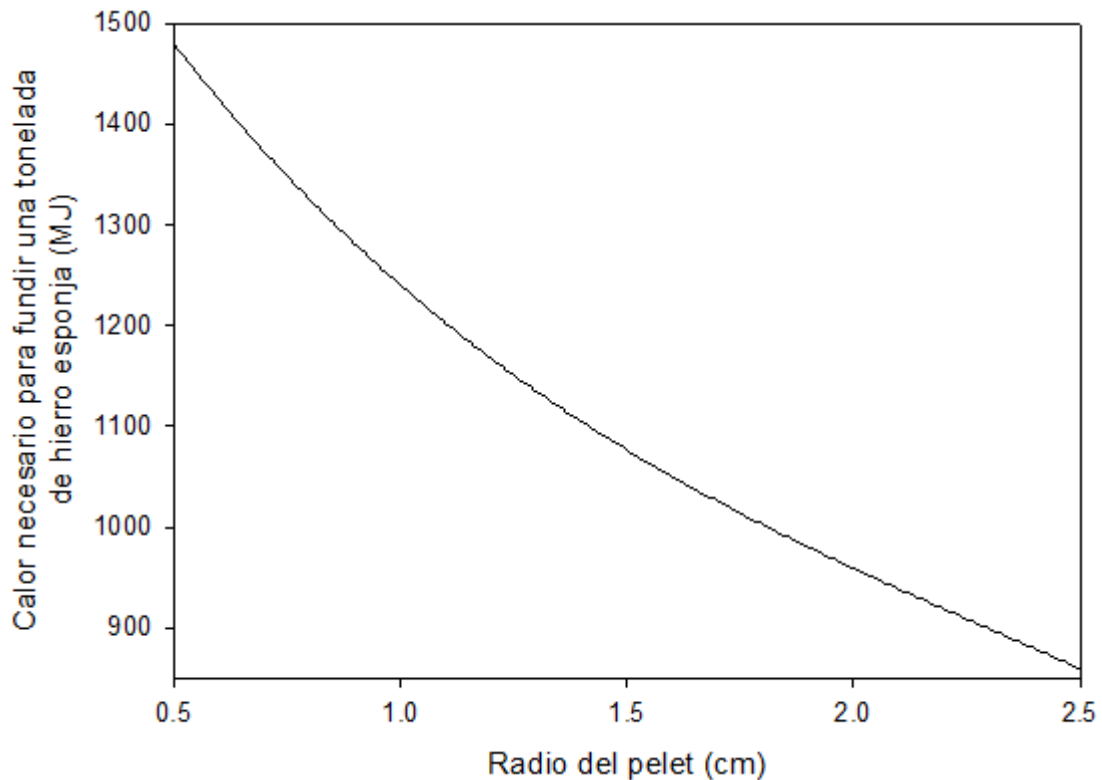


Figura 4.11 Calor necesario para fundir una tonelada de pelets a diferentes radios iniciales del pelet.

4.2.2 Influencia de las principales propiedades físicas del hierro esponja en la cinética de fusión de la partícula.

Las principales propiedades físicas y del hierro esponja que determinan su tiempo de fusión en la escoria son: porosidad, densidad, calor específico y conductividad térmica. Sin embargo, también deben tomarse en cuenta otras propiedades importantes como su punto de fusión o los calores latentes de solidificación y fusión. En este apartado se analizarán de qué manera afecta la variación de estos parámetros a la cinética de fusión de las partículas.

4.2.2.1 Porosidad del hierro esponja

Una de las propiedades físicas más importantes del hierro esponja es su porosidad, ya que de la porosidad depende la conductividad térmica y la densidad del pelet. Para determinar la porosidad del pelet es necesario conocer la fracción de volumen de cada componente Y_i que lo conforma, para esto se utiliza la expresión 4-1.

$$Y_i = X_i (\rho_{pelet} / \rho_i) \quad (4-1)$$

Donde

- ρ_{pelet} es la densidad del pelet
- ρ_i es la densidad del componente i
- X_i es la fracción en peso del componente i.

La porosidad (Po) del pelet se calcula de la siguiente manera:

$$Po = 1 - \sum_i Y_i \quad (4-2)$$

4.2.2.1.1 Efecto de la porosidad en la densidad del pelet.

Conforme aumenta la porosidad del pelet su masa disminuye, es decir, el volumen del sustrato de hierro esponja cada vez es menor y el volumen de huecos mayor, y como resultado la densidad del pelet disminuye a consecuencia de que aumenta la porosidad del pelet. Se puede despreciar la densidad de los poros y calcular la densidad del pelet como una función lineal de la porosidad, esto se puede representar con la ecuación 4-3.

$$\rho_{pelet} = \rho_s (1 - Po) \quad (4-3)$$

Donde ρ_s es la densidad del sustrato que para este caso tiene un valor de 7837.2 kg/m^3 . En la Figura 4.12 se muestra como cambia la densidad del pelet conforme cambia la porosidad. Las propiedades del pelet en cuestión se pueden observar en la Tabla 4-1 para el caso de fusión de pelets no reactivos LR-2J-1 inmerso en escoria 1.

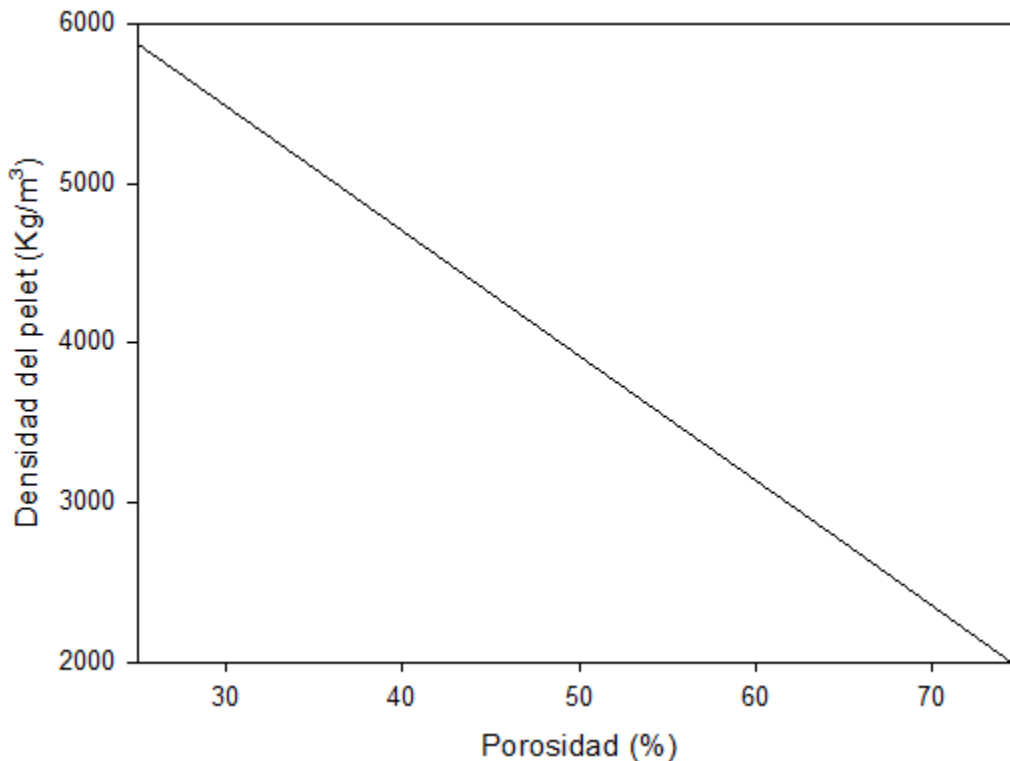


Figura 4.12 Dependencia de la densidad del pelet con la porosidad.

4.2.2.1.2 Efecto de la porosidad en la conductividad térmica del pelet.

La conductividad térmica del hierro esponja es una propiedad que juega un papel muy importante para determinar la rapidez del calentamiento del pelet. En la literatura existen valores de la conductividad térmica del hierro esponja obtenidos experimentalmente (35), de acuerdo con estos datos el coeficiente de conductividad térmica del hierro esponja oscila en un rango de valores de 1.25 a $5.02 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ por debajo de los 700°C , y por arriba de 700°C aumenta gradualmente hasta $16.7 \text{ W/m}^\circ\text{K}$.

Existen correlaciones empíricas desarrolladas para relacionar la porosidad de un sólido poroso con su conductividad térmica efectiva. Una correlación que es ampliamente aceptada para predecir la conductividad térmica efectiva de sólidos metálicos porosos, es la propuesta por Koh y Fortini (36) quienes proponen la expresión 4-4.

$$\lambda_{efectiva} = \lambda_S \frac{(1 - PO_{pelet})}{(1 + nPO_{pelet})} \quad (4-4)$$

Donde λ_S es la conductividad térmica del sustrato, reportada para este caso de hierro LR-2J-1 como 38.91 W/m°K (30) y n es una constante que es igual a 11 para polvos metálicos sinterizados.

En la Figura 4.13 se muestra la conductividad térmica calculada con la expresión 4-4 como una función de la porosidad del pelet. Cuando la porosidad del pelet disminuye la conductividad térmica aumenta, la razón es que se tiene una masa más grande y compacta y consecuentemente el calor puede fluir más rápidamente y de una manera más uniforme en el pelet.

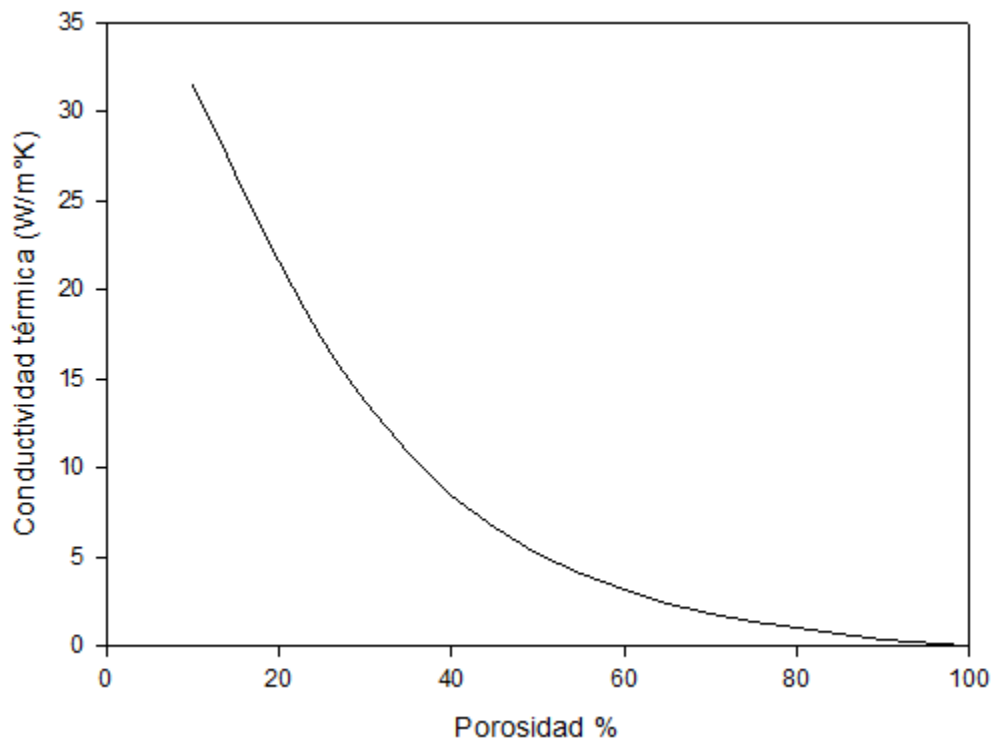


Figura 4.13 Efecto de la porosidad en la conductividad térmica del pelet de hierro esponja.

4.2.2.1.3 Efecto de la porosidad en el tiempo de fusión del pelet.

Una vez conocida la relación que existe entre la densidad, la conductividad térmica y la porosidad, se puede conocer la cinética de fusión del pelet a diferentes porosidades. Para realizar estos cálculos, se consideró una porosidad en un rango de un 25 a 75 % del volumen del pelet, que son los valores comúnmente más encontrados en pelets de hierro esponja comercial.

A pesar de que a menor porosidad se tiene una mayor conductividad térmica del pelet, el tiempo de fusión aumenta como se observa en la Figura 4.14, esto se debe a que se tiene más masa de material que fundir. Al aumentar el tiempo de fusión del pelet con el descenso de la porosidad aumenta también la duración de la etapa de la coraza, y se tiene una cantidad mayor de escoria solidificada como se observa en la Figura 4.15.

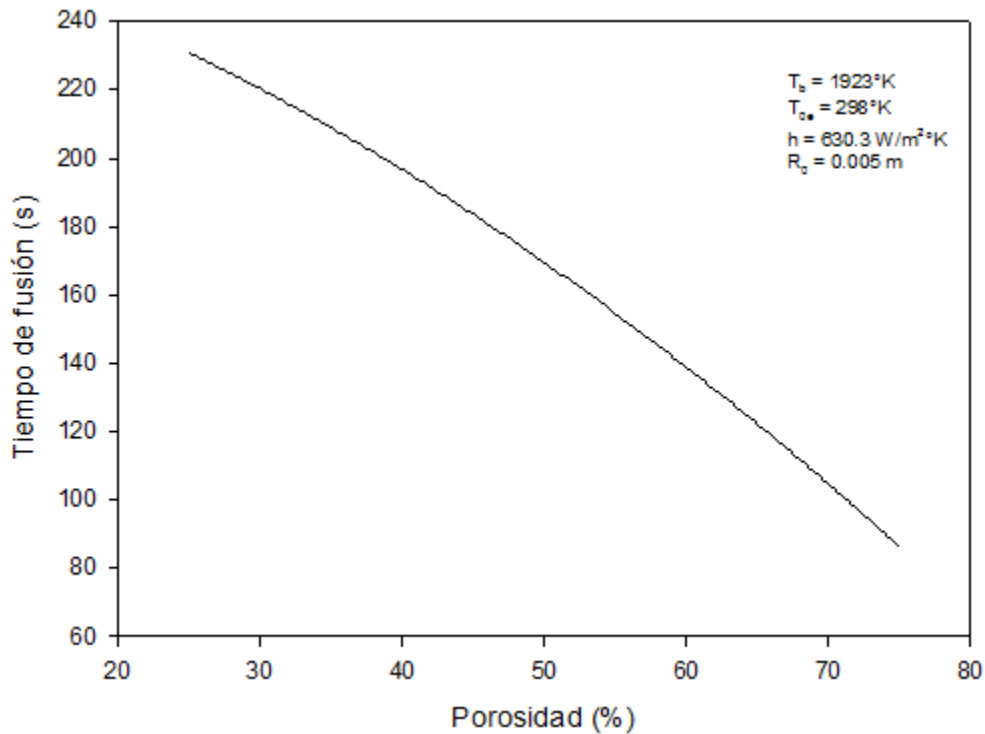


Figura 4.14 Dependencia del tiempo de fusión del pelet con la porosidad.

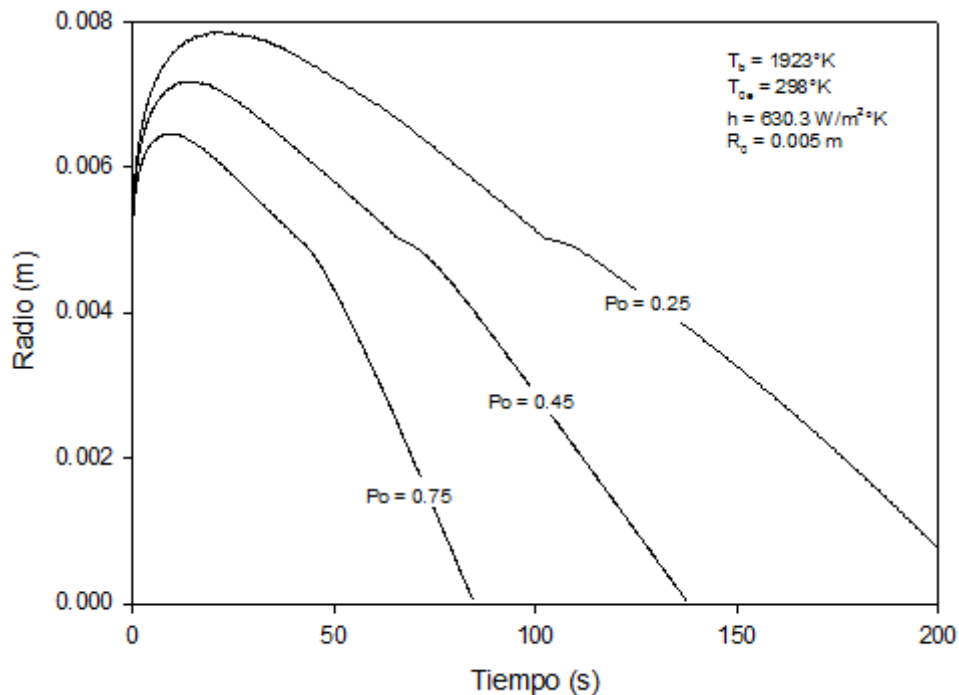


Figura 4.15 Evolución del radio de la partícula con el tiempo a diferentes porosidades.

La cantidad de escoria solidificada nuevamente es la limitante para la eficiencia del consumo de energía para fundir las partículas en el horno. Cuando la porosidad del pelet es grande se tiene un mayor número de partículas por tonelada de carga de hierro esponja como lo muestran los valores de la Tabla 4-3, esto quiere decir que aunque la cantidad de escoria solidificada por pelet sea menor cuando la porosidad es alta, cuando se cuantifica por tonelada de HRD alimentado resulta en una masa mayor de escoria solidificada que consecuentemente se reflejará en el aumento del consumo de energía. En la Figura 4.16 se observa como aumenta la cantidad de escoria solidificada por tonelada de carga de hierro esponja cuando el valor de la porosidad del pelet es mayor y en la Figura 4.17 se aprecia como este aumento del volumen de escoria solidificada se refleja en la demanda de calor para fundir la carga.

La diferencia de consumo de energía para fundir una tonelada de pelets porosos (75%) contra pelets densos (25% de porosidad) es de 1424 MJ a 1133 MJ, lo cual representa aproximadamente unos 80 kWh/Ton, es decir, la porosidad no es tan significativa como el tamaño del pelet y se puede afirmar que solo porosidades arriba del 50% afectan negativamente al consumo de energía (ver Figura 4.17). Sin embargo, debemos acotar los resultados teóricos a pelets que no se aglomeran y que están inmersos en escoria líquida, aunque para el caso de pelets poco porosos esto no ocurrirá, ya que se hundirán en el baño de acero por su elevada densidad, mientras que los pelets muy porosos, probablemente floten sobre la capa de escoria, retardando aún más su cinética de fusión.

Tabla 4-3. Valores calculados del consumo de la energía requerida para fundir una tonelada de pelets de diferentes porosidades.

P_0 (%)	Masa (g)	R_{max} (cm)	Número de pelets por tonelada	Masa de escoria solidificada por partícula (g)	Masa de escoria solidificada por tonelada (kg)	Energía necesaria para fundir una tonelada de HRD (MJ)
25	3.0776	0.7849	324929	4.3555	1415.22	1132.876145
35	2.6673	0.7651	374911	3.9220	1470.43	1143.654191
45	2.2569	0.7440	443086	3.4842	1543.80	1192.625512
55	1.8469	0.7173	541448	2.9647	1605.23	1213.731495
65	1.4362	0.6850	696282	2.3860	1661.32	1319.556924
75	1.025	0.6462	975610	1.7594	1716.48	1423.893039

En resumen, alimentar pelets de hierro esponja con alta porosidad representa una mayor inversión de energía para fundir la carga y como los pelets muy porosos difícilmente tocarán el baño de acero lo cual también perjudica a la eficiencia energética del proceso y para compensar la energía que se le extrae al baño de escoria para refundir las costras de escoria se tendría que aumentar la potencia de los electrodos para evitar que la temperatura del baño de escoria baje, condición que es indeseable.

El hecho de que los pelets porosos fundan más rápido que los densos en escoria, podría implicar una disyuntiva en cuestiones económicas, pues de un lado se tendría una colada más rápida pero energéticamente más costosa, y del otro una colada más económica pero más prolongada.

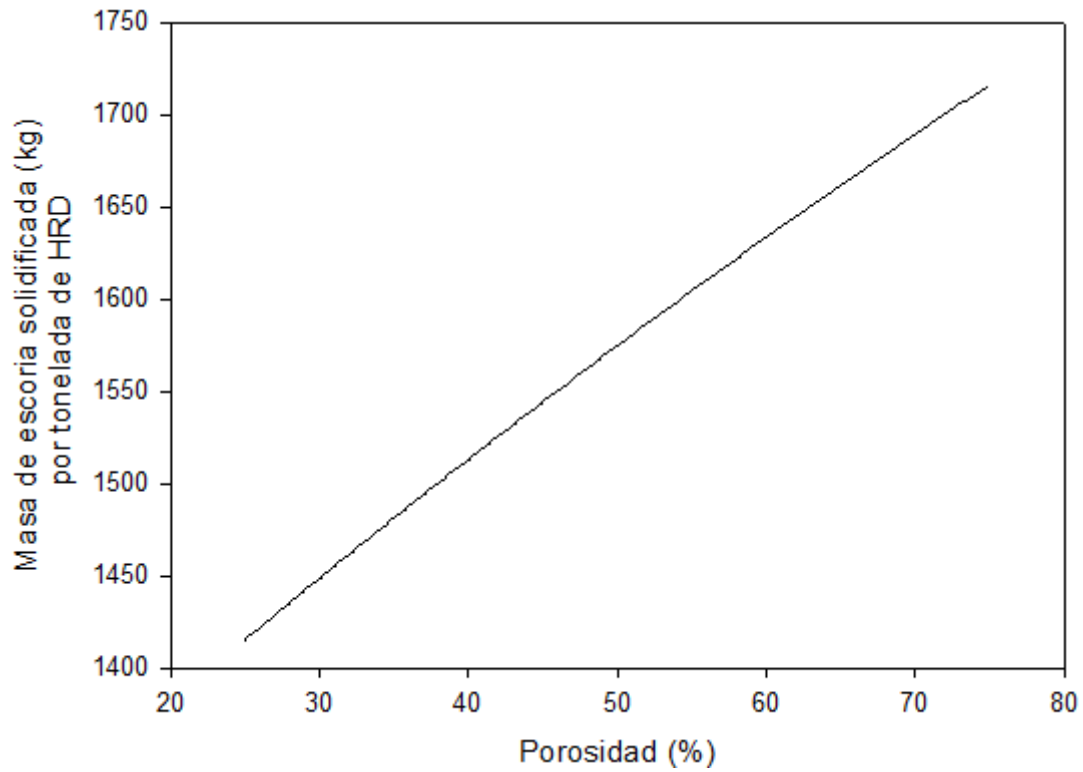


Figura 4.16 Cantidad de escoria solidificada por tonelada de pelet de hierro esponja en función de la porosidad del HRD.

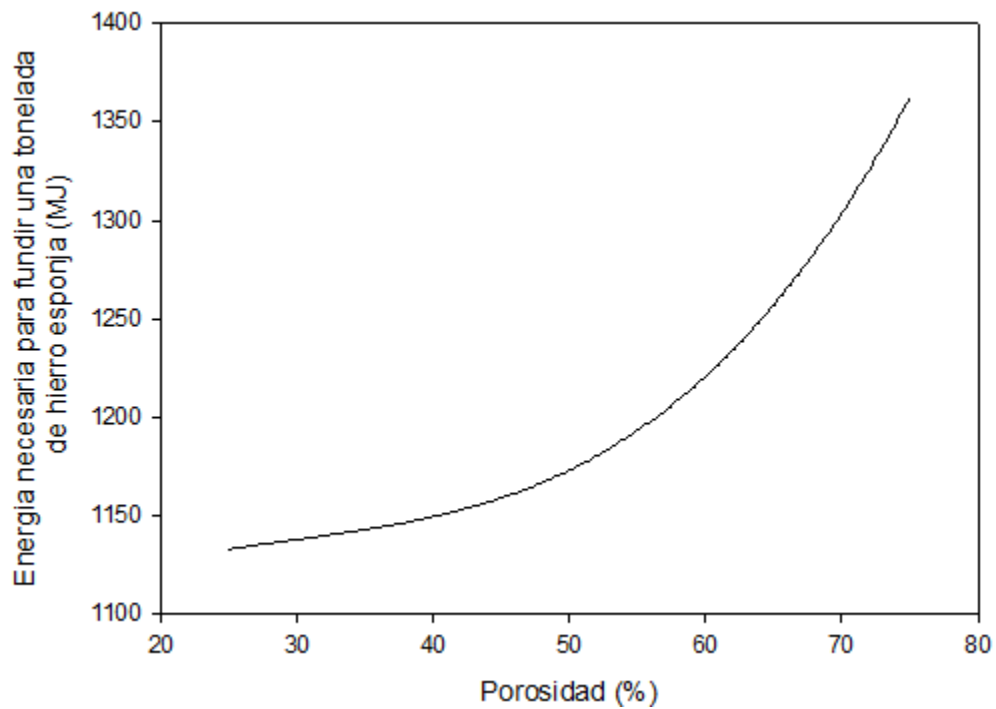


Figura 4.17 Energía necesaria para fundir una tonelada de hierro esponja en escoria en función de la porosidad del HRD.

4.2.2.3 Efecto del calor específico

El calor específico del pelet de hierro esponja es otro parámetro importante que estudiar, esta propiedad depende de la composición química del pelet ya que la ganga contiene muchas impurezas de alto punto de fusión y alta capacidad calorífica. Si aumenta el calor específico del pelet aumenta también su tiempo de permanencia en la escoria como se observa en la Figura 4.18. Se puede apreciar que la etapa de la coraza aumenta considerablemente al aumentar el calor específico del pelet, lo que tiene como consecuencia mayores cantidades de escoria solidificada por tonelada de hierro esponja alimentado a la escoria. En la Figura 4.19 se muestra la relación que describe la dependencia entre el tiempo de fusión de la partícula y el calor específico del hierro esponja. El tiempo de fusión de la partícula aumenta linealmente al aumentar el calor específico del pelet.

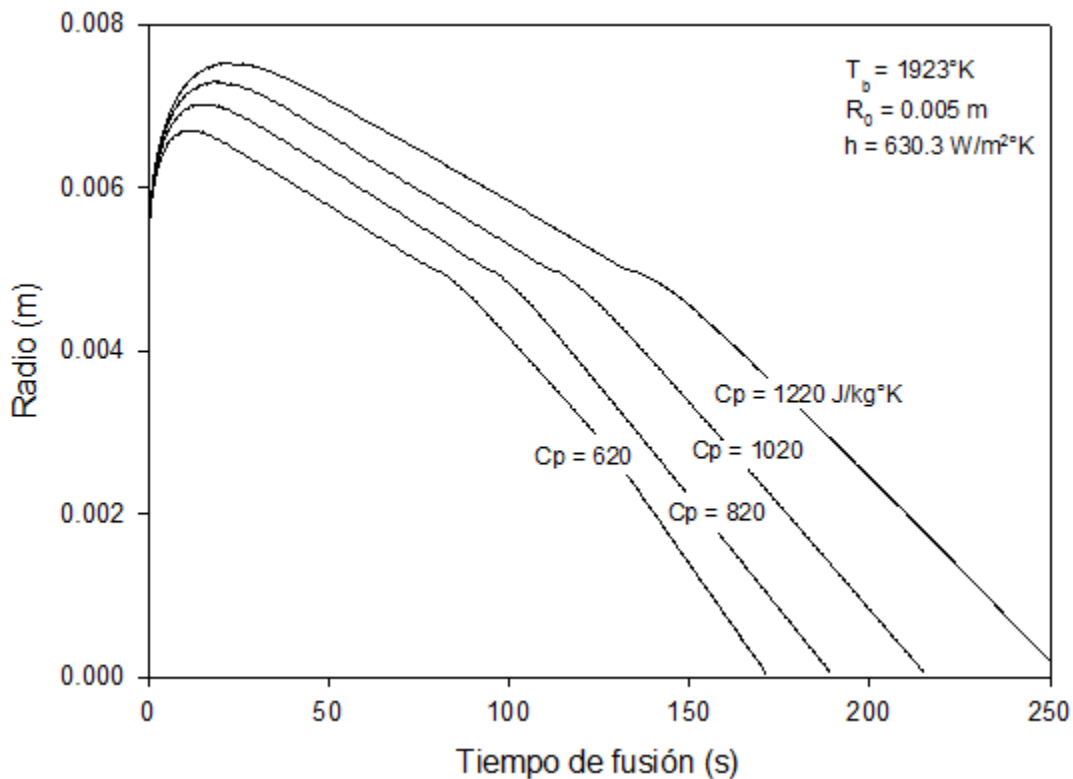


Figura 4.18 Evolución del radio del pelet con el tiempo para cuatro pelets con diferente calor específico. Para estos cálculos se utilizó hierro esponja 1 en escoria 1, sus propiedades se pueden consultar en la Tabla 4-1.

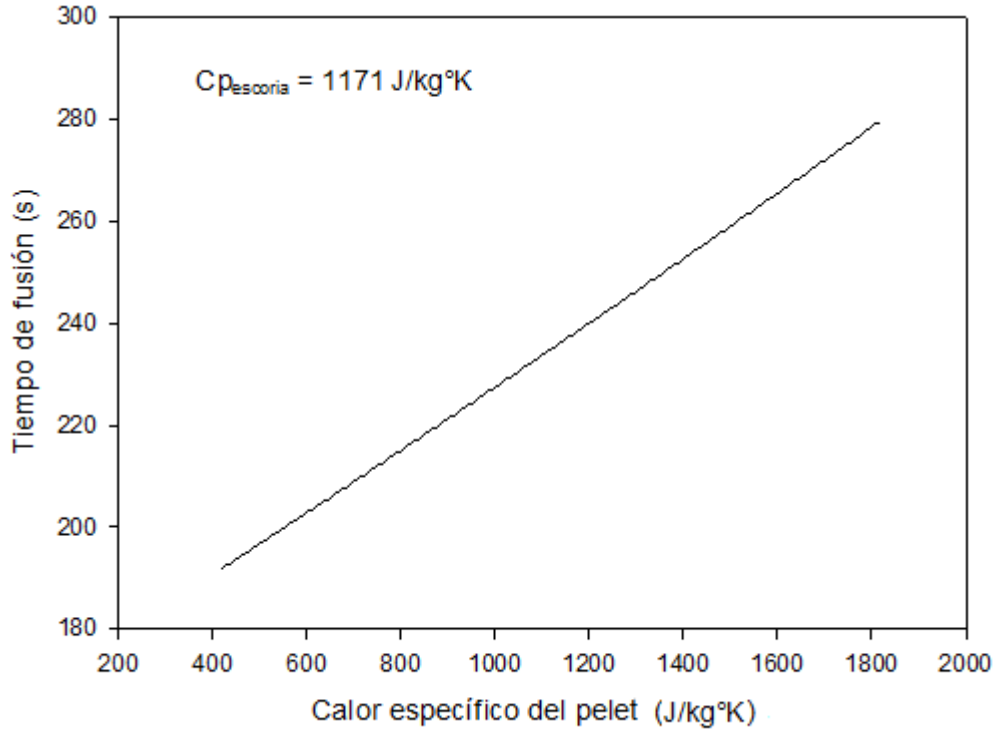


Figura 4.19 Dependencia del tiempo de fusión de la partícula con el calor específico del pelet de hierro esponja.

En la Tabla 4-4 se puede ver que si el calor específico del pelet es grande se tienen grandes cantidades de escoria solidificada, de la misma manera aumenta la energía necesaria para fundir la carga. Este cambio en el requerimiento energético es muy marcado, pasando de 1366 MJ para un C_p del DRI de 620 J/(kg°K) a 2302 MJ con un C_p de 1620 J/(kg°K), lo que representa un aumento de 40% que equivalen a unos 260 kW-h/Ton.

En la Figura 4.20 se observa cómo cambia la demanda energética para fundir una tonelada de hierro esponja cuando su calor específico aumenta. Así que sin lugar a dudas la recomendación para fundir hierro esponja de una manera más eficiente y económica, es evitar altos contenidos de impurezas en el pelet que ocasionen que se eleve el valor de este parámetro que de ser grande causará coladas más duraderas y energéticamente costosas.

Tabla 4-4. Valores estadísticos para el cálculo de la energía para fundir un pelet de diferentes calores específicos.

Calor específico del pelet (J/kg°K)	R _{max} (cm)	Masa de escoria solidificada por partícula (g)	Masa de escoria solidificada por tonelada (kg)	Energía necesaria para fundir una tonelada de HRD (MJ)
620	0.67107	1.9299	1.4176	1365.547040
820	0.70336	2.4282	1.7836	1479.851922
1020	0.73136	2.8991	2.1295	1664.079570
1220	0.75439	3.3144	2.4346	1850.773990
1420	0.77618	3.7314	2.7409	2066.405427
1620	0.79537	4.1185	3.0252	2302.140422

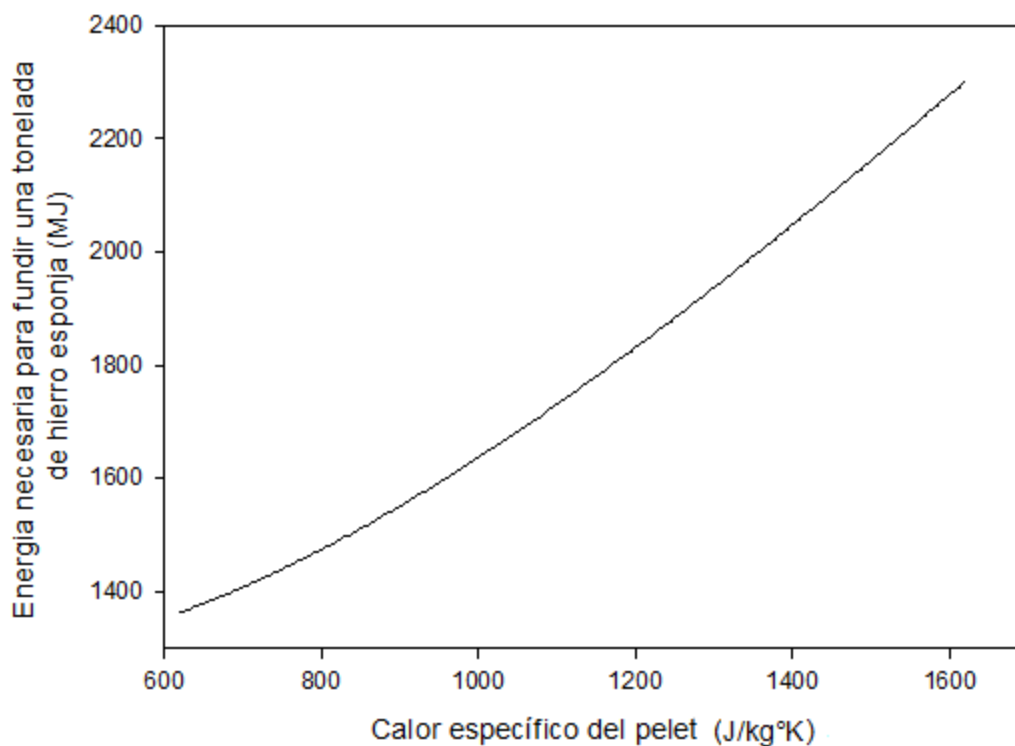


Figura 4.20 Energía necesaria para fundir una tonelada de hierro esponja en escoria variando el calor específico del pelet.

4.2.3 Influencia de las propiedades físicas de la escoria en la cinética de fusión de la partícula.

A lo largo de este capítulo se ha demostrado que la formación de la coraza de escoria es el principal factor limitante para la eficiencia y el ahorro de energía para fundir la carga. En esta sección se analiza resumidamente el efecto que tienen las propiedades de la escoria en la cinética de fusión del pelet. Las propiedades físicas analizadas son la conductividad térmica, la densidad y su calor específico.

4.2.3.1 Efecto de la conductividad térmica de la escoria

La variación de la conductividad térmica de la escoria no propicia cambios significativos en el tiempo de fusión del pelet de hierro esponja como se puede apreciar en la Figura 4.21a). Sin embargo, se observa en la figura 4.21b) que la formación de la coraza muestra un comportamiento diferente para cada caso. En el caso de una conductividad térmica mayor se observa que la coraza crece rápidamente llega a un máximo y después funde rápidamente, también forma una coraza de mayor tamaño. En el caso contrario con una conductividad menor en la escoria se observa una solidificación y fusión más lenta de la coraza, a pesar de esto para ambos casos el tiempo de fusión del pelet es muy similar. A mayor conductividad, mayor es el choque térmico y por eso crece más la coraza, pero al transferir mejor el calor, esta se funde pronto.

A pesar de que el tiempo de fusión no cambia significativamente al aumentar la conductividad térmica de la escoria, es imprescindible considerar el tamaño de la coraza. Si se parte de la premisa de que es indeseable solidificar escoria debido al alto consumo de energía en su refusión, entonces se debe de cuidar que la conductividad térmica de la escoria se mantenga en valores lo más pequeños posibles siempre y cuando no afecte el tiempo de fusión de la partícula. Se utilizaron para estos cálculos las propiedades del hierro esponja 1 y la escoria 1 que aparecen en la Tabla 4-1.

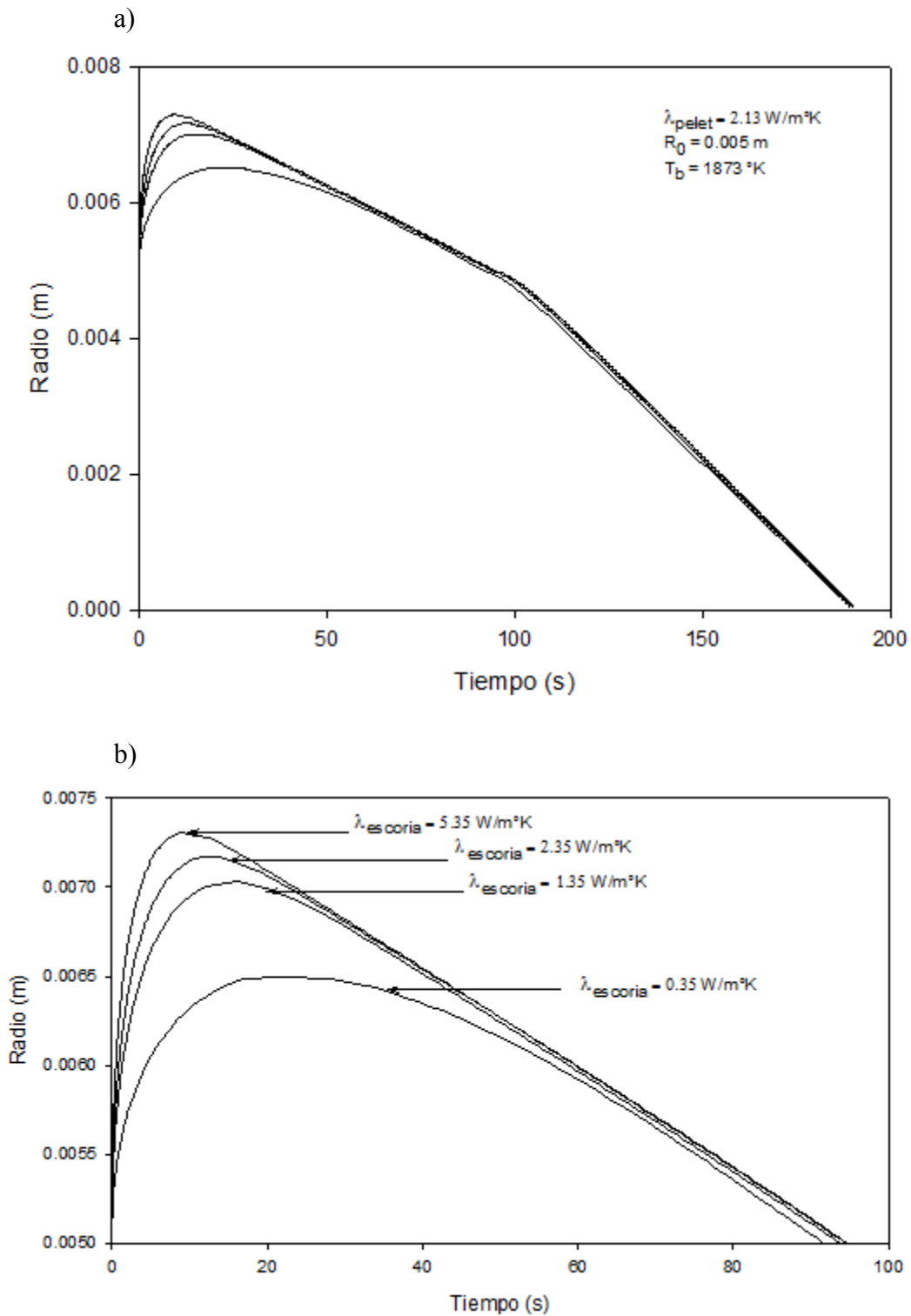


Figura 4.21 a) Evolución del radio del pelet de hierro esponja con el tiempo. Se muestran cuatro curvas de fusión a diferentes conductividades térmicas de la escoria. b) Magnificación de la etapa de la coraza de las mismas curvas anteriores.

4.2.3.2 Efecto de la densidad de la escoria

Es importante considerar la densidad del baño de escoria, puesto que el tiempo de fusión del pelet se ve afectado también este valor. En la Figura 4.22 se puede apreciar que el tiempo de fusión de la partícula aumenta monótonamente conforme aumenta la densidad del pelet y además aumenta también al aumentar la densidad de la escoria. Si la densidad de la escoria es grande, se formarán corazas mayores y la influencia de la etapa de la coraza será cada vez más marcada en la cinética de fusión de la partícula.

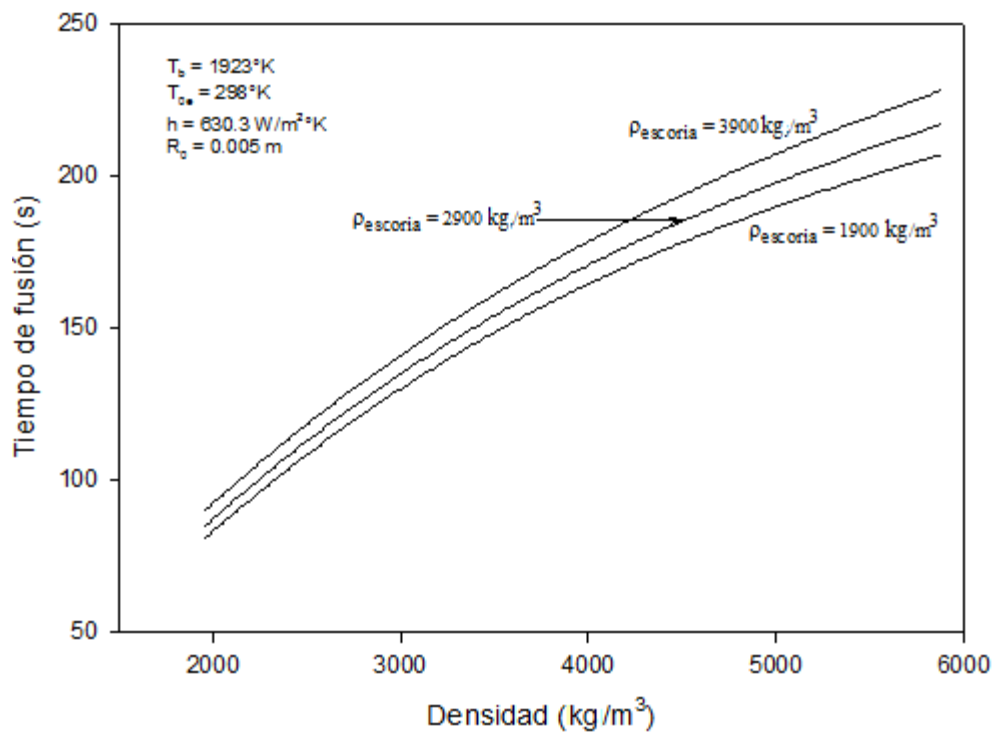


Figura 4.22 Tiempo de fusión del pelet a diferentes densidades de la escoria y el pelet

4.2.3.3 Efecto del calor específico de la escoria

Si el calor específico de la escoria sólida cambia, el tiempo de fusión del pelet se ve afectado como se puede apreciar en la Figura 4.23. Se observa que el tiempo de fusión aumenta cuando que el calor específico es mayor. La etapa de la coraza también se favorece al aumentar el calor específico de la escoria, la razón es que cuando el calor específico es muy grande la transferencia de calor en la región de la coraza es más lenta y por lo tanto la región de la coraza cada vez es más larga y dominante en la cinética de fusión del pelet. De nuevo se presenta el caso de grandes masas de escoria solidificada por carga de hierro esponja, por lo tanto sería favorable tener escorias con calores específicos pequeños.

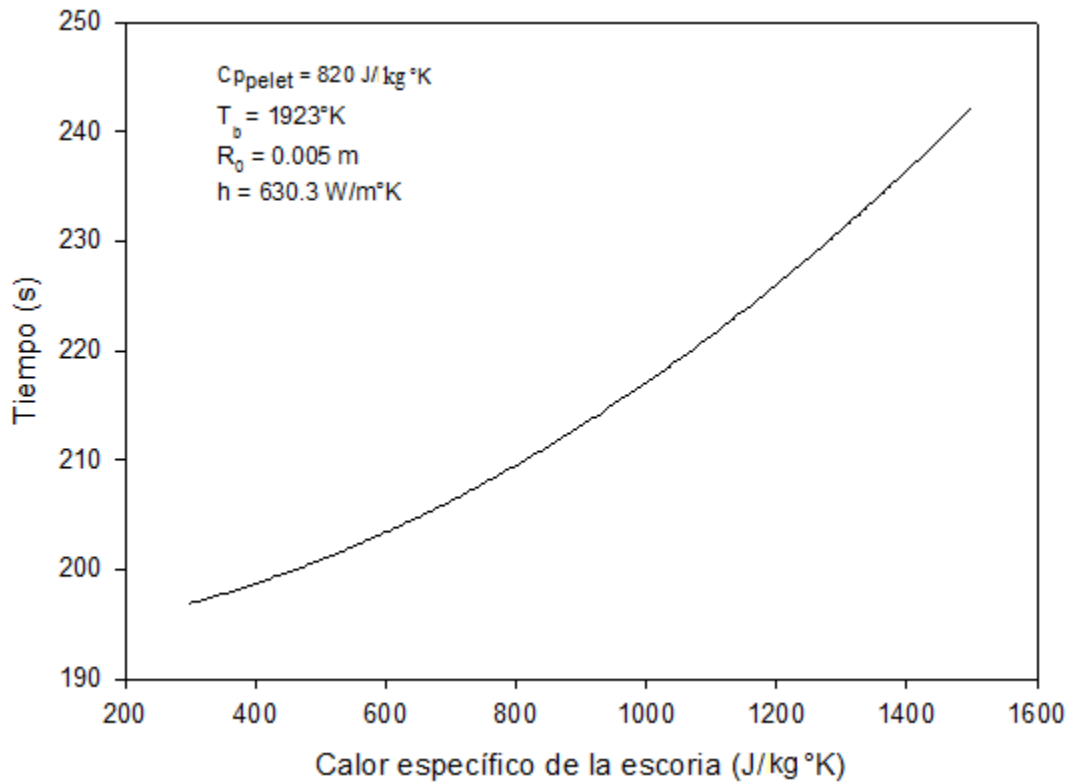


Figura 4.23 Dependencia del tiempo de fusión de la partícula con el calor específico de la escoria.

4.2.4 Condiciones fluidinámicas y temperatura del baño y temperatura inicial del pelet.

Es indispensable conocer las características del medio de fusión así como las condiciones iniciales del pelet. La variación de estos parámetros provoca cambios significativos en la cinética del proceso ya que un incremento en la temperatura del baño líquido y en la temperatura inicial de la partícula acelerará la rapidez de fusión de las partículas incrementando la fuerza motriz (diferencia de temperaturas) o reduciendo el calor total requerido para fundir la partícula. La diferencia entre estas temperaturas definirá la magnitud del choque térmico del pelet con el baño de escoria y por lo tanto también la cinética de solidificación y fusión de la coraza de escoria. Otro factor importante son las condiciones fluidinámicas del baño de escoria, puesto que si el baño es bien agitado la cinética de fusión de la partícula puede cambiar drásticamente comparada con la cinética de fusión en un baño quiescente. En esta sección se hace un análisis sobre cómo afecta la variación de estos parámetros a la fusión del hierro esponja.

4.2.4.1 *Temperatura inicial del pelet de hierro esponja.*

El efecto de precalentar el pelet de hierro esponja antes de ser alimentado al baño de escoria se puede apreciar en la Figura 4.24, donde se observa que los tiempos de fusión para una partícula de 5 mm de diámetro alimentada al baño de escoria a una temperatura inicial de 298, 598 y 1758°K son de aproximadamente 245, 220 y 100 segundos respectivamente. Cuando la temperatura inicial de pelet es muy pequeña como en el primer caso, la etapa de la coraza tiene un efecto dominante en el proceso de fusión de la partícula y gran parte del calor transferido desde el baño es utilizado para fundir a la coraza, mientras que en caso contrario cuando la temperatura inicial del pelet es muy cercana al punto de fusión de éste la etapa de la coraza es casi inexistente y la mayor parte del calor transferido del baño a la partícula es utilizado para calentar a la partícula y para el cambio de fase de sólido a líquido. En la Figura 4.25 se aprecia que el tiempo de fusión del pelet decrece linealmente conforme aumenta su temperatura inicial. Esto en la práctica significa un incremento también lineal en la productividad (coladas más cortas) y consecuentemente un ahorro lineal en el consumo de energía al tener prendido menos tiempo el horno por tonelada de acero. De acuerdo a nuestros cálculos, aumentar de 298 a 998 la temperatura inicial del pelet provoca un 20% de ahorro en tiempo de fusión y de energía. Las propiedades del hierro esponja y de la escoria se pueden consultar en la Tabla 4-1 (escoria 2 y hierro esponja 1).

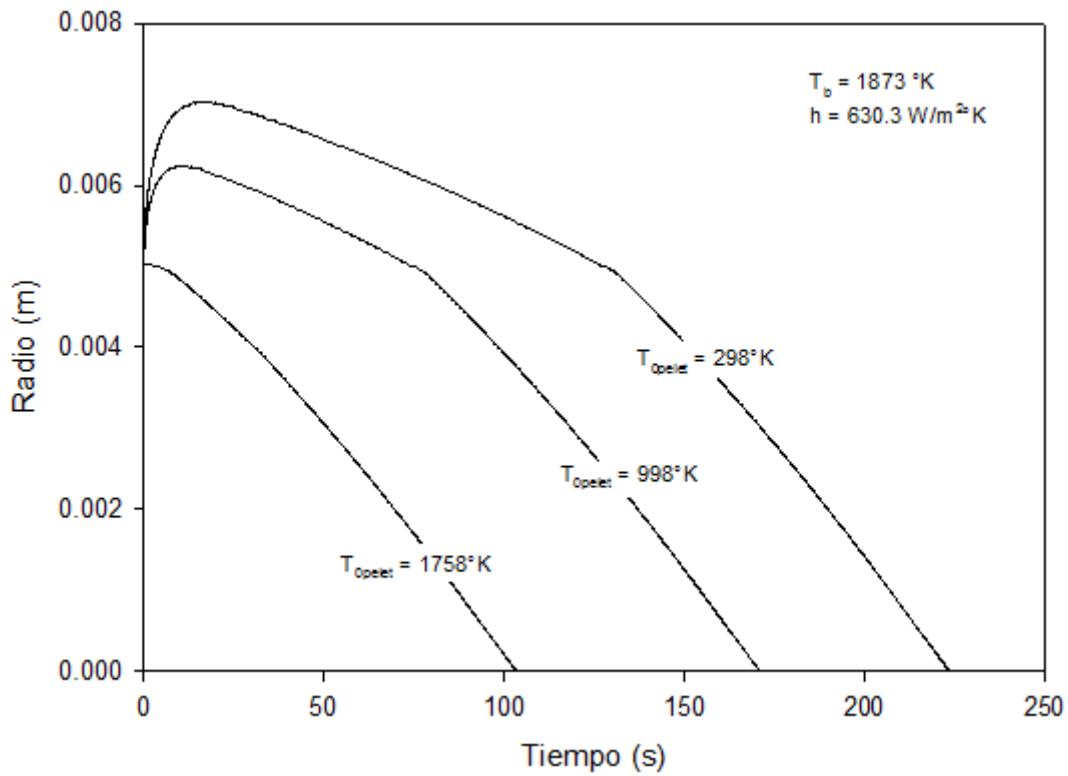


Figura 4.24 Evolución del radio del pelet de hierro esponja con el tiempo para tres valores de temperatura inicial del pelet.

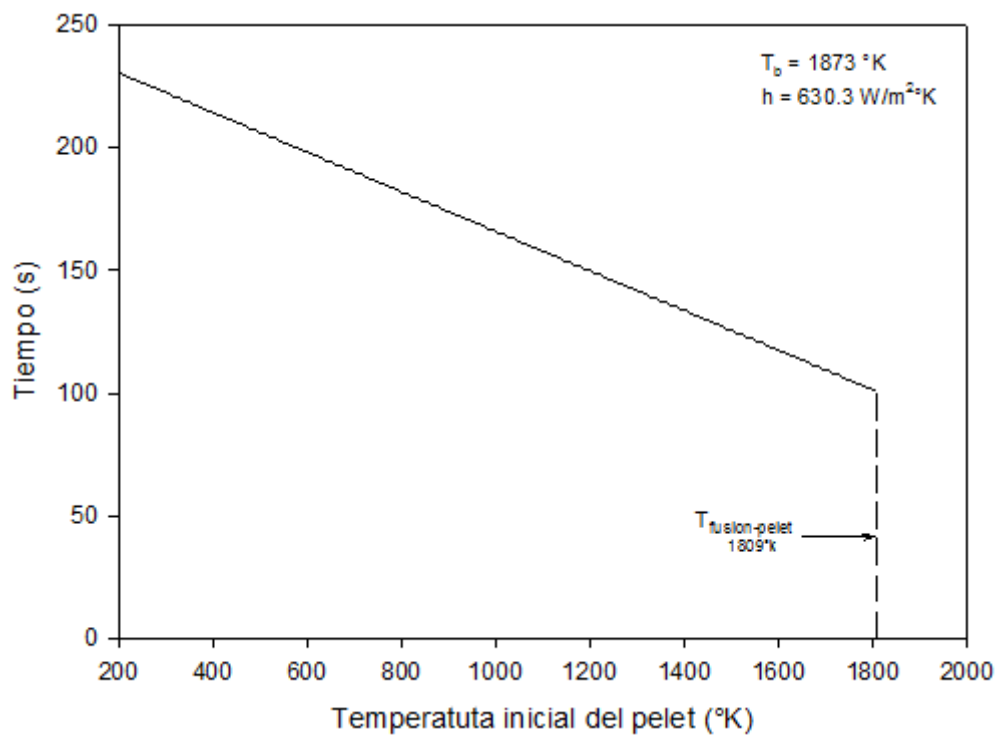


Figura 4.25 Dependencia del tiempo de fusión del pelet de hierro esponja en el baño de escoria conforme cambia la temperatura inicial a la cual la partícula es alimentada al baño.

4.2.4.2 Temperatura del baño de escoria.

Es predecible que el tiempo de fusión del pelet decrezca conforme aumente la temperatura del baño de escoria, el tiempo de fusión tiene un comportamiento similar a un decaimiento exponencial conforme aumenta la temperatura del baño de escoria como se puede apreciar en la Figura 4.26.

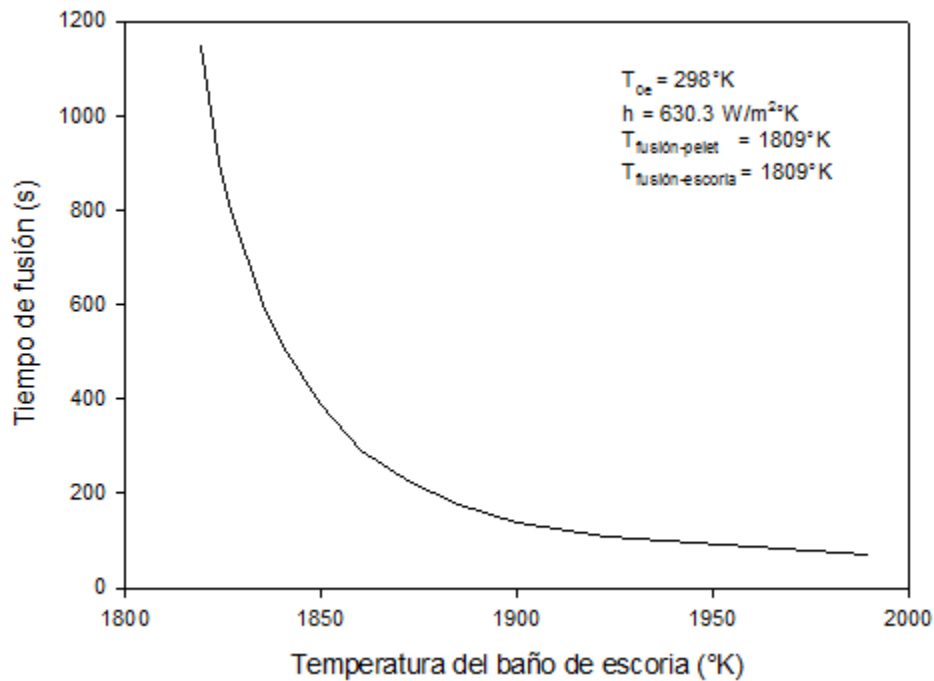


Figura 4.26 Dependencia del tiempo de fusión de la partícula con la temperatura del baño de escoria.

La evolución del radio del pelet con el tiempo se puede observar en la Figura 4.27, cuando la temperatura del baño de escoria es de 1819 °K (apenas 10° mayor que la temperatura de fusión del pelet) se tiene un tiempo de fusión mucho más prolongado y una coraza más grande que lo otros casos en los que la temperatura del baño es mayor. A pesar de la conductividad térmica desfavorable del pelet de hierro esponja, la transferencia de calor hacia el centro del pelet tiene un comportamiento favorable cuando la temperatura del baño de escoria es elevada; por lo tanto, es deseable que el baño metálico se encuentre a temperaturas muy superiores a la temperatura de fusión del pelet. Sin embargo, se sabe que en los hornos industriales existen enormes gradientes térmicos entre las zonas calientes afectadas directamente por los arcos (centro) y las zonas frías cercanas a las paredes.

Entonces, los lugares más adecuados para alimentar el DRI son las zonas donde hay escoria caliente, que son aquellas cercanas a los electrodos, pero se debe reconocer que cualquier movimiento de la escoria hacia las paredes que arrastre DRI impactará negativamente en el consumo de energía.

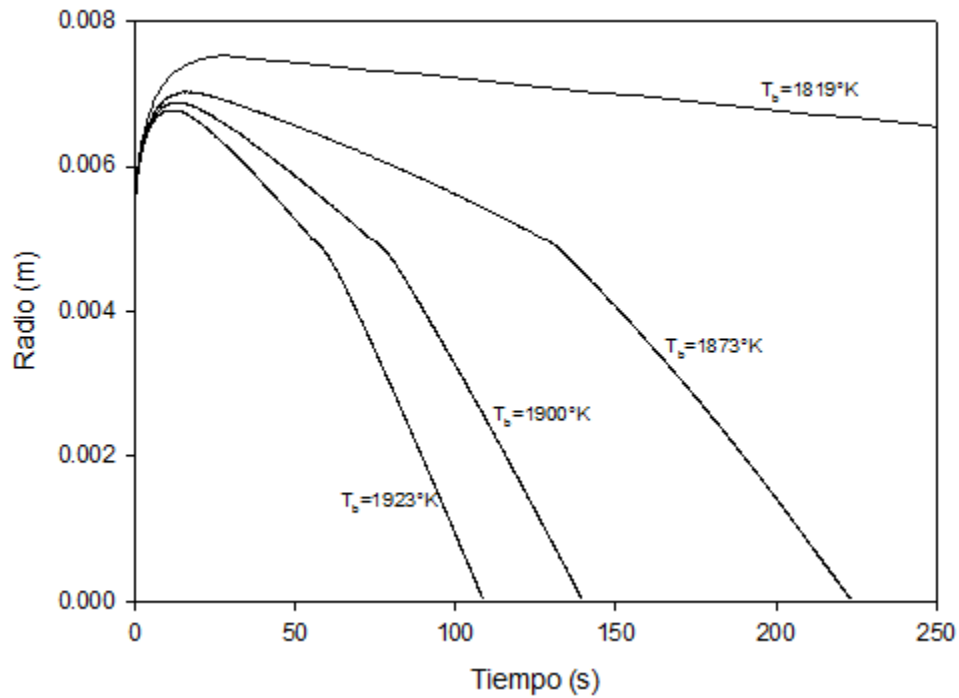


Figura 4.27 Evolución del radio de la partícula con el tiempo para diferentes temperaturas del baño metálico. Las propiedades de la escoria y del pelet de hierro esponja se pueden observar en la Tabla 4-1 (escoria 2 y hierro esponja 1) para una partícula de 5 mm de diámetro bajo las mismas condiciones de la figura 4.26.

4.2.4.3 *Coefficiente de transferencia de calor por convección*

Hasta este momento se ha utilizado un coeficiente de transferencia de calor por convección de $630 \text{ W/m}^2\text{K}$ para los resultados mostrados en este capítulo que de acuerdo con la literatura (30) corresponde a la convección que existe entre el baño de escoria y un pelet de hierro esponja no reactivo en un baño sin agitación aunque con ebullición de carbono. Sin embargo, en las condiciones reales de operación en el horno de arco eléctrico no se cumplen condiciones de no agitación ya que la escoria es agitada por diversos medios tales como la inyección de gas argón o el burbujeo del gas CO que evoluciona al decarburar al baño o por los jets gaseosos que impactan sobre el acero. Es por eso que es necesario estudiar cómo cambia la cinética de fusión del pelet de hierro esponja cuando el mecanismo de transferencia de calor gobernante corresponde a convección forzada y el coeficiente de transferencia de calor por convección crece. Es necesario conocer que valores adopta este coeficiente para el caso de convección natural o forzada. Investigaciones previas han encontrado que los valores de h para la fusión de hierro esponja en escoria bajo condiciones de convección natural oscilan entre los 125.5 y $210 \text{ W/m}^2\text{K}$ (30), por arriba de este rango de valores se considera convección forzada.

Cuando la agitación del baño de escoria es intensa, la convección forzada que existe entre el baño y las fronteras del pelet provoca una rápida transferencia de calor del baño al pelet reduciendo las diferentes etapas de calentamiento y fusión del proceso, tal como se observa en la Figura 4.28. Aunque las condiciones fluidinámicas turbulentas del baño reduzcan el tiempo de existencia de la coraza no puede despreciarse esta etapa. Un aumento moderado en la agitación de la escoria produce coeficientes de transferencia de calor de $300\text{W/m}^2\text{K}$ a $600\text{W/m}^2\text{K}$ y significa fundir casi a la mitad del tiempo el mismo pelet en el mismo baño.

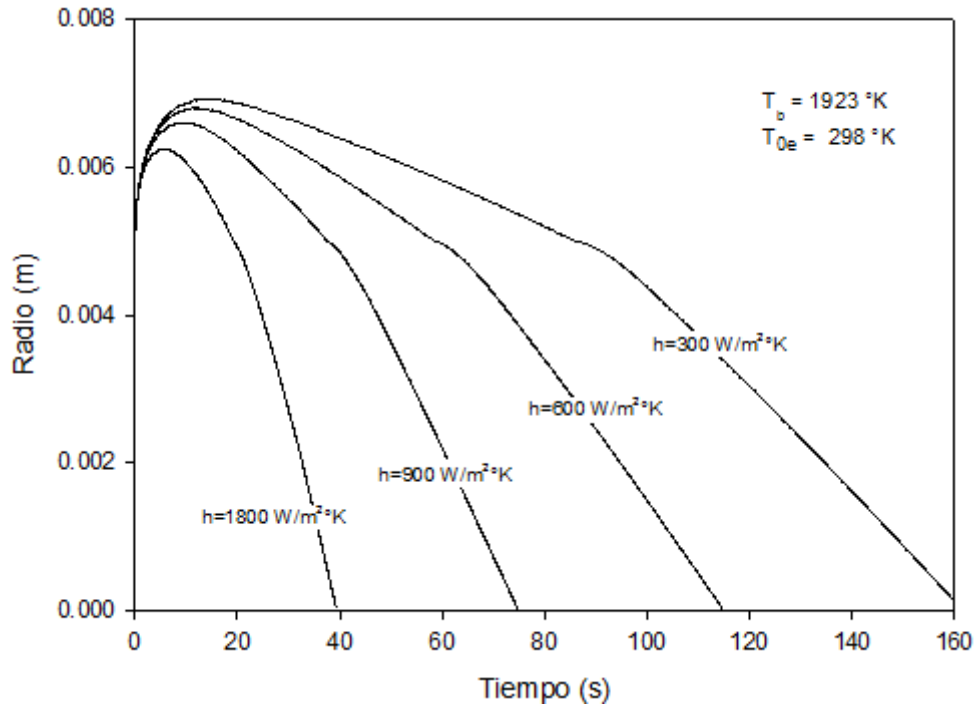


Figura 4.28 Cambio del radio del pelet de hierro esponja con el tiempo en un baño de escoria fundida con diferentes valores del coeficiente de transferencia de calor. Las propiedades del hierro esponja y de la escoria se pueden consultar en la Tabla 4-1 (escoria 2 y hierro esponja 1).

Cuando el coeficiente de transferencia de calor aumenta provoca un cambio drástico en el tiempo de fusión del pelet, este cambio es aun más notorio entre más pequeño es el radio inicial del pelet. En la figura 4.29 se puede constatar cómo descende el tiempo de fusión al aumentar el coeficiente h con la agitación del baño; se muestran los tiempos de fusión para pelets con un radio inicial de 0.5, 1 y 2 cm. Se puede apreciar que para valores del coeficiente de transferencia de calor por convección mayores a los $1000\text{W/m}^2\text{K}$, ya no descende tanto el tiempo de fusión. Sin embargo, una buena agitación puede reducir en más de la mitad el tiempo de fusión y consecuentemente el consumo de energía disminuye al mismo tiempo de aumentar la productividad del horno.

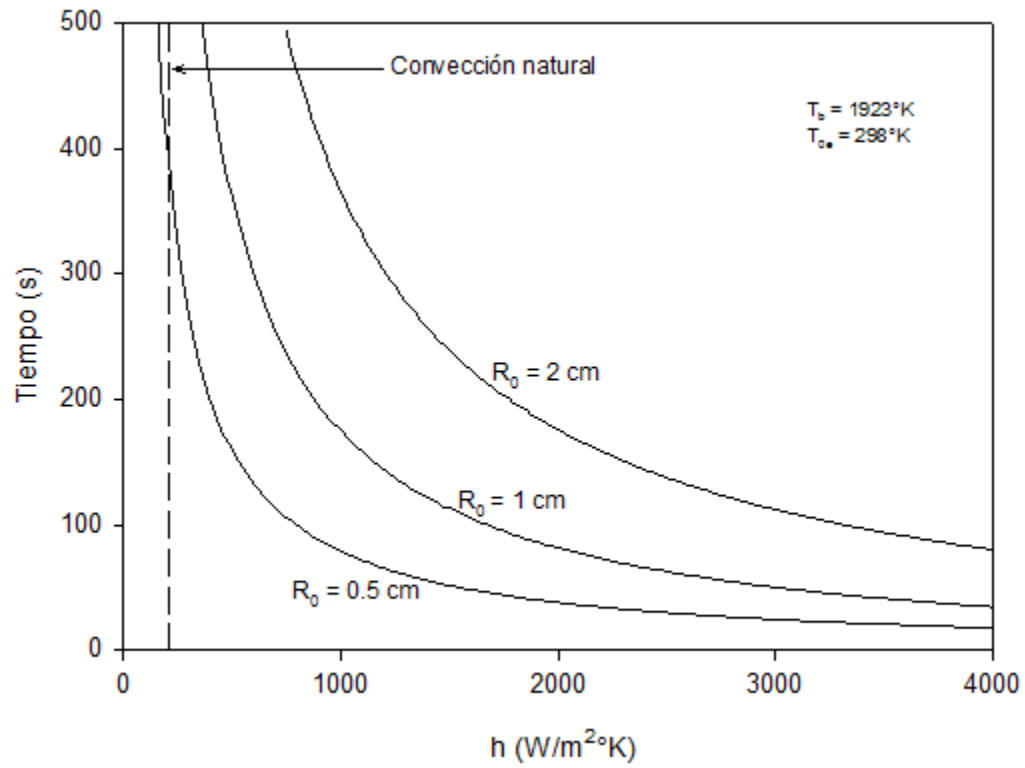


Figura 4.29 Variación del tiempo de fusión del hierro esponja conforme cambia el coeficiente de transferencia de calor por conducción para tres radios iniciales del pelet diferentes. Las propiedades del hierro esponja y de la escoria se pueden consultar en la Tabla 4-1 (escoria 2 y hierro esponja 1).

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado satisfactoriamente un modelo matemático capaz de reproducir la cinética de fusión de un pelet de hierro esponja no reactivo inmerso en un baño de escoria fundida. El modelo es bueno y robusto, ya que fue validado con soluciones analíticas y resultados experimentales existentes en la literatura.

De acuerdo con las predicciones del modelo, la rapidez de fusión del pelet en el baño de escoria disminuye cuando el radio de la partícula es mayor y aumenta a radios menores, sin embargo, alimentar pelets de radios pequeños implica el crítico problema de generar cantidades mayores de escoria solidificada por tonelada de carga, debido al incremento del área superficial de la carga en contacto con la escoria líquida. Por lo tanto, a pesar de que el tiempo fusión de la partícula aumente, la mejor recomendación es alimentar pelets de mayor tamaño para reducir el consumo de energía del horno y hacer más eficiente el proceso.

La porosidad del hierro esponja es un parámetro de vital importancia, ya que de la porosidad dependen otros dos parámetros muy importantes como lo son la densidad y la conductividad térmica. De acuerdo con los resultados arrojados por el modelo, es inconveniente que el pelet sea muy poroso, ya que el número de partículas por tonelada de carga aumenta con el aumento de la porosidad y consecuentemente solidifican cantidades enormes de escoria por tonelada de carga. Los resultados indicaron que se pueden obtener incluso más de dos toneladas de escoria solidificada por tonelada de hierro esponja alimentado si la porosidad del pelet es grande; esto quiere decir que si se desea economizar el gasto de energía para fundir la carga es necesario que el pelet sea lo menos poroso posible.

Es necesario conocer y controlar el valor del calor específico del pelet de hierro esponja, ya que cuando este valor es muy grande se producen cantidades muy grandes de escoria solidificada que implican mayor inversión en energía eléctrica para fundir la carga. La composición química del hierro esponja debe de ser rigurosamente controlada y evitar la presencia de elementos de alto punto de fusión que eleven el valor del calor específico.

Las temperaturas del baño de escoria y de el hierro esponja son otro factor importante que determina la cinética de fusión de las partículas. Entre mayor sean estas dos temperaturas, menor será el tiempo de fusión de las partículas y menor la energía necesaria para fundir la carga. Es decir las condiciones óptimas para una mejor eficiencia del proceso es alimentar el pelet a la mayor temperatura posible y conservar el baño de escoria fundida a unos 50°K por arriba de la temperatura de fusión aproximadamente.

Las propiedades de la escoria tanto en estado sólido como líquido tienen un papel importante en el consumo de energía para fundir la carga; si la conductividad térmica, la densidad y el calor específico de la escoria son valores pequeños, se podrá lograr un ahorro de energía considerable. Entonces, es necesario mantener la composición química de la escoria de manera que se evite que alguno de estos tres valores aumente sensiblemente.

Se ha llegado a la conclusión en este trabajo que el parámetro más importante que hay que controlar para obtener tiempos de fusión cortos y con bajo consumo de energía eléctrica es la fluidinámica del baño líquido de escoria. Claramente se evidencia que si se aumenta el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el baño y la partícula, el tiempo de fusión y el tamaño de la coraza decrecen drásticamente. Así que si el baño es agitado vigorosamente se tendrá un ahorro considerable de tiempo y de energía en el proceso.

TRABAJO A FUTURO

El trabajo hasta aquí desarrollado representa un avance en el modelado de la fusión de hierro esponja en escoria fundida, sin embargo, a pesar de que el modelo predice la cinética de fusión con aceptable precisión es necesario incluir otros fenómenos como el cambio de fases del hierro esponja y la emisión de gases desde el censo del pelet, para así mismo llegar a un modelo mucho más preciso y verosímil. Para realizar lo propuesto es necesario de llevar a cabo la reproducción del fenómeno a nivel experimental a través de un modelo físico en laboratorio.

Es muy importante modelar el cambio de fases que sufre el hierro esponja con el cambio de la temperatura, este es quizá el trabajo próximo más importante a realizar, existen investigaciones (30) sobre el modelado de este fenómeno que pueden ser de gran utilidad para estudiarlo. Modelando los cambios de composición química en el pelet se podrá estudiar el efecto que tiene la metalización del hierro esponja sobre la cinética de fusión de la partícula.

APENDICE A

Aproximación numérica por diferencias finitas

Diferencias finitas

Se pueden obtener soluciones aproximadas al problema de transferencia de calor remplazando la ecuación diferencial por diferencias finitas y resolviendo el conjunto de ecuaciones algebraicas resultante (37). Por lo tanto la temperatura será determinada solo por un número finito de puntos discretos llamados nodos. La sustitución de las derivadas por diferencias finitas se hace de la siguiente manera:

Considérese un función de una variable $T(x)$, que se considera analítica. El teorema de Taylor que permite aproximar el valor de una función entre los puntos x y $x + h$ dice que:

$$T(x+h) = T(x) + hT'(x) + \left(\frac{h^2}{2!}\right)T''(x) + \dots \quad \text{A.1}$$

Supóngase que se conoce el valor de la función en un grupo de puntos que se encuentran a la misma distancia como se observa en la Figura A1

$$\dots x - 2h, x - h, x, x + h, x + 2h, \dots$$

y se busca aproximar la derivada en x con valores de la función en esos puntos, por lo tanto de la ecuación A.1 se obtiene:

$$T'(x) = \frac{T(x+h) - T(x)}{h} \quad \text{A.2}$$

Si T_n es el valor de la función en el punto $x_0 + nh$, entonces

$$T'_n = \frac{T_{n+1} - T_n}{h} \quad \text{A.3}$$

Si h es sustituido por $-h$ en la ecuación A.1, se obtiene una aproximación de la derivada con valores de la función en los puntos x y $x - h$

$$T'_n = \frac{T_n - T_{n-1}}{h} \quad \text{A.4}$$

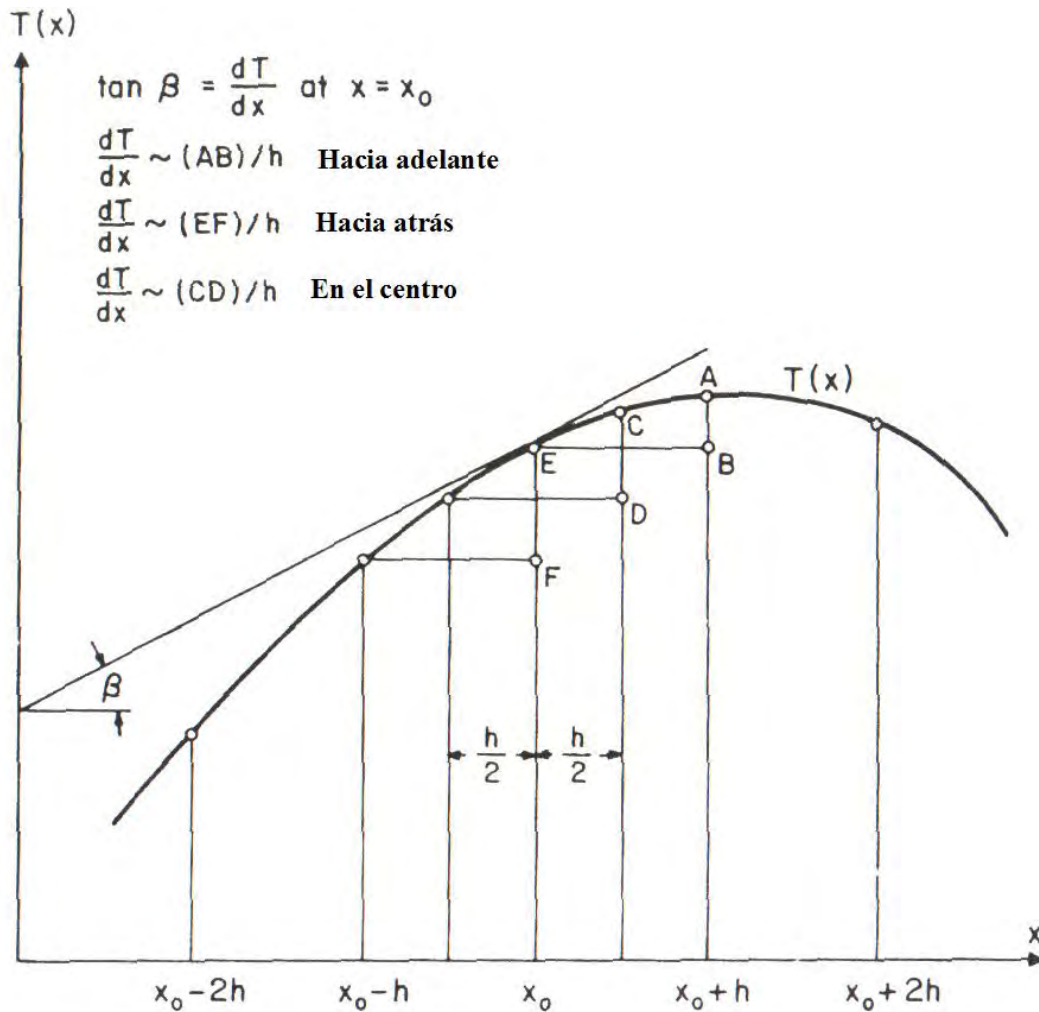


Figura A1. Aproximación de la primera derivada

Una mejor aproximación de la derivada se obtiene si se consideran los valores de la función en los puntos $x + h/2$ y $x - h/2$

$$T'_n = \frac{T_{n+1/2} - T_{n-1/2}}{h} \quad \text{A.5}$$

Los numeradores en las ecuaciones A.3, A.4 y A.5 son diferencias de primer orden hacia adelante, hacia atrás y central respectivamente de la función $T(x)$. La notación usual es:

$$\Delta T_n = T_{n+1} - T_n \quad \text{hacia adelante} \quad \text{A.6}$$

$$\nabla T_n = T_n - T_{n-1} \quad \text{hacia atrás} \quad \text{A.7}$$

$$\delta T_n = T_{n+1/2} - T_{n-1/2} \quad \text{central} \quad \text{A.8}$$

Método de diferencias finitas

Este método es muy utilizado recientemente debido a que puede ser fácilmente adaptado a cálculos en computadora; consecuentemente, este es el único método que puede ser usado para obtener una solución aproximada con alto grado de precisión si el problema es de considerable tamaño o complejidad.

El primer paso para obtener las ecuaciones en los nodos consiste en subdividir en secciones la región en consideración, ubicar el nodo en el centro de cada sección y después calcular las conductancias entre nodos adyacentes. Considérese un balance de energía en el nodo i que se encuentra rodeado por j nodos adyacentes durante un pequeño intervalo de tiempo Δt . Durante este intervalo de tiempo se asume que las temperaturas en los nodos j permanecen constantes. Por lo tanto el flujo de calor causará un cambio en la temperatura en un tiempo Δt . Usando la ecuación A.9

$$\sum q_{ij} = \sum K_{ij} (T_j - T_i) = 0 \quad \text{A.9}$$

donde:

$$K_{ij} = \lambda \left(\frac{A_{ij}}{L_{ij}} \right), \quad \text{en los puntos del interior del sólido} \quad \text{A.10}$$

$$K_{ij} = h_j A_{ij}, \quad \text{en los puntos de la frontera} \quad \text{A.11}$$

se puede obtener la siguiente expresión:

$$\sum_i K_{ij} [T_j(t) - T_i(t)] \rho c V \frac{\Delta T_i}{\Delta t} \quad \text{A.12}$$

Si hay generación de calor en el sistema, se debe de agregar el término $q''' V_i$ (V_i es el volumen asignado al nodo i) en el lado izquierdo de la ecuación A.9. La expresión anterior puede ser utilizada en general para obtener la ecuación en cualquier nodo.

Método explícito

La forma más simple de la ecuación A.11 se obtiene usando la diferencia hacia adelante para $\Delta T_i = T_i(t + \Delta t) - T_i(t)$. En este caso se puede obtener la temperatura $T_i(t + \Delta t)$ de forma explícita conociendo las temperaturas T_i, T_j en el tiempo t , con la siguiente ecuación:

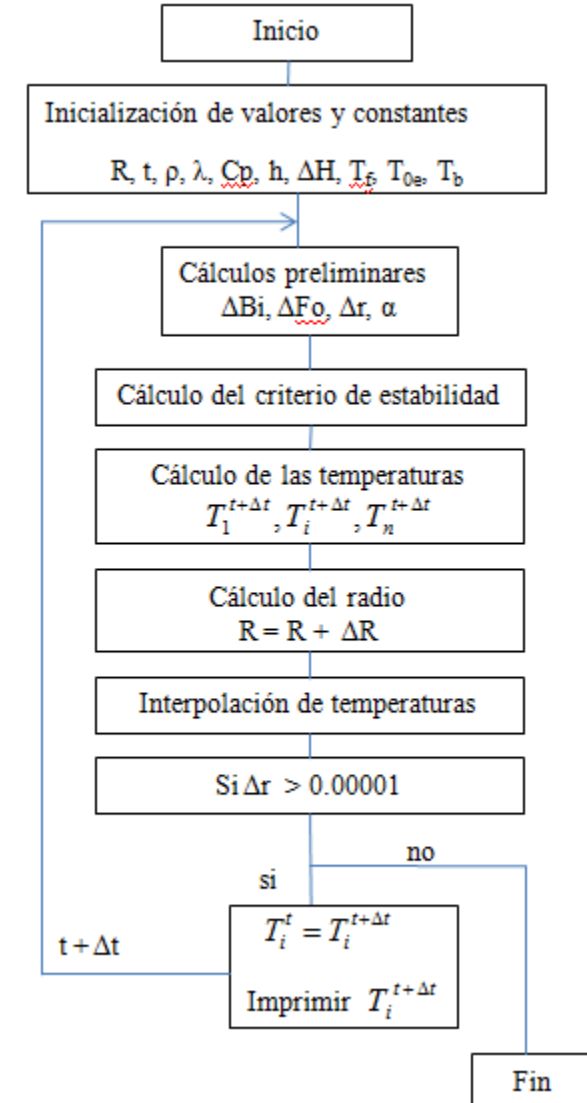
$$T_i(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{\rho c V_i} \left[\sum_i K_{ij} T_j(t) + \left(\frac{\rho c V_i}{\Delta t} - \sum_j K_{ij} \right) T_i(t) \right] \quad \text{A.13}$$

La ecuación A.13 toma diferentes formas de acuerdo al sistema de coordenadas, para el caso de una esfera como el hierro esponja, las ecuaciones de diferencias finitas en el centro y las fronteras de la esfera corresponden a las ecuaciones 3.21, 3.26 y 3.43.

APENDICE B

Algoritmo del modelo de fusión de un pelet en un baño de su misma composición química.

La principal característica de este algoritmo es que el número de nodos permanece constante con el tiempo, como consecuencia de esto, conforme evoluciona el radio de la partícula la distancia entre los nodos Δr cambia para cada paso de tiempo. Con este algoritmo se puede describir con bastante precisión la cinética de fusión de la partícula y todas sus etapas, ya que el error es muy pequeño y depende exclusivamente de la finura de la malla. El algoritmo se describe en el siguiente diagrama de flujo:



PROGRAMA PARA LA FUSIÓN DE UN PELET HIERRO EN UN BAÑO DE HIERRO
FUNDIDO

Definición de variables:

ALFA	difusividad térmica del pelet en s^{-2}
COND	conductividad térmica del pelet en $W/m^{\circ}K$
CONDUCCION	flux de calor por conducción en W/m^2
CONVECCION	flux de calor por convección en W/m^2
CP	calor específico del pelet en $J/Kg^{\circ}K$
CT	contador 1
DBI	número adimensional delta Biot
DFO	número adimensional delta Fourier
DH	calor latente de fusión del pelet en J/Kg
DR	distancia entre dos elementos i en metros
DT	delta de tiempo en segundos
DT(I)	criterio de estabilidad del elemento i en segundos
N	número de elementos en que se divide la esfera
H	coeficiente de transferencia de calor por convección en $W/m^2^{\circ}K$
R	radio del pelet en metros
RINC	incremento de radio en metros
RHO	densidad del pelet en Kg/m^3
TB	temperatura del baño en $^{\circ}K$
TF	temperatura de fusión del pelet en $^{\circ}K$
TIEMPO	variable tiempo en segundos
TI(I)	temperatura del elemento i en el tiempo t $^{\circ}K$
TN(I)	temperatura del elemento i en el tiempo t + Δt en $^{\circ}K$
T0	temperatura inicial del pelet en $^{\circ}K$

DIMENSION TN(N),TI(N), DTI(N)

OPEN(61,FILE='DATOS11.txt',STATUS='unknown')

! PROPIEDADES DE LA PARTÍCULA

DH=277190.0419

CP=820.0641

COND=37.6560

RHO=7650

! INICIALIZACIÓN DE VALORES

N=100

R=0.01

TIEMPO=DT

T0=298.

DO I=1,N-1

TI(I)=T0

END DO

CT=0

! PROPIEDADES DEL BAÑO

H=25104.0037

TB=1873.15

TF=1809.15

! CALCULOS DE ALGUNOS VALORES NECESARIOS

10 DR=R/(N-1)

DBI=(H*DR)/COND

ALFA= COND/(RHO*CP)

DFO=(ALFA*DT)/(DR**2)

! CALCULO DEL CRITERIO DE ESTABILIDAD

DTI(1)=(DR**2)/(6*ALFA)

DT=0.95*DTI(1)

DO I=2,N-1

```

A=(FLOAT(I)-0.5)**3
B=(FLOAT(I)-1.5)**3
C=1./(A(I)-B(I))
D=(FLOAT(I)-0.5)**2
E=(FLOAT(I)-1.5)**2
DTI(I)=((DR**2)/(3*ALFA))*((A-B)/(E+D))
END DO
DTI(N)=((DR**2)/(6*ALFA))*((12*(N**2)- 30*N+19)/((4*(N**2)-12*N
&+9)+(4*DBI*((N**2)-2*N+1))))
DO I=1,N
END DO

```

! CALCULOS DE LAS TEMPERATURAS

! PARA NODO ORIGEN

```
TN(1)=TI(1)*(1.-6.*DFO)+6.*DFO*TI(2)
```

! PARA NODO CENTRAL

```

DO I=2,N-1
A=(FLOAT(I)-0.5)**3
B=(FLOAT(I)-1.5)**3
C=1./(A-B)
D=(FLOAT(I)-0.5)**2
E=(FLOAT(I)-1.5)**2
TN(I)=TI(I)*(1.-(3.*DFO*(E+D)*C))
&+TI(I-1)*(3.*DFO*E*C)+TI(I+1)*(3.*DFO*D*C)
END DO

```

! PARA NODO CONVECTIVO

```
TN(N)=TF
```

! CALCULO DEL RADIO

```

CONDUCCION=COND*((TN(N)-TN(N-1))/DR)
CONVECCION=H*(TB-TF)
RINC=((CONDUCCION-CONVECCION)*DT)/(RHO*DH)
R=R+RINC

```

! INTERPOLACIÓN DE TEMPERATURAS

```
IF(RINC.GT.0)THEN
DO I=2,N-1
TN(I)=TN(I)+RINC*(I-1)*(TN(I+1)-TN(I))/(DR*(N-1))
END DO
ELSE
DO I=2,N-1
TN(I)=TN(I)+(I-1)*RINC*(TN(I)-TN(I-1))/(DR*(N-1))
END DO
END IF
```

! LECTURA DE LA TEMPERATURA

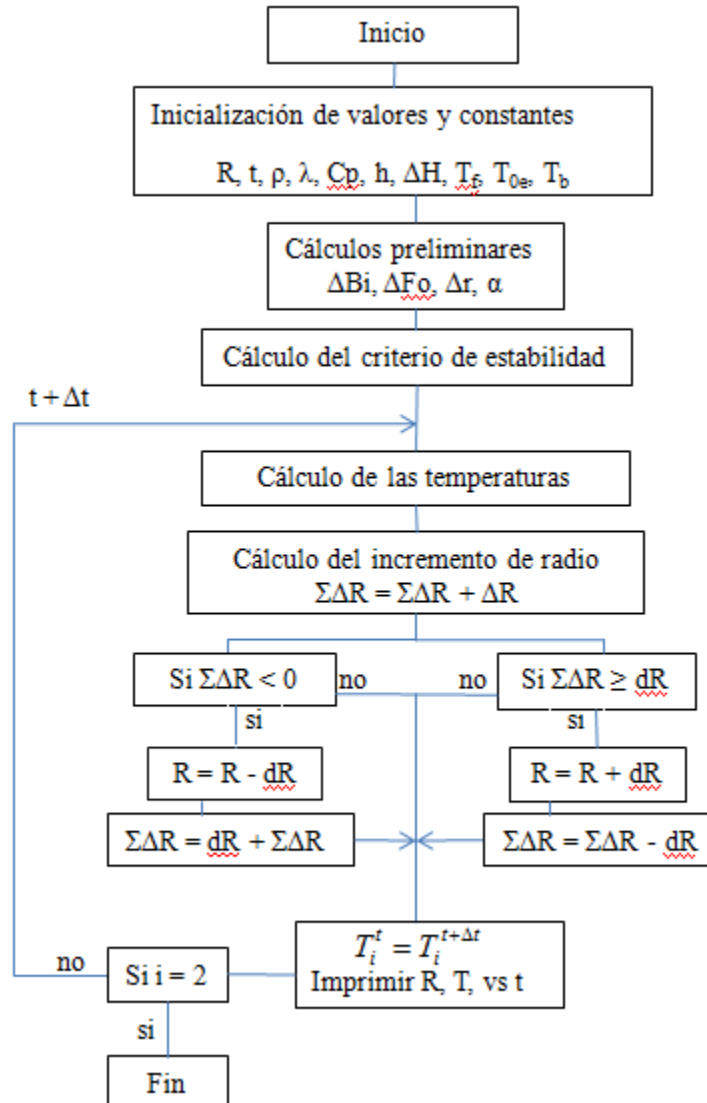
```
TIEMPO=TIEMPO+DT
IF(TIEMPO.LT.T) THEN
DO I=1,N
TI(I)=TN(I)
END DO
WRITE(*,*)R, TIEMPO
WRITE(61,*)R, TIEMPO
GOTO 10
ELSE
END IF
```

end

APENDICE C

Algoritmo del modelo de fusión de un pelet en un baño de diferente composición química.

La elaboración de un algoritmo para este caso es mucho más compleja que el caso del Apéndice B, ya que en este algoritmo se tienen que realizar cálculos adicionales para hacer continuo el perfil de temperaturas en la intercara sólida. En este algoritmo la distancia Δr entre los nodos permanece constante con el tiempo, el problema de frontera móvil se soluciona variando el número de nodos de la esfera y por lo tanto tiene un porcentaje de error superior que el algoritmo anterior, sin embargo este problema se reduce satisfactoriamente al hacer más fina la malla. El algoritmo es el siguiente:



PROGRAMA PARA LA FUSIÓN DE UN PELET HIERRO ESPONJA EN UN BAÑO
DE ESCORIA FUNDIDA

Definición de variables:

ALFA1	difusividad térmica del pelet en s^{-2}
ALFA2	difusividad térmica de la escoria en s^{-2}
ALFAINT1	difusividad térmica en la interfase en la región del pelet en s^{-2}
ALFAINT2	difusividad térmica en la interfase en la región de la escoria en s^{-2}
CAMBIO	contador que indica un cambio en el número de elementos i
COND1	conductividad térmica del pelet en $W/m^{\circ}K$
COND2	conductividad térmica de la escoria en $W/m^{\circ}K$
CONDARM	conductividad térmica armónica en $W/m^{\circ}K$
CONDUCCION	flux de calor por conducción en W/m^2
CONVECCION	flux de calor por convección en W/m^2
CP1	calor específico del pelet en $J/Kg^{\circ}K$
CP2	calor específico de la escoria en $J/Kg^{\circ}K$
CT	contador 1
DBI1	número adimensional delta Biot en el pelet
DBI2	número adimensional delta Biot en la escoria
DFO1	número adimensional delta Fourier en el pelet
DFO2	número adimensional delta Fourier en la escoria
DFOINT1	delta Fourier en la intercara en la región del pelet
DFOINT2	delta Fourier en la intercara en la región de la escoria
DH1	calor latente de fusión del pelet en J/Kg
DH2	calor latente de fusión de la escoria en J/Kg
DR	distancia entre el elemento i con los elementos adyacentes metros
DT	delta de tiempo en segundos
DT(I)	criterio de estabilidad del elemento i en segundos
N	número de elementos en que se divide la esfera incluyendo la coraza
M	elemento donde se encuentra la intercara en estado sólido en la región del pelet
H	coeficiente de transferencia de calor por convección en $W/m^2^{\circ}K$
INICIAL	contador que indica que el número de elementos i no ha cambiado
PI	constante π
Q	calor sensible del elemento i en un Δt
QSENSIBLE	calor sensible que entra a la partícula en J
QLESCORIA	calor latente necesario para fundir la coraza de escoria en J
QLPELET	calor latente necesario para fundir el pelet en J
QLTOTAL	calor latente total para fundir la partícula en J
R0	radio inicial de la partícula
R	radio del pelet en metros
RACU	radio acumulado (sumatoria de Δr)

RINC	incremento de radio en metros
RHO1	densidad del pelet en Kg/m^3
RHO2	densidad de la escoria en Kg/m^3
RMAX	radio máximo de la esfera en metros
T0	temperatura inicial del pelet en $^{\circ}\text{K}$
T	acotamiento del intervalo tiempo
TB	temperatura del baño en $^{\circ}\text{K}$
TCORAZA	duración de la etapa de la coraza
TF1	temperatura de fusión del pelet en $^{\circ}\text{K}$
TF2	temperatura de fusión del pelet en $^{\circ}\text{K}$
TIEMPO	variable tiempo en segundos
TI(I)	temperatura del elemento i en el tiempo t $^{\circ}\text{K}$
TN(I)	temperatura del elemento i en el tiempo t + Δt en $^{\circ}\text{K}$
V	volumen

DIMENSION TN(4000),TI(4000),DTI(4000)
REAL H

OPEN(61,FILE='CAMBIO DE RADIO.txt',STATUS='unknown')
OPEN(62,FILE='PERFIL DE TEMPERATURAS.txt',STATUS='unknown')

! CONSTANTES DEL HIERRO ESPONJA (MATERIAL 1)

COND1=2.13
CP1=1420.
RHO1=2600.
TF1=1809.
DH1=277400.

! CONSTANTES DE LA ESCORIA B (MATERIAL 2)

CP2=1171.
COND2=1.3589
RHO2=2900.
TF2=1809.
DH2=426768.

! CONSTANTES DEL SISTEMA

H=630.3
TB=1923.
CONDARM=(2*COND1*COND2)/(COND1+COND2)
RO=0.005
R=RO

! INICIALIZACIÓN DE VALORES

N=500
M=N
T0=298.
TCORAZA=1000.
DT=100.
DR=R/(N-1)
CAMBIO = 0
TIEMPO = 0.
PI=3.1415926535
QSENSIBLE=0.
DO I=1,N
TI(I)=T0
END DO
TI(N)=TF2
RACU=0

```
CT=1
T=4000
```

! CALCULOS DE ALGUNOS VALORES NECESARIOS

```
DBI1=(H*DR)/COND1
DBI2=(H*DR)/COND2
ALFA1=K1/(RHO1*CP1)
ALFA2=K2/(RHO2*CP2)
ALFAINT1=CONDARM/(RHO1*CP1)
ALFAINT2=CONDARM/(RHO2*CP2)
```

! CALCULO DEL CRITERIO DE ESTABILIDAD

5 DTI(1)=(DR**2)/(6*ALFA1)

```
DO I=2,N-1
```

```
A1=(FLOAT(I)-0.5)**3
```

```
B1=(FLOAT(I)-1.5)**3
```

```
D1=(FLOAT(I)-0.5)**2
```

```
E1=(FLOAT(I)-1.5)**2
```

```
IF(I.LE.M)THEN
```

```
DTI(I)=((DR**2)/(3*ALFA1))*((A1-B1)/(E1+D1))
```

```
ELSE
```

```
DTI(I)=((DR**2)/(3*ALFA2))*((A1-B1)/(E1+D1))
```

```
END IF
```

```
END DO
```

```
IF(N.LE.M)THEN
```

```
DTI(N)=((DR**2)/(6*ALFA1))*((12*(N**2)- 30*N+19)/((4*(N**2)-
12*N+9)+(4*DBI1*((N**2)-2*N+1))))
```

```
ELSE
```

```
DTI(N)=((DR**2)/(6*ALFA2))*((12*(N**2)- 30*N+19)/((4*(N**2)-
12*N+9)+(4*DBI2*((N**2)-2*N+1))))
```

```
END IF
```

```
IF(CT.EQ. 1)THEN
```

```
CT = CT + 1
```

```
N = N + 50
```

```
GO TO 5
```

```
ELSE
```

```
DO I=1,N
```

```
IF(DT.GT.DTI(I))THEN
```

```
DT=DTI(I)
```

```
END IF
```

```
END DO
```

```
N=N-50
```

```
END IF
```

```

!      CALCULO DEL DELTA FOURIER

      DFO1=(ALFA1*DT)/(DR**2)
      DFOINT1=(ALFAINT1*DT)/(DR**2)
      DFO2=(ALFA2*DT)/(DR**2)
      DFOINT2=(ALFAINT2*DT)/(DR**2)

!      ASIGANACIÓN DE LA ETAPA DE TIEMPO

10     IF(TIEMPO.GT.1.)THEN
        IF(N.EQ.M)THEN
          TCORAZA=TIEMPO
        END IF
      END IF

      INICIAL=CAMBIO

!      CALCULOS DE LAS TEMPERATURAS

!      PARA NODO ORIGEN

      TN(1)=TI(1)*(1.-6.*DFO1)+6.*DFO1*TI(2)

!XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
!      PARA LA ETAPA DE LA CORAZA

      IF(TIEMPO.LT.TCORAZA)THEN

!      PARA NODO CENTRAL

      DO I=2,N-1

        A=(FLOAT(I)-0.5)**3
        B=(FLOAT(I)-1.5)**3
        C=1./(A-B)
        D=(FLOAT(I)-0.5)**2
        E=(FLOAT(I)-1.5)**2

        IF(I.LT.M)THEN
          TN(I)=TI(I)*(1.-(3.*DFO1*(E+D)*C))&
& + TI(I-1)*(3.*DFO1*E*C)+TI(I+1)*(3.*DFO1*D*C)
        END IF

        IF(I.EQ.M)THEN
          TN(I)=TI(I)*(1.-(3.*DFOINT1*D+3.*DFO1*E)*C) &
& + TI(I-1)*(3.*DFO1*E*C)+TI(I+1)*(3.*DFOINT1*D*C)
        END IF
      
```

```

      IF(I.EQ.M+1)THEN
        TN(I)=TI(I)*(1-(3.*DFO2*D+3.*DFOINT2*E)*C) &
& +TI(I-1)*(3.*DFOINT2*E*C)+TI(I+1)*(3.*DFO2*D*C)
        END IF

      IF(I.GT.M+1)THEN
        TN(I)=TI(I)*(1-(3.*DFO2*(E+D)*C)) &
& +TI(I-1)*(3.*DFO2*E*C)+TI(I+1)*(3.*DFO2*D*C)
        END IF

      END DO

!   PARA NODO CONVECTIVO

      TN(N)=TF2

!   CALCULO DEL RADIO

      CONDUCCION=COND2*((TN(N)-TN(N-1))/(DR))
      CONVECCION=H*(TB-TF2)
      RINC=((CONDUCCION-CONVECCION)*DT)/(RHO2*DH2)
      RACU=RACU+RINC

!   CALCULO DEL CALOR SENSIBLE PARA CALENTAR EL PELET

      DO I=1,N

        IF(I.EQ.1)THEN
          V=(PI*DR**3)/6.
        ELSE
          IF(I.EQ.N)THEN
            V=(4./3.)*PI*(R**3-(R-DR/2.）**3)
          ELSE
            V=4.*PI*(DR**3)*(I**2-2.*I+13./12.)
          END IF
        END IF

        IF(I.LE.M)THEN
          Q=RHO1*V*CP1*(TN(I)-TI(I))
        ELSE
          Q=RHO2*V*CP2*(TN(I)-TI(I))
        END IF

        QSENSIBLE=QSENSIBLE+Q

      END DO

```

! PARA LA ETAPA DE SOLIDIFICACIÓN DE LA CORAZA

```
IF(RACU.GE.DR)THEN
N=N+1
RACU=RACU-DR
R=R+DR
TN(N)=TF2
TN(N-1)=((DR*(N-2)-DR*(N-3))/(DR*(N-1)-DR*(N-3)))*(TN(N)-TN(N-2))+TN(N-2)
INICIAL=N+1
CAMBIO=N
END IF
```

! PARA LA ETAPA DE FUSION DE LA CORAZA

```
IF(RACU.LT.0)THEN
N=N-1
RACU=DR+RACU
R=R-DR
TN(N)=TF2
INICIAL=N+1
CAMBIO=N
END IF
```

!XX

! PARA LA ETAPA DE FUSIÓN DEL HIERRO ESPONJA

ELSE

DO I=2,N-1

A=(FLOAT(I)-0.5)**3

B=(FLOAT(I)-1.5)**3

C=1./(A-B)

D=(FLOAT(I)-0.5)**2

E=(FLOAT(I)-1.5)**2

TN(I)=TI(I)*(1-(3.*DFO1*(E+D)*C)) &
& +TI(I-1)*(3.*DFO1*E*C)+TI(I+1)*(3.*DFO1*D*C)

END DO

! PARA NODO CONVECTIVO

TN(N)=TI(N)*(1-(6*DFO1/(12*(N**2)-30*N+19))*((4*(N**2)-12*N+9)+4*DBI1*((N**2)-2*N+1))) &

& +6*DF01/(12*(N**2)-30*N+19)*((4*(N**2)-12*N+9)*TI(N-1)+4*DBI1*((N**2)-2*N+1)*TIN)

! CALCULO DEL RADIO

CONDUCCION=K1*((TN(N)-TN(N-1))/(DR))

CONVECCION=H*(TIN-TF1)

RINC=((CONDUCCION-CONVECCION)*DT)/(RHO1*DH1)

RACU=RACU+RINC

! CALCULO DE LA ENERGIA REQUERIDA PARA FUNDIR EL PELET

DO I=1,N

IF(I.EQ.1)THEN

V=(PI*DR**3)/6.

ELSE

IF(I.EQ.N)THEN

V=(4./3.)*PI*(R**3-(R-DR/2.）**3)

ELSE

V=4.*PI*(DR**3)*(I**2-2.*I+13./12.)

END IF

END IF

Q=RHO1*V*CP1*(TN(I)-TI(I))

QSENSIBLE=QSENSIBLE+Q

END DO

! PARA LA ETAPA DE FUSION DEL PELET

IF(RACU.LT.0)THEN

N=N-1

RACU=DR+RACU

R=R-DR

TN(N)=TF1

INICIAL=N+1

CAMBIO=N

IF(N.LE.2)THEN

GO TO 20

END IF

END IF

END IF


```

!      LECTURA DE LA TEMPERATURA

      TIEMPO=TIEMPO+DT
      IF(TIEMPO.LT.T) THEN

      DO I=1,N

      TI(I)=TN(I)

      IF(INICIAL.EQ.CAMBIO)THEN
      ELSE
      IF(I.EQ.1)THEN
!      WRITE(*,*)TN(I),TIEMPO,TCORAZA
!      WRITE(62,*)TN(I),TIEMPO
      END IF
      END IF

      END DO

      IF(INICIAL.EQ.CAMBIO)THEN
      ELSE
      WRITE(*,*)R,TIEMPO,N,RINC,TCORAZA
      WRITE(61,*)R,TIEMPO

      END IF
      GOTO 10
      END IF

!      CALCULO DEL CALOR LATENTE DE FUSIÓN Y LA ENERGIA NECESARIA
      PARA FUNDIR EL PELET

20     RMAX=0.0077618
      QLPELET=RHO1*(4./3.)*PI*(RO**3)*DH1
      QLESCORIA=RHO2*(4./3.)*PI*(RMAX**3-RO**3)*DH2
      QLATENTE=QLESCORIA+QLPELET
      QTOTAL=QLATENTE+QSENSIBLE

      WRITE(*,*)"CALOR NECESARIO PARA FUNDR EL PELET EN JOULES"
      WRITE(*,*)QTOTAL,QLPELET,QLESCORIA,QLATENTE,QSENSIBLE

END

```

Bibliografía

1. <http://materiales.wikispaces.com>. [En línea]
2. Camara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero. [En línea] <http://www.canacero.org.mx/>.
3. Instituto para la Promoción de Armaduras Certificadas. [En línea] [Citado el: 20 de Mayo de 2010.] <http://www.ipac.es/acero/fabricacion.asp>.
4. **Universidad La Salle**. Cursos de procesos de manufactura. [En línea] [Citado el: 20 de Mayo de 2010.] www.aprendizaje.com.mx/.../Temario1_III.html.
5. InfoAcero. [En línea] <http://www.infoacero.cl/acero/hornos.htm>.
6. Wikipedia. [En línea] 20 de Mayo de 2010. http://es.wikipedia.org/wiki/Alto_horno_el%C3%A9ctrico.
7. [En línea] <http://juliocorrea.wordpress.com/2007/08/23/reduccion-directa/>.
8. **Serge F. Turcotte, A. Hugues Marquis, Terence E. Dancy, Sidbec-Dosco Ltd**. The use of direct reduced iron in the electric arc furnace. *Electric Furnace Steelmaking*.
9. *The increasing role of direct reduced iron in global steelmaking*. **Minnitt, F. Grobler and R.C.A.** Marzo/Abril de 1999, The journal of the South African institute of mining and metallurgy, págs. 111-116.
10. CAMIMEX. [En línea] <http://www.camimex.org.mx/informe/siderurgicos2007.pdf>.
11. *Dissolution kinetics of ferroalloys in steelmaking process*. **Y. E. Lee, H.B.y.B.J.** 6, 1995, iron and Steelmaking, Vol. 22, págs. 486-494.
12. *Heating and melting of D-R pellets in hot slag*. **J. F. Elliot, J. Nauman y K. Sadrnezhaad**. págs. 397-404.
13. *Mathematical modelling of heat transfer during the melting of solid particles in a liquid slag or metal bath*. **Q. Jiao, N.J.Themelis**. 1, 1993, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 32, págs. 75-83.
14. *Continuous Melting of metallised ore pellets*. **Sadrnezhaad, K.** 1981, Iron and Steel International,, págs. 309 - 314.
15. *Effect of molten slag on the melting rate of reduced iron pellets into the iron melt*. **Sato Akira, N.R., Yoshimatsu Shiro, Fukuzawa Akira, Ozaki Tsuyoshi**. 1683, 1979, Tetsu-to-Hagané, Vol. 65, págs. 33 - 39.
16. *Effect of impurities on energy requirements in electric steelmaking with DRI*. **Sadrnezhaad, K.** 1,2,3, 1996, Scientia Iranica, Vol. 33, págs. 113 - 119.

17. *The melting rate of DRI pellets in steelmaking slags.* **J. F. Elliot, K.Sadrnezhaad.** 1980, Iron and Steel International, págs. 327-339.
18. *Rate of melting of partly reduced iron pellets into iron melt.* **Sato Akira, N.R., Yoshimatsu Shiro, Fukuzawa Akira, Ozaki Tsuyoshi,** [ed.] 490 - 495. 195, 1978, Tetsu-to-Hagané, Vol. 65.
19. *The rate of dissolution of pre-reduced iron in molten steel.* **Seaton Carlos E., R.A.A., Gonzalez Manuel y Manrique Milton.** 14, 1981, Iron and Steelmaking, Vol. 23, págs. 14 - 20.
20. *Melting behavior of simulated DRI in liquid steel.* *Archives of Metallurgy and Materials.* **Ramirez-Argaez M. A., A.N.Conejo., O. J. P. González y Y, I .C. Guzmán,** 2, 2008, Vol. 53, págs. 359-364.
21. *The melting of metal spheres involving the initially frozen shells with different material properties.* **Olaf Ehrich, Y.-K.C.y.K.S.,** 3, 1976, Heat and Mass Transfer, Vol. 21, págs. 341-349.
22. *The melting of sponge iron spheres in their own melt.* **Olaf Ehrich, Y.-K.C.y.K.S.** 8, 1979, Arch Eisenhuttenwes, Vol. 50, págs. 329-334.
23. *Modeling on melting of sponge iron particules in iron-bath.* **Zhang, L.** 11, 1996, Steel Research, Vol. 67, págs. 466 - 474.
24. *Melting rates of furnace or ladle additions in steelmaking.* **R. I. L. Guthrie, L.Gourtsoyannis.** 1, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 10, págs. 37 - 46.
25. *Heat transfer modelling of the melting of solid particles in an agitated molten metal bath.* **M. Reza Aboutalebi, J.Vahdati Khaki.** 3-4, 1998, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 37, págs. 305-311.
26. **T. Abel Engh, C.J.S., Olle Wijk.** Addition of alloy components. [aut. libro] T. Abel Engh. *Principles of metal refining.* s.l. : O.S. Publications, 1992, 8, págs. 344-374.
27. *Mass transfer during dissolution of a solid into liquid in the iron-carbon system.* **Robert D. Pehlke, Yeong-U.Kim.** 1974, Metallurgical Transactions, Vol. 5, págs. 2527 - 2532.
28. *Transient heat transfer during initial stages of steel scrap melting.* **Robert D. Pehlke, Yeong-U.Kim.** 1975, Metallurgical Transactions B, Vol. 6B, págs. 585 - 591.
29. *A hot model study on the effect of gas injection upon the melting rate of solid sphere in a liquid bath.* **Shigeji Taniguchi, Shinji Ishiura, Munekazu Ohmi.** 1983, Transactions ISIJ, Vol. 23, págs. 571 - 577.
30. **O'Malley, Joseph Ronald.** The heating and melting of metallic DRI particles in steelmaking slags. [ed.] Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts : s.n., 1983. pág. 368.
31. **Nauman, John Dana.** Analysis of heat transfer in silicate slags. [ed.] Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts : s.n., 1972. pág. 238.

32. **Patankar, Suhas V.** *Numerical heat transfer and fluid flow*. s.l. : Taylor and Francis, 1980.
33. **Çengel, Yunus.** *Transferencia de calor*. Segunda edición. s.l. : Mc Graw Hill.
34. *Evolución energética en Ternium Hylsa DAP de 1957 - 2007*. **Ricardo Viramontes Brown, Carlos Javier Zulaica, Juan Antonio Villarreal Treviño.** Rosario Argentina : s.n., 2007. 16th IAS Steelmaking Conference. págs. 113 - 126.
35. **H. W. Gudenau, H. A. Freidrichs y P. K. Rademacher.** 1981, Arch Eisenhüttenwes, Vol. 52, págs. 261 - 264.
36. *Prediction of thermal conductivity and electrical resistivity of porous metallic materials*. **Anthony Fortini, J. C. Y. Koh.** Great Britain : s.n., 1973, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 16, págs. 2013 - 2021.
37. **Razelos, P.** Methods of obtaining approximate solutions . [aut. libro] James P. Hartnett. [ed.] Warren M. Rohsenow. *Handbook of heat transfer*. s.l. : McGRAW-HILL, 4, págs. 1-77.