

SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA CUBA DE UN ALTO HORNO

**G. Sánchez Sarmiento¹, M.J. Mizdrahi², L. F. Verdeja González³, Angel Alfonso
Fernández³, M.F. Barbés Fernández³.**

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

² Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo. Haedo, Buenos Aires,
Argentina.

³ E.T.S. de Ingenieros de Minas. Cátedra de Siderurgia. Universidad de Oviedo. España.

RESUMEN

El conocimiento de los perfiles de temperatura a lo largo de la cuba de un alto horno resulta un instrumento de gran utilidad para conocer: a) las cargas térmicas y mecánicas que soportan la coraza metálica del horno y los materiales refractarios o metálico-refractarios en contacto con ella; y b) la distribución de temperaturas a lo largo de los materiales (coke, sinter, pellets y mineral de hierro) que constituyen la carga del horno.

Se ponen en evidencia en este trabajo las consecuencias del conocimiento de las heterogeneidades térmicas existentes sobre el ciclo de vida de los materiales y el régimen operativo del proceso metalúrgico de producción de arrabio.

Palabras clave: Alto horno. Cuba. Heterogeneidades térmicas.

1.- INTRODUCCION

El conocimiento de las interacciones de las reacciones químicas con los procesos físicos que tienen lugar en el alto horno y su influencia sobre la marcha operativa del mismo es aún insuficiente en opinión de los autores.

Ciertamente desde los años 60 del siglo pasado se ha tenido un conocimiento más certero de lo que es posible encontrar en la cuba, vientre y etalajes del alto horno. En aquella época se empieza a hablar de diferentes zonas en el horno: secado, de reserva química, cohesiva y de goteo [1].

Igualmente, y como consecuencia de la mejora de la calidad del coke y de la optimización del gas reductor en reacciones de reducción indirecta, la combustión parcial del exceso de coke en la zona de toberas provoca la existencia de una región de coke estanca no reactiva, hacia el centro de la zona de etalajes, conocida popularmente en siderurgia como hombre muerto (*dead man*). Por encima del hombre muerto se sitúa la zona de coke reactivo sobre la cual descansa la zona cohesiva del horno. Las dimensiones de todas ellas y su área de influencia condicionan las variables operativas del horno tales como son la composición, temperatura y flujo masivo de todas las corrientes de entrada y salida del horno.

Durante las dos últimas décadas los responsables del alto horno han tenido a su disposición una serie de instrumentos de control, cada vez más sofisticados, para determinar el gran número de variables que intervienen en la producción de arrabio. No obstante, la gran mayoría de las variables hacen referencia a lo que podríamos llamar, en términos matemáticos, las condiciones de contorno del problema [2]:

- Temperatura de los gases en el tragante, arrabio y escoria, y del viento caliente.

Introducción

Segunda Reunión Argentina de Usuarios de ABAQUS.
Buenos Aires, 10-11 de setiembre de 2001.

- Temperatura del agua en las cajas de refrigeración o en las paredes del horno.
- Presión y velocidades de los gases en el tragante y en las toberas.
- Presión del agua en las cajas de refrigeración.

Bajo las circunstancias actuales, en la mayoría de los altos hornos instalados sería interesante plantear para cada uno de ellos un modelo global que permita dar respuesta a todos los procesos físico-químicos que suceden en su interior debido a las siguientes razones:

A.- Por la existencia de una información mínima aportada por controles externos necesaria para la resolución de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que gobiernan los fenómenos de transporte existentes entre las distintas corrientes.

B.- A la potencia de cálculo de las computadoras actuales que permiten resolver en pocos segundos problemas que hace dos décadas demoraban días.

A diferencia de los investigadores de las escuelas japonesas, que centran su atención en las ecuaciones de transporte y de cantidad de movimiento para simular el comportamiento de los flujos de materiales en el interior del horno [3,4], los presentes autores concentran sus esfuerzos en la resolución de las ecuaciones diferenciales de transferencia de calor, en estado estacionario o transitorio, conocidas como leyes de Fourier.

En el estado térmico de la cuba del alto horno es preciso considerar las siguientes hipótesis de trabajo:

- 1.- Que para todas las regiones existentes en la cuba del alto horno (figuras 1 y 2), el comportamiento de los materiales es el equivalente al del sólido rígido.
- 2.- La conductividad térmica de las regiones en las que coexisten sólidos granulares, parcialmente fundidos o fundidos con gases reductores puede suponerse que dada por:

$$K_{eq} = h L \quad [1]$$

siendo L la dimensión lineal característica de la región considerada; h el coeficiente de transporte convectivo del fluido y K_{eq} la conductividad térmica equivalente de la región considerada como un sólido rígido.

La distribución de temperatura a lo largo de los materiales existentes en los etalajes y la cuba del alto horno depende de los datos dimensionales siguientes:

- espesor de las capas de coque,
- espesor de las capas férricas,
- situación y espesor de la zona cohesiva,
- situación y espesor de la zona de coque activo,
- situación y dimensiones del hombre muerto,

y de las siguientes temperaturas (condiciones de contorno del problema):

- temperatura media de los gases en el transporte,
- temperatura del agua de refrigeración de las paredes, y
- temperatura al nivel de las toberas.

La validación del modelo puede realizarse comparando las temperaturas calculadas por el modelo con la registrada por la sonda horizontal que se está instalando, en la mayoría de los

Introducción

Segunda Reunión Argentina de Usuarios de ABAQUS.
Buenos Aires, 10-11 de setiembre de 2001.

hornos que actualmente se reconstruyen, entre la primera y segunda capa de alimentación de sólidos granulados.

Es decir que, de manera indirecta, a partir de las temperaturas de la sonda horizontal superior se pueden confirmar que las hipótesis dimensionales anteriormente citadas son correctas y que las dimensiones y situación de la zona cohesiva y el hombre muerto son coherentes con las temperaturas experimentales.

Por otra parte, el modelo térmico permite un control interno de la validez de las hipótesis de partida, ya que a lo largo de la zona cohesiva se han de cumplir unos niveles térmicos establecidos por los eutécticos – peritéticos ternarios oxídicos: $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO} -$

SiO_2 ; $\text{FeO} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ o por el propio diagrama $\text{Fe} - \text{C}$ [1].

2.- RESULTADOS

En las figuras 1 y 2, se muestran las dimensiones de un Alto Horno capaz de producir unas 6500 t. de arrabio al día [5,6].

Se analizaron los efectos de dos parámetros básicos del modelo: la conductividad efectiva del coque activo y la generación de calor en las capas férricas, definiéndose los siguientes cuatro casos:

Caso 1: Conductividad del coque activo: 1000 w/mK; Generación de calor: 151 w/m³ en la quinta capa; 182 w/m³ en la sexta capa; 212 w/m³ en la séptima capa.

Caso 2: Conductividad del coque activo: 1000 w/mK; Generación de calor: 351 w/m³ en la quinta capa; 382 w/m³ en la sexta capa; 512 w/m³ en la séptima capa.

Caso 3: Conductividad del coque activo: 1000 w/mK; Generación de calor: 551 w/m³ en la quinta capa; 582 w/m³ en la sexta capa; 712 w/m³ en la séptima capa.

Caso 4: Conductividad del coque activo: 10 w/mK; Generación de calor: 151 w/m³ en la quinta capa; 182 w/m³ en la sexta capa; 212 w/m³ en la séptima capa.

Comparando los casos 1 y 3 se ha intentado analizar la influencia que la generación de calor en las capas férricas tiene sobre la temperatura, y comparando los casos 1 y 4 se estudia el efecto de la conductividad efectiva del coque activo.

Las distribuciones espaciales de temperatura en en plano meridiano para los cuatro casos planteados se muestran en las figuras 4 a 7, mientras que las distribuciones de temperatura a lo largo del eje de revolución para cada caso se comparan en la figura 8.

3.- CONCLUSIONES

El presente trabajo pretende ser un primer aporte a los modelos térmicos del alto horno y, a raíz de sus primeros resultados, constituir un instrumento de trabajo para la definición – acotación de las zonas cohesivas y de hombre muerto del alto horno.

Por otra parte, los autores del trabajo tienen la sensación de que en la mayoría de los modelos globales que se presentan para dar respuesta a los fenómenos que tiene lugar en la cuba, vientre y etalajes del horno, aunque la potencia de cálculo de las actuales computadoras es muy elevada, son extraordinariamente complejos y no están al alcance de todos los usuarios (se tienen que acoplar y resolver simultáneamente sistemas de ecuaciones diferenciales que hacen referencia a distintas corrientes – fases del horno).

Introducción

Segunda Reunión Argentina de Usuarios de ABAQUS.
Buenos Aires, 10-11 de setiembre de 2001.

Finalmente, si para predecir un aumento de la temperatura en el tragante o una falta de permeabilidad de la carga en las ventanas de coque puede realizarse mediante simulaciones más sencillas accesibles mediante la utilización de programas comerciales FEM, no tiene demasiado sentido acudir a la farragosidad operativa y funcional de los modelos anteriormente citados.

AGRADECIMIENTOS

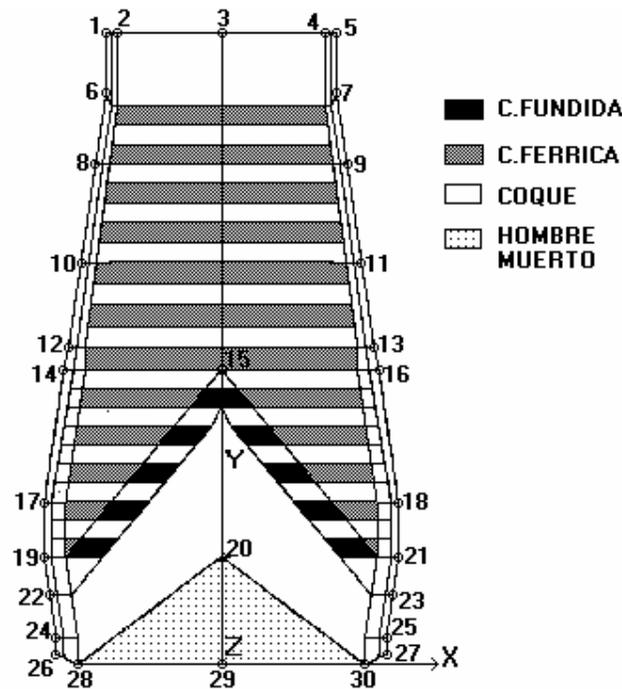
Los autores quieren agradecer el apoyo del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España y de Aceralia en la redacción del trabajo.

BIBLIOGRAFIA

1. J.P. Sancho, L.F. Verdeja y A. Ballester: “*Metalurgia Extractiva: Procesos de obtención*”. Vol. II, Ed. Síntesis, Madrid, Octubre, 55 – 82, 2000.
2. A. Poos: “*Measurement techniques in blast furnace ironmaking and their benefits for industrial practice*”. Proceedings of ECSC workshop, Düsseldorf, 27 – 28 January EUR 18360 EN, 1998.
3. S.A. Zaimi, T. Akiyama, J.B. Guillot y J.I. Yagi: “*Sophisticated multi – phase multi – flow modeling of the blast furnace*”. ISIJ International, Vol. 40, Nº 4, 322 –331, 2000.
4. G.X.Wang, J.D. Litster y A.B. Yu: “*Simulation of gas – liquid flow in dripping zone of blast furnace involving impermeable fused layers*”. ISIJ International, Vol. 40, Nº 7, 627 – 636, 2000.
5. M.A. Ferrón Paramio: “*Estudio de los fenómenos de transferencia de calor en la cuba del horno alto y la influencia de la zona del hombre muerto sobre ellos*”. Proyecto Fin de Carrera. Director: L. F. Verdeja. ETSIMO. Universidad de Oviedo. Septiembre 1999.
6. M. Tuñón Hijosa: “*Simulación térmica en la cuba del horno alto*”. Proyecto Fin de Carrera. Director: L. F. Verdeja. Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Oviedo. Septiembre 2000.

Introducción

Segunda Reunión Argentina de Usuarios de ABAQUS.
Buenos Aires, 10-11 de setiembre de 2001.



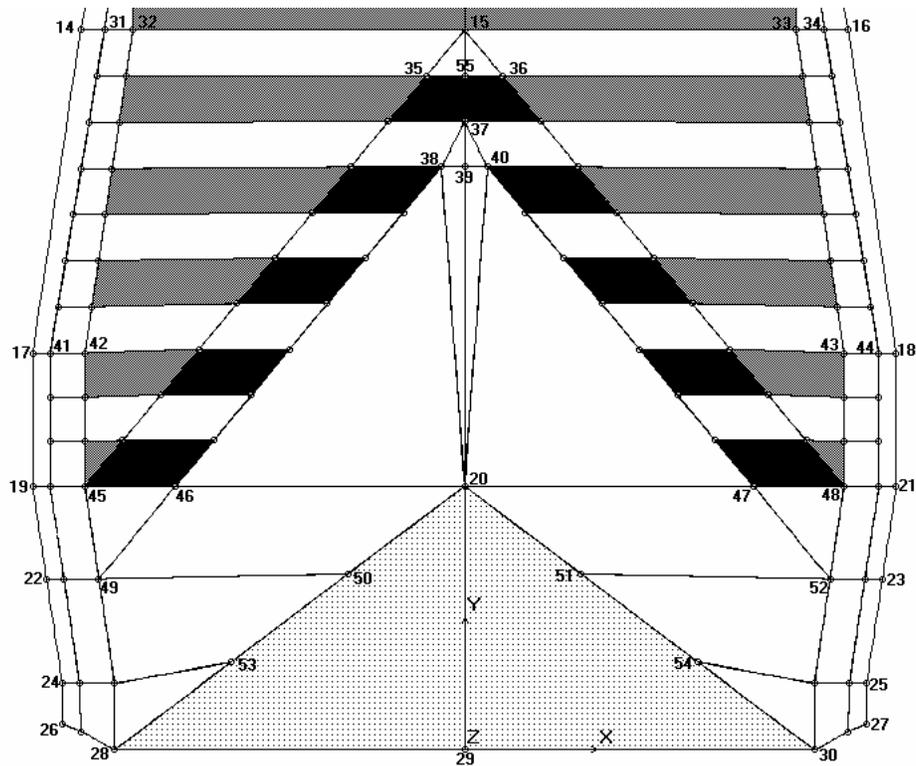
Coordenadas de posición en metros

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Punto	Coordenada X	Coordenada Y
1	-4.646	25.485	16	6.35	11.912
2	-4.198	25.485	17	-7.14	6.57
3	0	25.485	18	7.14	6.57
4	4.198	25.485	19	-7.14	4.37
5	4.646	25.485	20	0	4.37
6	-4.646	23.07	21	7.14	4.37
7	4.646	23.07	22	-6.9095	2.832
8	-5.066	20.23	23	6.9095	2.832
9	5.066	20.23	24	-6.65	1.1
10	-5.6564	16.237	25	6.65	1.1
11	5.6564	16.237	26	-6.65	0.4292
12	-6.1681	12.777	27	6.65	0.4295
13	6.1681	12.777	28	-5.785	0
14	-6.35	11.912	29	0	0
15	0	11.912	30	5.785	0

Figura 1.- Simulación de las regiones férricas, reductoras (coke), de fusión de la carga, de coke activo y del hombre muerto en un alto horno con una capacidad de producción de 6500 t. de arrabio por día.

Introducción

Segunda Reunión Argentina de Usuarios de ABAQUS.
Buenos Aires, 10-11 de setiembre de 2001.



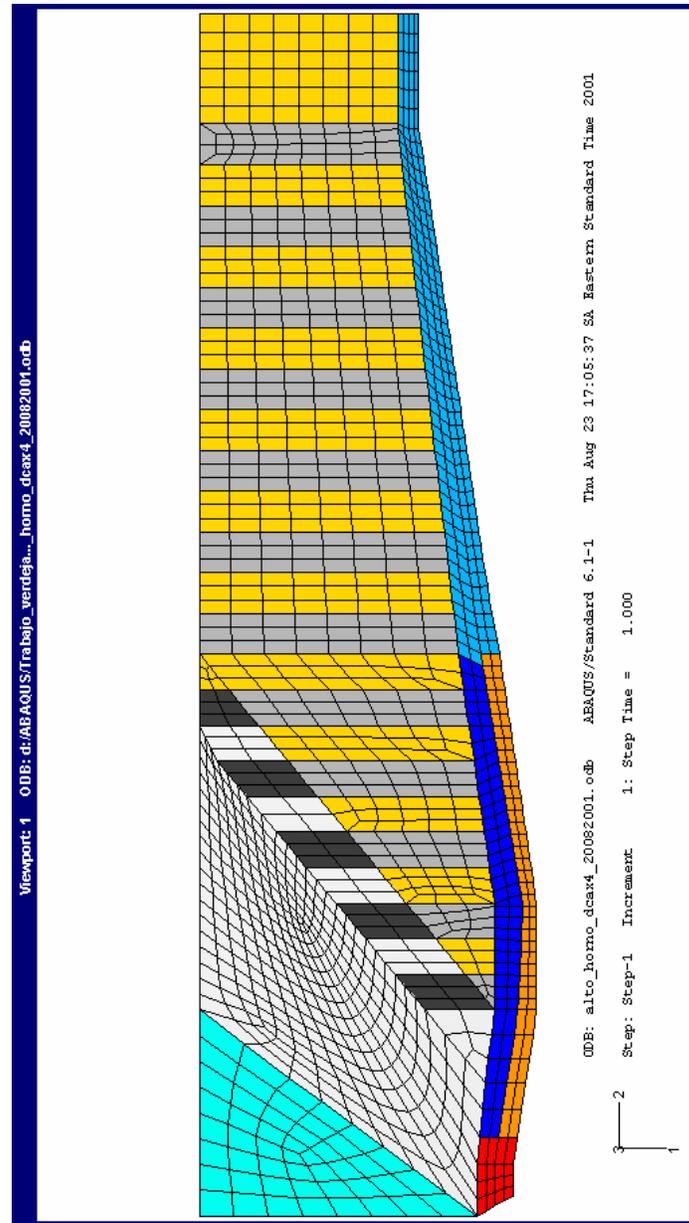
Coordenadas de posición en metros

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Punto	Coordenada X	Coordenada Y
14	-6.35	11.912	35	-0.627	11.158
15	0	11.912	36	0.627	11.158
16	6.35	11.912	37	0	10.404
17	-7.14	6.57	38	-0.382	9.649
18	7.14	6.57	39	0	9.649
19	-7.14	4.37	40	0.382	9.649
20	0	4.37	41	-6.852	6.57
21	7.14	4.37	42	-6.257	6.57
22	-6.909	2.832	43	6.257	6.57
23	6.909	2.832	44	6.852	6.57
24	-6.65	1.1	45	-6.257	4.37
25	6.65	1.1	46	-4.775	4.37
26	-6.65	0.429	47	4.775	4.37
27	6.65	0.429	48	6.257	4.37
28	-5.785	0	49	-6.044	2.832
29	0	0	50	-1.92	2.913
30	5.785	0	51	1.92	2.913
31	-5.953	11.912	52	6.044	2.832
32	-5.485	11.912	53	-3.857	1.457
33	5.485	11.912	54	3.857	1.457
34	5.953	11.912	55	0	11.158

Figura 2.- Detalle de la zona cohesiva (con las ventanas de coke) y de las regiones de coke activo y hombre muerto en la cuba del alto horno dibujada en la figura 1.

Introducción

Segunda Reunión Argentina de Usuarios de ABAQUS.
Buenos Aires, 10-11 de setiembre de 2001.



Color	Material	Conductividad [w/mm K]
Agua	Hombre Muerto	0.0137
Blanco	Coque Activo	1.0000
Gris Oscuro	C. Fundida	0.0025
Gris Claro	C. Ferrica	0.0025
Azul	Refractario 1	0.0023
Azul Claro	Refractario 2	0.0150
Naranja	Refractario 3	0.0010
Rojo	Refractario 4	0.0012

Figura 3. Distribución de materiales en la cuba del alto horno analizado.

Introducción

Segunda Reunión Argentina de Usuarios de ABAQUS.
Buenos Aires, 10-11 de setiembre de 2001.

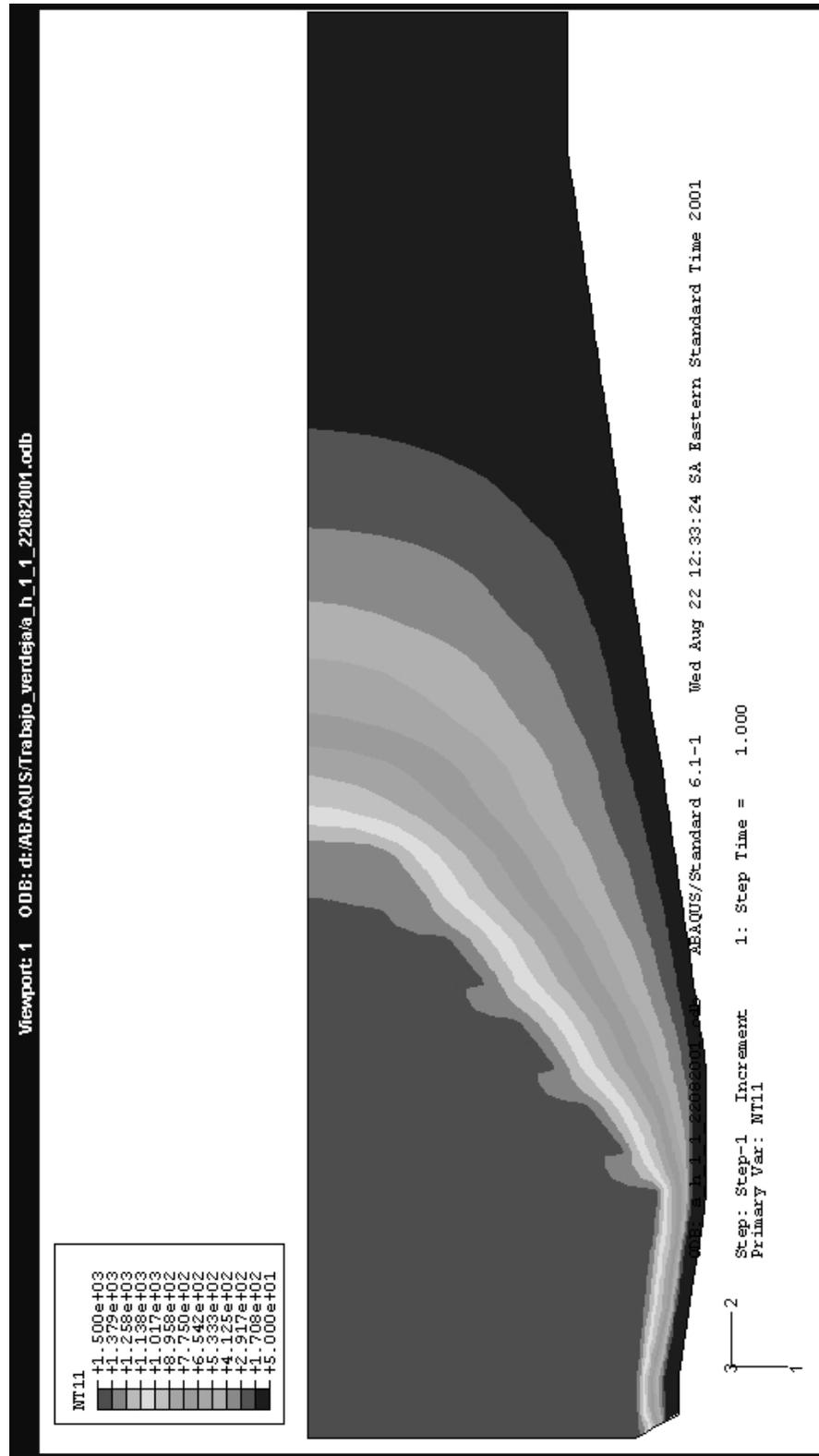


Figura 4. Distribución de temperatura para el Caso 1: Conductividad del coque activo: 1000 w/mK; Generación de calor: 151 w/m³ en la quinta capa; 182 w/m³ en la sexta capa; 212 w/m³ en la séptima capa.

Introducción

Segunda Reunión Argentina de Usuarios de ABAQUS.
Buenos Aires, 10-11 de setiembre de 2001.

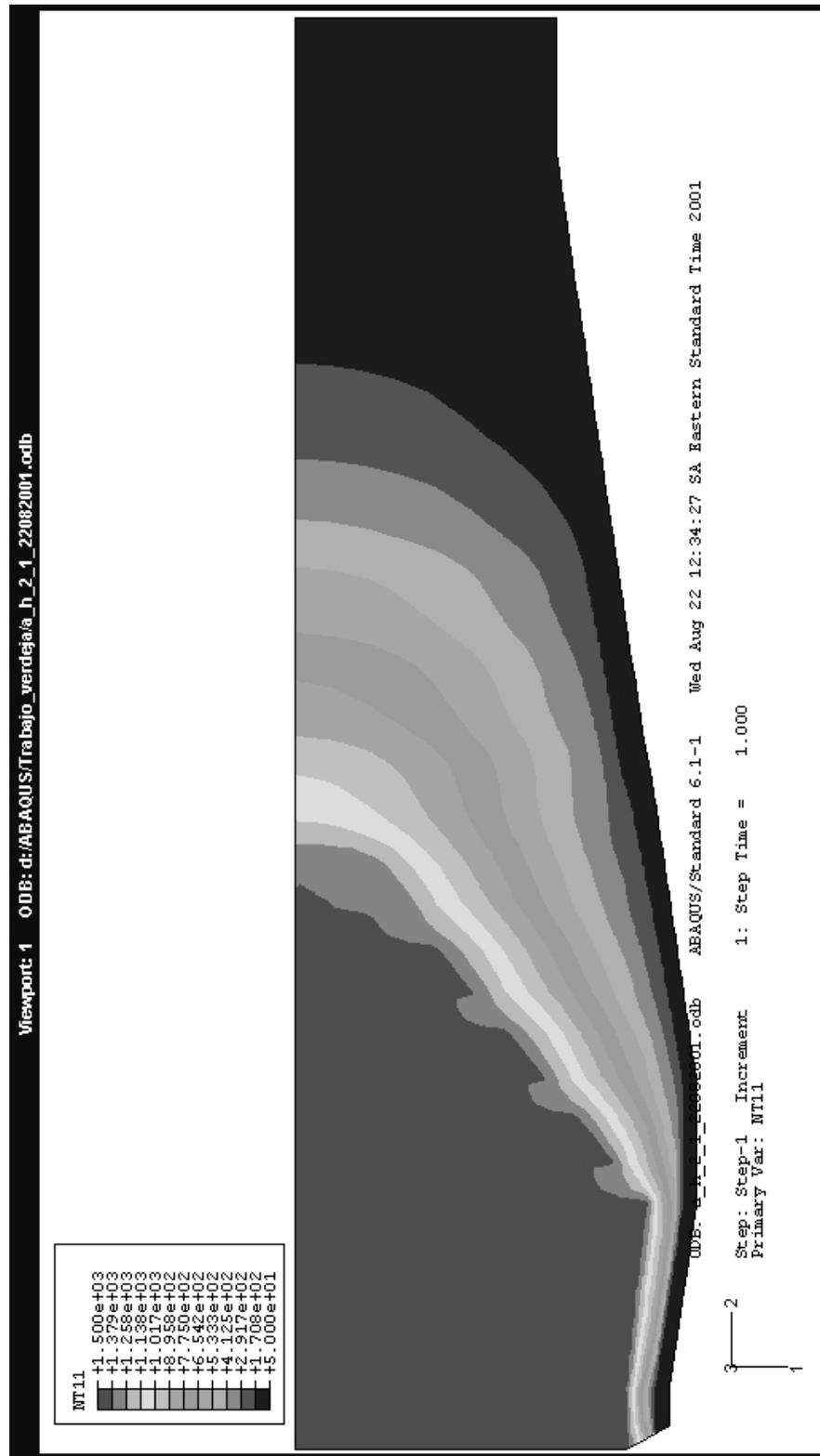
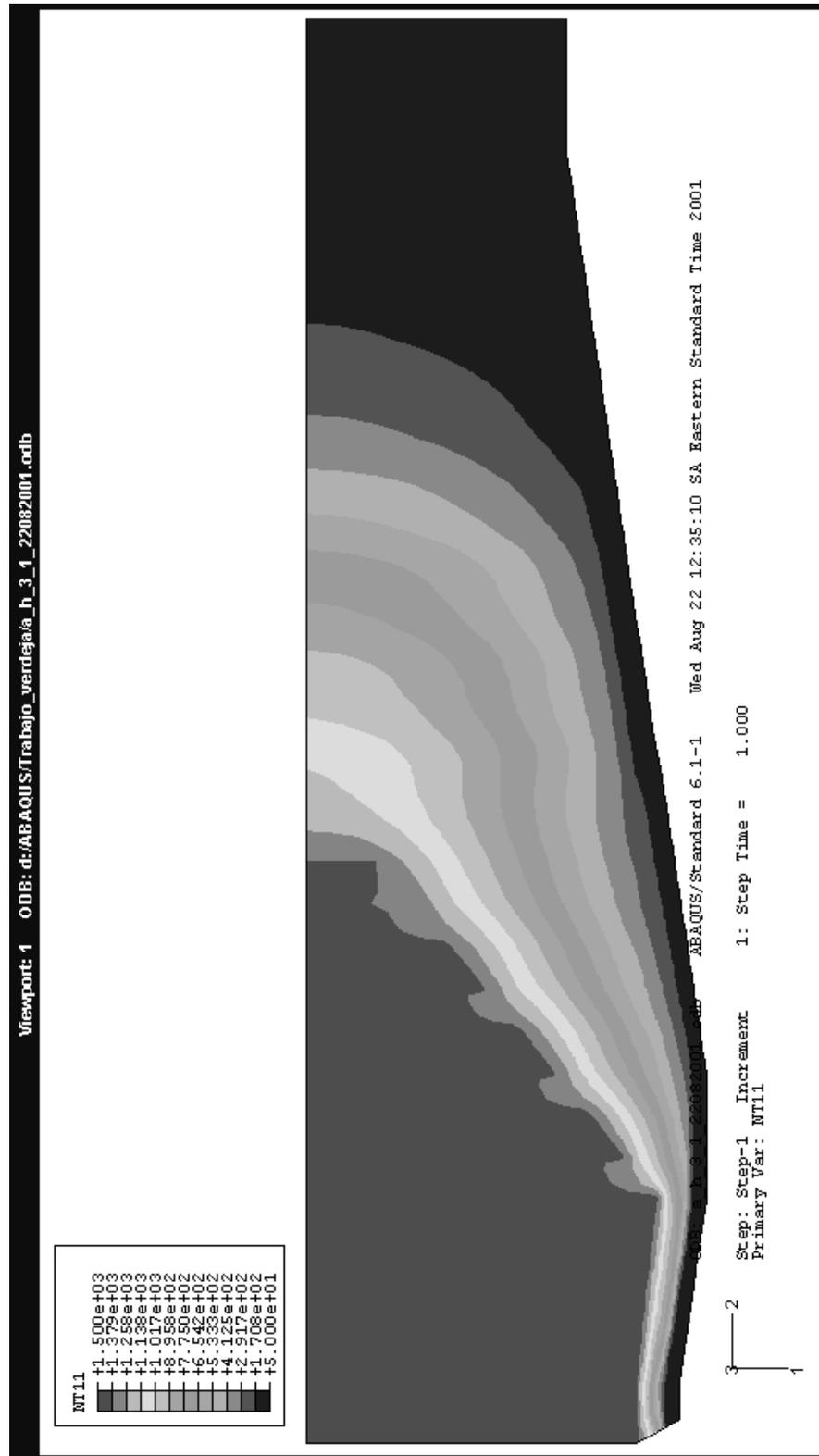


Figura 5. Distribución de temperatura para el Caso 2: Conductividad del coque activo: 1000 w/mK; Generación de calor: 351 w/m³ en la quinta capa; 382 w/m³ en la sexta capa; 512 w/m³ en la séptima capa

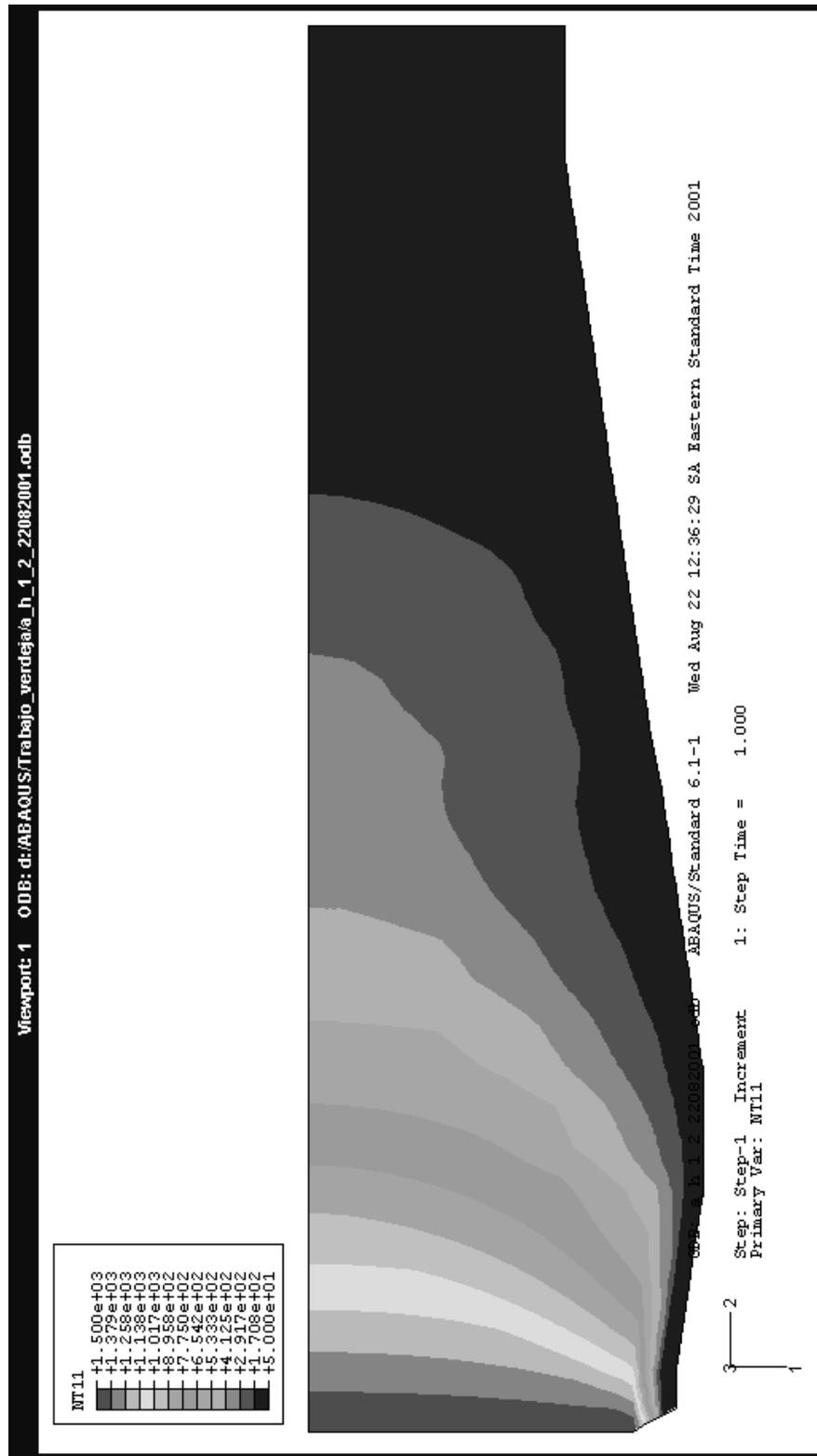
Introducción

Segunda Reunión Argentina de Usuarios de ABAQUS.
Buenos Aires, 10-11 de setiembre de 2001.



Introducción

Segunda Reunión Argentina de Usuarios de ABAQUS.
Buenos Aires, 10-11 de setiembre de 2001.



Introducción

Segunda Reunión Argentina de Usuarios de ABAQUS.
Buenos Aires, 10-11 de setiembre de 2001.

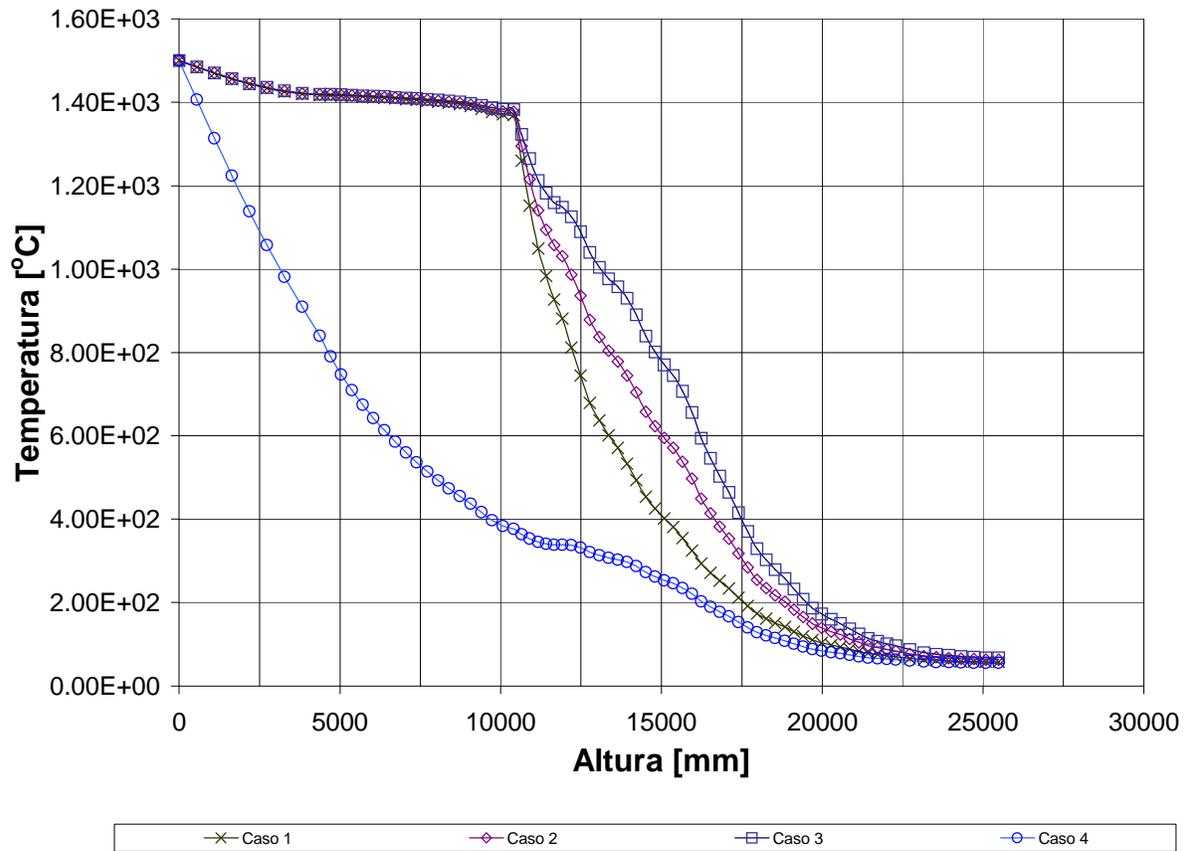


Figura 8. Distribución de temperatura calculada a lo largo del eje del alto horno para cada uno de los casos analizados.