

5 Resultados e Discussão

Objetivando apresentar os potenciais de aplicação do modelo concebido no capítulo anterior, será mostrado o comportamento de um forno de auto-redução, do tipo cuba, na zona em que opera com uma mistura de aglomerados auto-redutores e booster. Assim, nesta seção serão apresentados e discutidos os seus principais aspectos internos e as previsões dos principais parâmetros resultantes de simulações operacionais relevantes para esta tecnologia.

5.1. Descrição do forno modelado

Conforme já apresentado, o forno tratado neste estudo hospeda um processo de auto-redução em forno de cuba, de forma tal que sua modelagem poderá ser empregada a qualquer processo que utilize, como base de sua tecnologia, equipamento similar, mas realizando uma pós-combustão dos gases por meio de um nível secundário de ventaneiras. Evidentemente, o forno completo deve possuir uma cuba inferior para garantir a queima de combustível, através de um sopro primário (V1), a fim de gerar energia, promover a reação de Boudouard e realizar as reduções dos óxidos não-ferrosos e de ferro residuais. Na Figura 13 observa-se este forno, onde está assinalada a parte modelada. Cabe ressaltar que a modelagem corresponde, por razões de simetria, à metade da cuba.

A Figura 14 mostra a malha de volumes finitos gerada para simular o processo, conforme ilustrado no item anterior.

A Tabela 21 mostra as principais características da metade do forno considerado no modelo.

Tabela 21: Características da metade do forno considerado no modelo

Parâmetros	Valor
Volume interno da 1/2 do forno	4,8 m ³
Número de ventaneiras na V2	16
Dimensões	4m X 0,6m X 2m

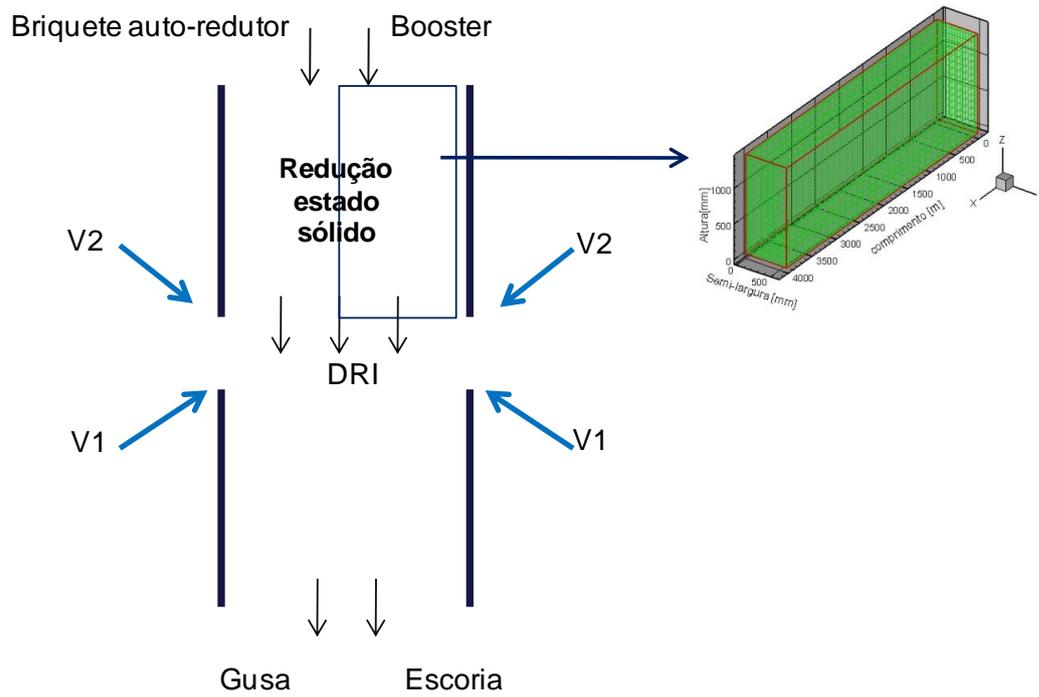


Figura 13 – Gráfico de um Forno de Auto-redução indicando a parte do forno modelado

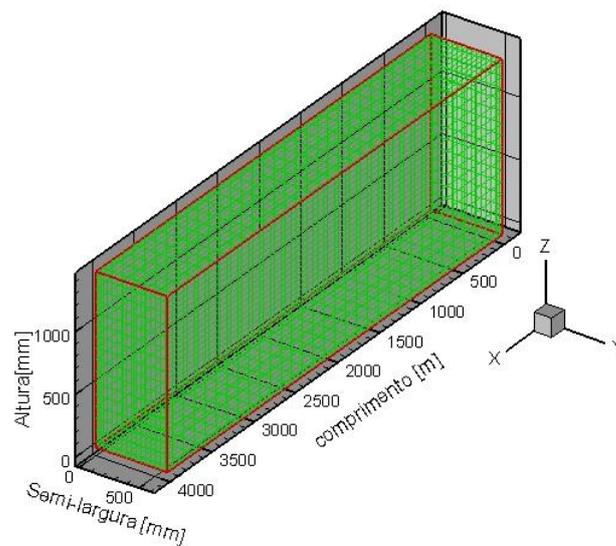


Figura 14 –Malha de volumes finitos associada à cuba superior de um forno de auto-redução.

5.2.

Dados considerados para o programa (Caso Base).

A fim de se ter uma situação operacional para referencia e comparação com os casos simulados, foi selecionado um caso básico, conforme apresentado a seguir. Os dados considerados pelo programa são resumidos na Figura 15 que apresenta os dados da taxa de alimentação, do sopro da V2, o gás de baixo, os dados da V1 e os principais dados do gusa e escória. Complementarmente, os cálculos realizados para obter as citadas informações estão detalhados no Apêndice B.

Após a verificação dos resultados do caso base foram em seguida simulados os demais casos.

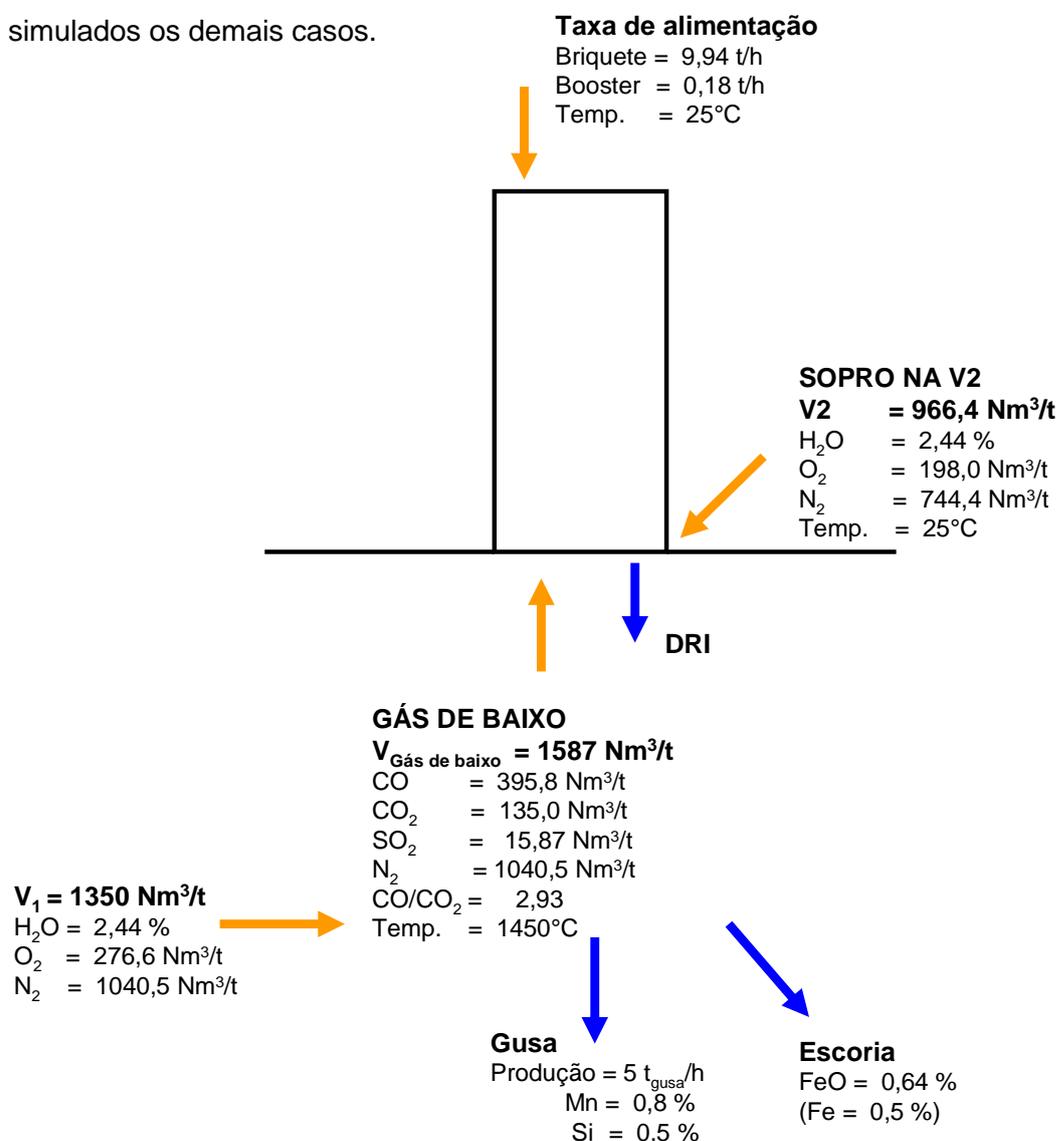


Figura 15: Dados considerados para o programa (Caso Base)

5.3. Dados de entrada para o modelo (Caso Base)

A Tabela 22 lista as características das fases presentes no processo.

Tabela 22: Características das fases

Fase	Dado	Valor
Sólido	Temperatura de entrada do material sólido	25 °C
	Taxa de alimentação média do briquete	2.7608 kg/s
	Taxa de alimentação média do booster	0.0492 kg/s
	Densidade do briquete	1240 kg/m ³
	Densidade do booster	700 kg/m ³
	diâmetro partícula C briquete	100 mesh = 149 microns
	diâmetro partícula Min Fe briquete	65 mesh = 230 microns
	Granulometria Booster	60 mm
	Dimensões do briquete	55 X 45 X 25 mm
	Poder calorífico da MV do booster	7755 cal/kg
Poder calorífico da MV do carvão do briquete	8760 cal/kg	
Gás	Temperatura do gás de baixo	1450 °C
	Temperatura do sopro na V2	25 °C
	Vazão do gás de baixo	1587 Nm ³ /ton gusa
	Vazão do sopro na V2	966 Nm ³ /ton gusa

A Tabela 23 mostra as temperaturas de início da reação consideradas na modelagem.

Tabela 23: Temperaturas de início da reação

Temperaturas de início da reação	T °C
Reação Booster - Oxigênio	350
Reação Carvão do briquete - Oxigênio	350
Reação Booster - CO ₂	650
Reação Carvão do briquete - CO ₂	650
Reação combustão do polisacarídeo	350
Reação calcinação CaCO ₃	700

As Tabelas 24 e 25 reportam as composições das matérias voláteis dos carvões.

Tabela 24: Composição da matéria volátil do booster

Análise da MV booster	Fração
Carbono	0.018
Oxigênio atômico	0.037
Hidrogênio atômico	0.042
Nitrogênio atômico	0.016
Total (fração mássica MV no booster)	0.113

Tabela 25: Composição da matéria volátil do briquete

Análise da MV do carvão do briquete	Fração
Carbono	0.0179
Oxigênio atômico	0.0018
Hidrogênio atômico	0.001
Nitrogênio atômico	0.003
Total (fração mássica MV no briquete)	0.0237

A Tabela 26 mostra a composição química das matérias-primas utilizadas nesta simulação. A carga metálica é um típico briquete auto-redutor e o “booster” é um antracito com baixo volátil.

Tabela 26: Composição do aglomerado auto-redutor e dos carvões

	Constituinte	%
Briquete	C	15.75
	Fe ₂ O ₃	66.44
	FeO	1.09
	H ₂ O	1.51
	SiO ₂	3.18
	Al ₂ O ₃	1.16
	MgO	0.04
	CaO	0.05
	MV	2.37
	S	0.15
	CaCO ₃	6.28
	Ganga	0.79
	Orgânico polisacarideo	1.20
	Fe total	47.35
Carvão (Booster e briquete)	C	75.00
	Volátil	11.30
	S	0.70
	SiO ₂	7.60
	Al ₂ O ₃	3.40
	MgO	0.14
	CaO	0.12
	ganga	1.74

Na Figura 16 encontram-se os principais dados de entrada do modelo para o caso base. Os cálculos realizados para obter as citadas informações estão detalhados no Apêndice B.

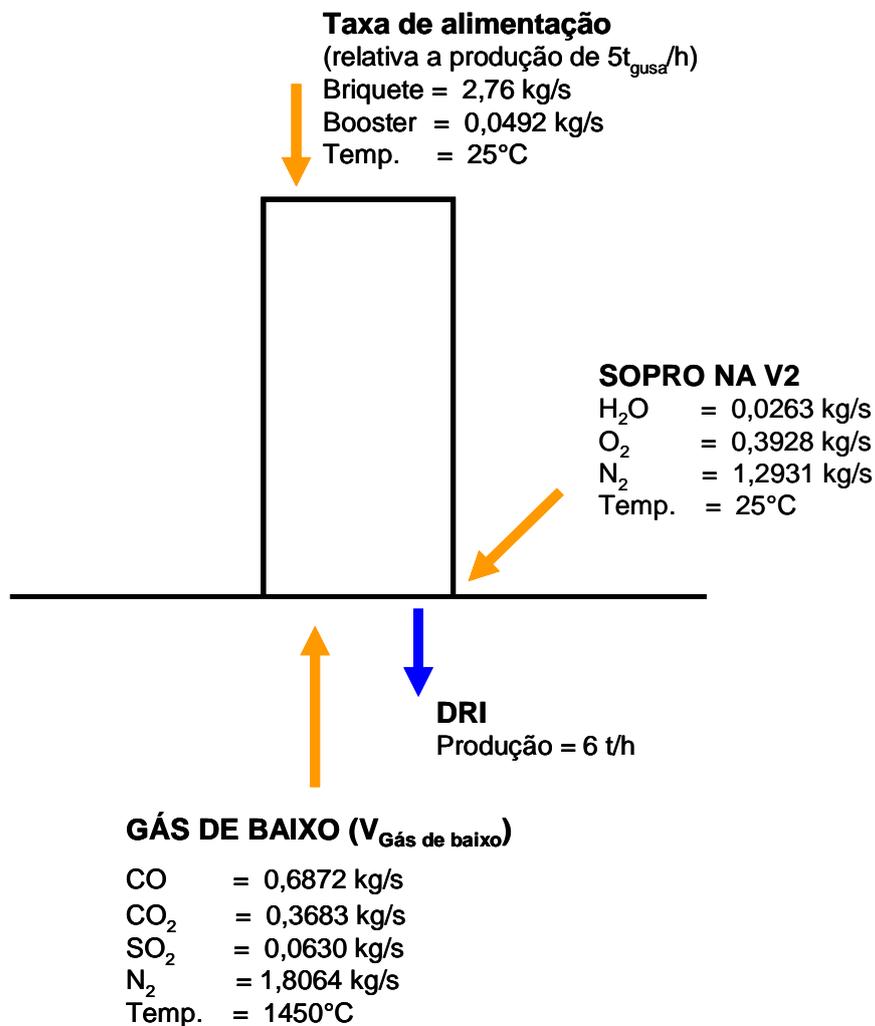


Figura 16: Principais dados de entrada para o modelo (Caso Base)

5.4. Parâmetros avaliados

Foram avaliados os efeitos da temperatura e da vazão do sopro na V2 e do gás de baixo, além do efeito da variação da razão CO/CO₂, da taxa de alimentação e da perda de calor pelas paredes do forno.

A Tabela 27 apresenta os dados do caso base e a Tabela 28 apresenta os parâmetros dos oito casos comparativos rodados.

Tabela 27: Dados do caso base

Dados	Caso Base	
Temperatura do gás de baixo	1450	°C
Temperatura do sopro na V2	25	°C
Vazão do gás de baixo	1586,7	Nm ³ /t
Vazão do sopro na V2	966,4	Nm ³ /t
Razão CO/CO ₂ gás baixo	2,93	-
Taxa de alimentação briquete	9,94	t/h
Emissividade (ε)	0,001	
Coeficiente de troca de calor por convecção (h)	8	W/m ² K

Tabela 28: Casos comparativos

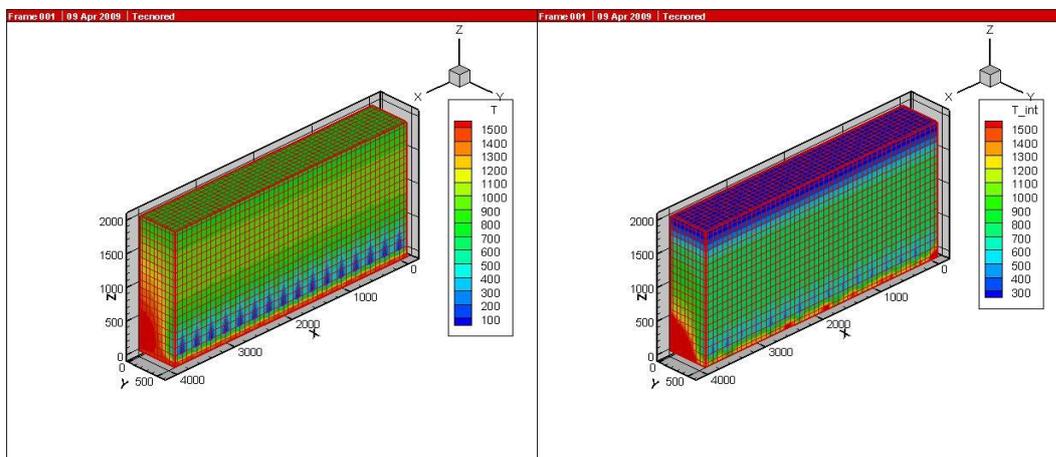
CASOS	Dado
CASO 1	Vazão do sopro na V2 1300 Nm ³ /t
CASO 2	Vazão do gás de baixo 1850 Nm ³ /t
CASO 3	Temperatura do sopro na V2 250°C
CASO 4	Temperatura do gás de baixo 1300°C
CASO 5	Temperatura do gás de baixo 1650°C
CASO 6	Razão CO/CO ₂ gás baixo 10
CASO 7	Taxa de alimentação de briquete 12 ton/h
CASO 8	ε de 0,3 e h de 500 W/m ² K

5.5. Gráficos gerados

5.5.1. Caso Base

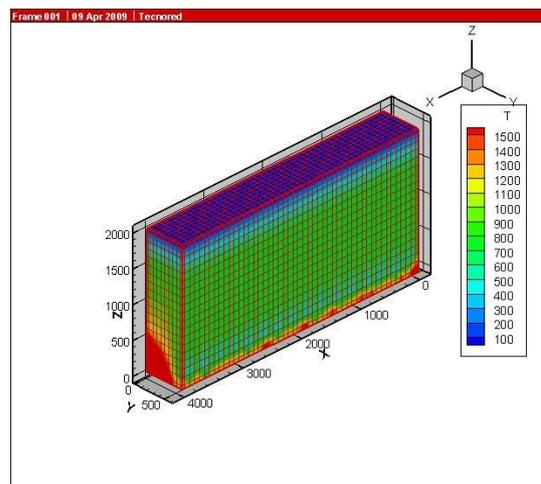
Na Figura 17 os campos de temperaturas para as fases “gás exterior”, “gás interior” e sólidos (DRI + char) previstos pelo modelo para o caso base são apresentados.

Observam-se elevações consideráveis das temperaturas na região inferior esquerda tanto da fase “gás exterior”, “gás interior” e da fase sólida (DRI + char) devido à queima do CO pelo ar (injeção na V2) proveniente da zona inferior do forno, liberando calor que é imediatamente transferido à carga sólida descendente.



a) Temperatura do “gás exterior”

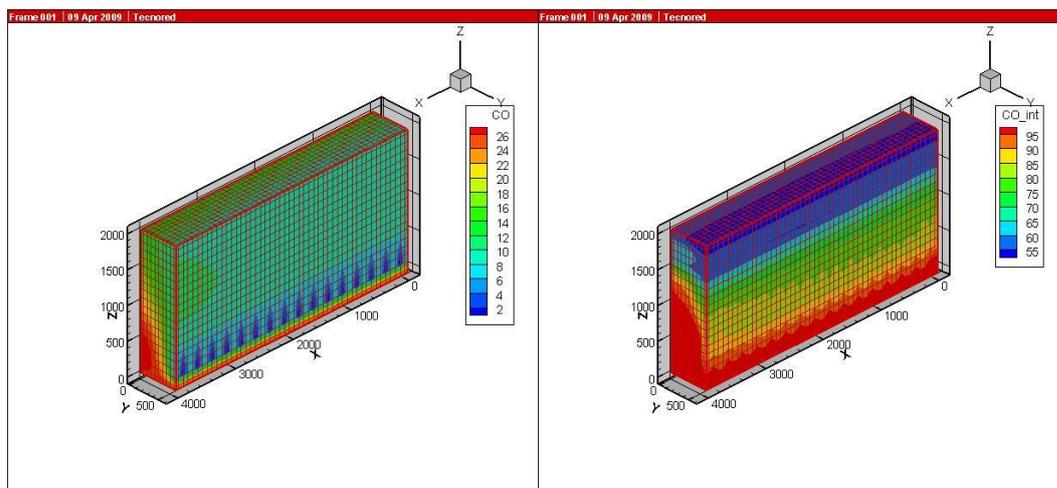
b) Temperatura do “gás interior”



c) Temperatura do sólido (DRI + char)

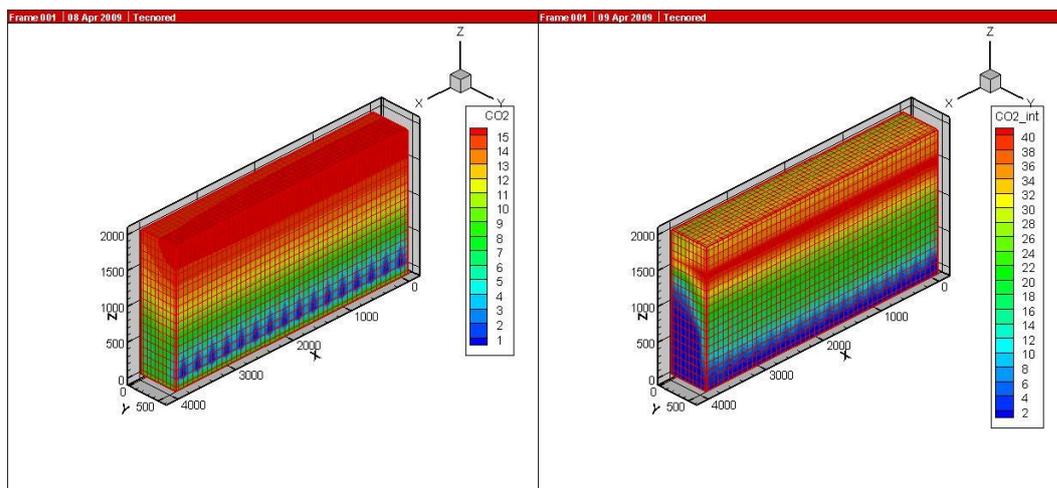
Figura 17 - Evolução das temperaturas no interior do forno de auto-redução para o caso base.

Na Figura 18 estão representados os campos tridimensionais das condições de redução na atmosfera gasosa. A atmosfera rica em CO da fase “gás exterior” é produto principalmente da combustão secundária devido à injeção de ar pelas ventaneiras (V2) (18–a), o CO da fase “gás interior” (18–b) é resultado da reação de Boudouard gerado no interior do briquete auto-redutor. Por outro lado o CO₂ da fase “gás exterior” (18–c) resulta principalmente do produto da combustão do C pelo ar e do CO do gás de baixo pelo O₂ e o CO₂ da fase “gás interior” (18–d) resultante da redução dos óxidos de ferro é consumido através da reação de perda por solução (“solution loss”).



a) CO do “gás exterior”

b) CO do “gás interior”



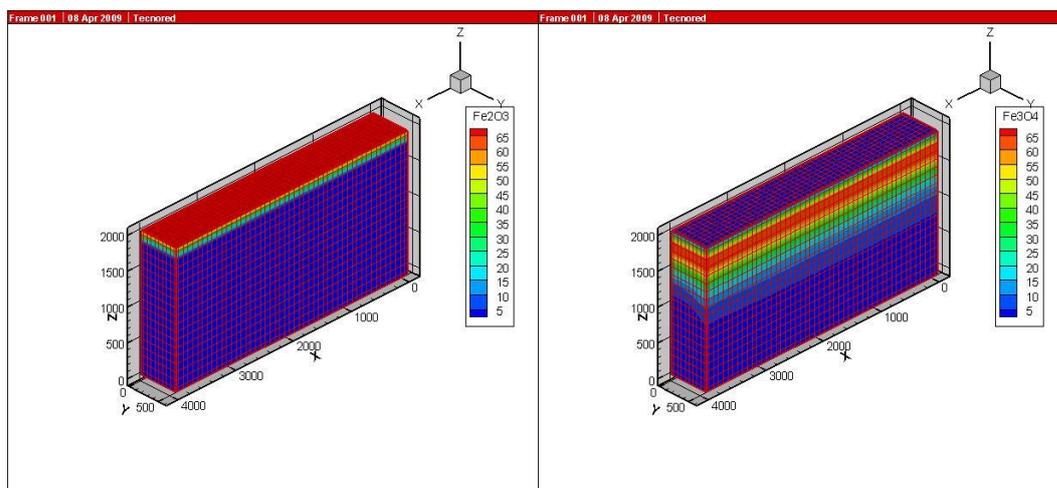
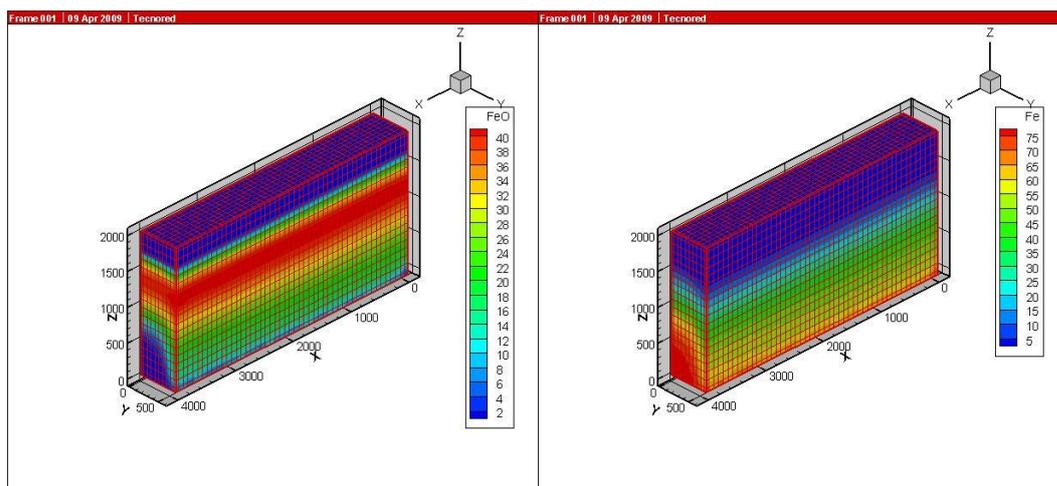
c) CO₂ do “gás exterior”

d) CO₂ do “gás interior”

Figura 18 - Condições de redução na atmosfera gasosa do caso base

Na Figura 19 apresenta-se a distribuição dos óxidos de ferro pré-reduzidos e do Fe metálico no interior do forno de auto-redução. Observa-se que a hematita é rapidamente reduzida a magnetita e a magnetita perdura até aproximadamente ter descido 0,5m da altura da cuba sendo finalmente reduzida a wustita e finalmente a ferro metálico.

A predominância do ferro metálico encontra-se na região inferior esquerda e ela é resultado da alta concentração de CO no “gás interior” desta zona, do campo de temperaturas do sólido e do “gás interior” resultante da combustão secundária que impõe condições fortemente redutoras.

a) Fe_2O_3 b) Fe_3O_4 

c) FeO

d) Fe metálico

Figura 19 - Evolução dos óxidos de ferro e do Fe metálico para as diversas etapas de auto-redução do caso base

A Figura 20 apresenta o perfil de distribuição do grau de redução. Igualmente ao observado para a Figura 19–d, os altos níveis de ferro metálico da região inferior esquerda é o resultado de condições fortemente redutoras.

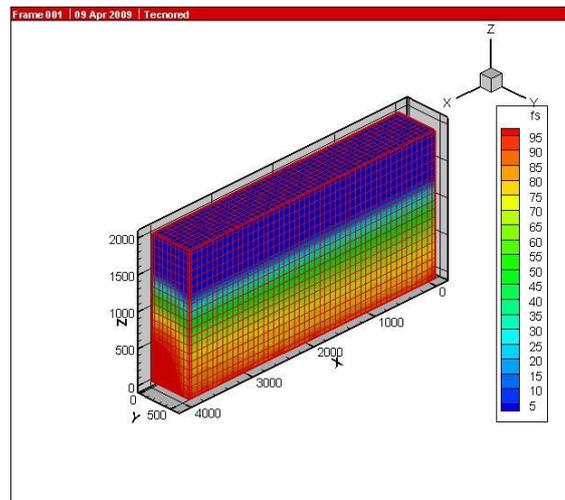
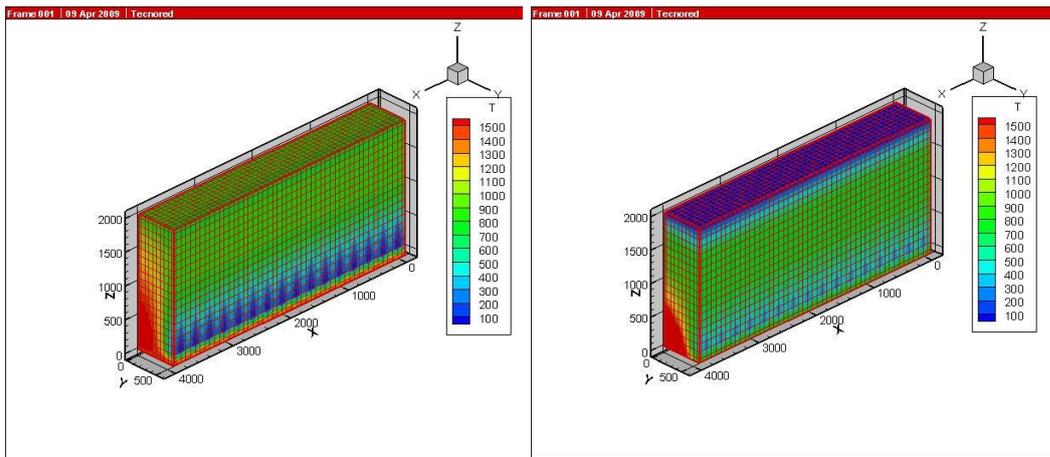


Figura 20 - Evolução do grau de redução para o caso base

5.5.2. Casos comparativos

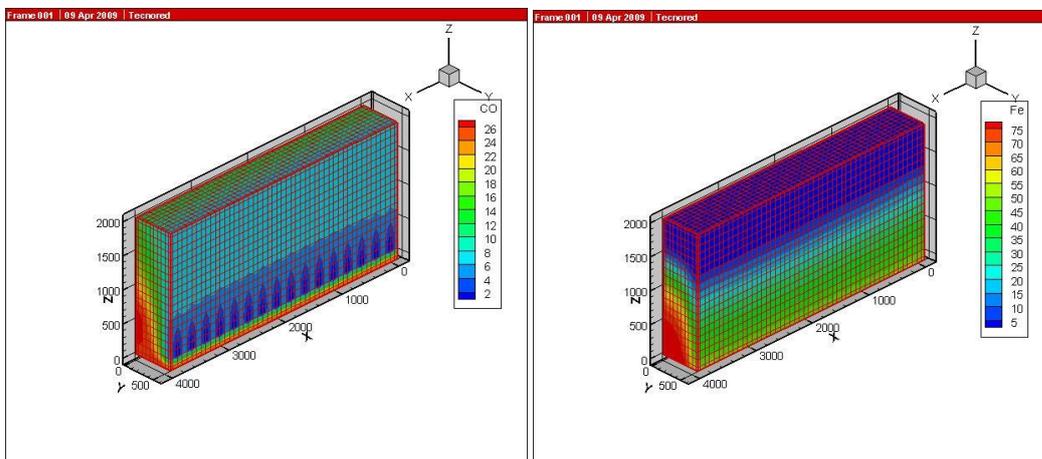
A continuação serão apresentados os gráficos mais representativos do caso 1 (Figura 21): a temperatura do gás exterior (21–a), a temperatura da fase sólida (21–b) , o CO do gás exterior (21–c), a percentagem de Fe metálico (21–d) e o grau de redução (21–e).

Na Figura 21 pode-se observar que o gráfico da distribuição da temperatura do “gás exterior” diminui seus valores na zona das ventaneiras e na parede lateral do forno em relação ao caso base, já o perfil da temperatura do sólido apresenta uma diminuição na base da cuba com respeito ao caso base. A distribuição do CO do “gás exterior” também diminui seus valores na parede lateral do forno e na região das ventaneiras. O perfil do Fe metálico e o grau de redução mostraram uma diminuição do seus valores ao longo da cuba com relação ao caso base.



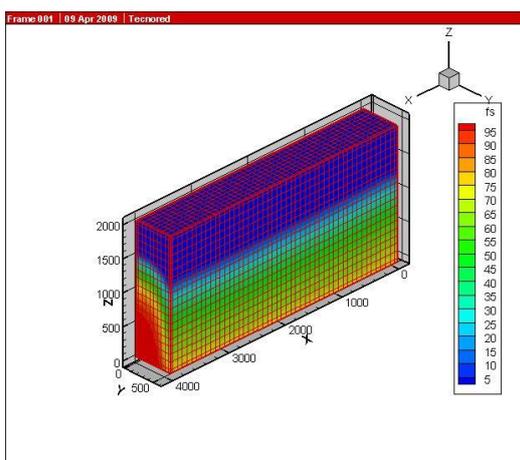
a) Temperatura do "gás exterior"

b) Temperatura do sólido



c) CO do "gás exterior"

d) Fe metálico



e) Grau de redução

Figura 21 - Gráficos mais representativos para o caso 1

Os gráficos mais representativos para o caso 2 são apresentados a seguir (Figura 22):

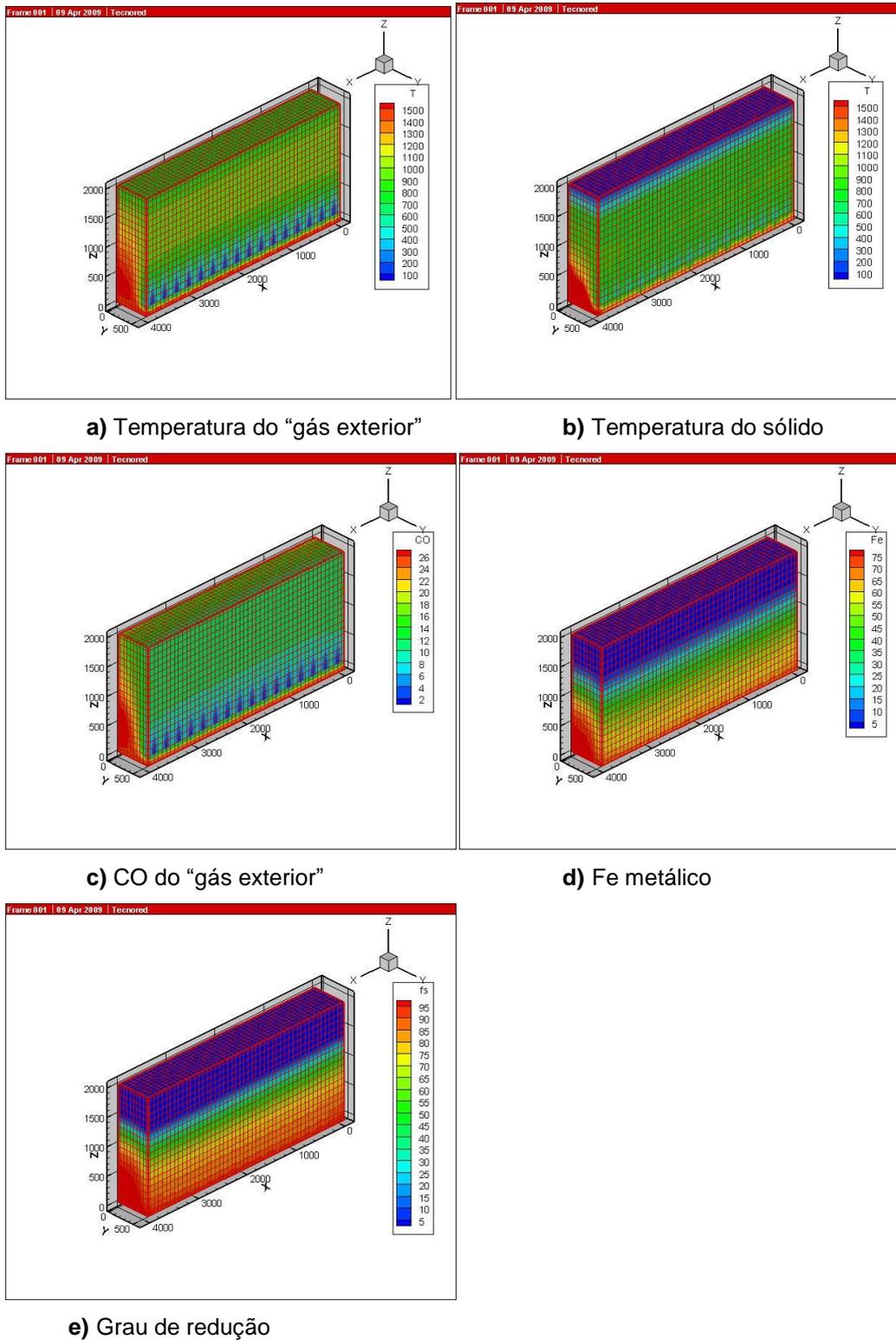
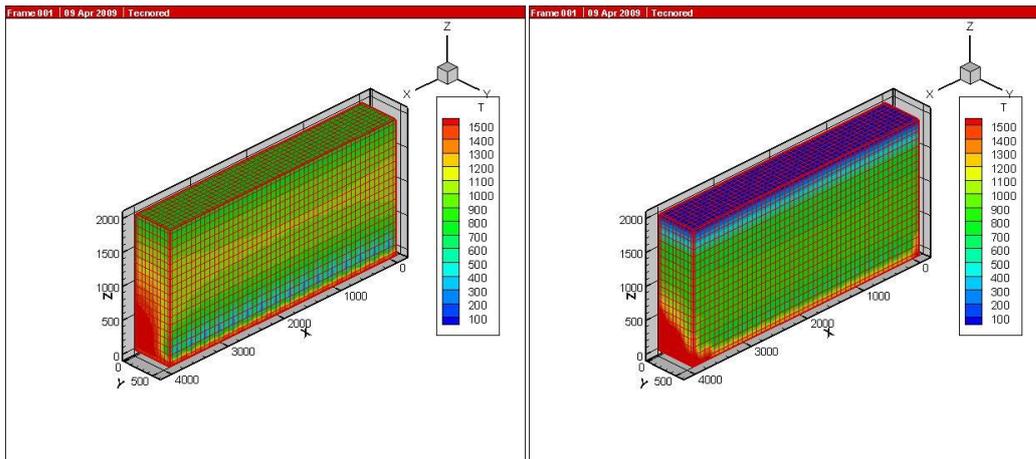


Figura 22 - Gráficos mais representativos para o caso 2

Pode-se observar que no caso do aumento do volume do gás baixo (Caso 2), a distribuição da temperatura do “gás exterior” e do sólido não mostram diferenças significativas em comparação ao caso base. O CO do “gás exterior” apresenta zonas mais ricas em relação ao caso base devido provavelmente à falta de ar para queimar todo o CO proveniente do gás de baixo. O Fe metálico e o grau de redução apresentam diferenças na zona inferior da cuba, onde para ambos os casos, aumentam as percentagens com respeito ao caso base.

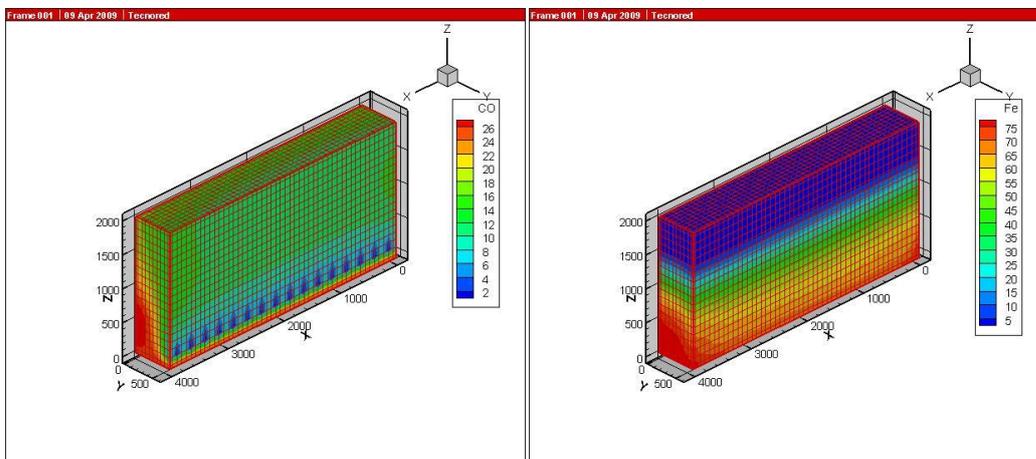
A Figura 23 mostra os gráficos mais representativos do caso 3.

O caso 3 avalia o efeito da temperatura da V2 e isto pode ser notado nos gráficos da temperatura do sólido e do “gás exterior” que incrementaram seus valores especialmente na zona das ventaneiras. O CO do “gás exterior”, o Fe metálico e o grau de redução também mostram um aumento das zonas com valores mais elevados em comparação ao caso base. (Figura 23).



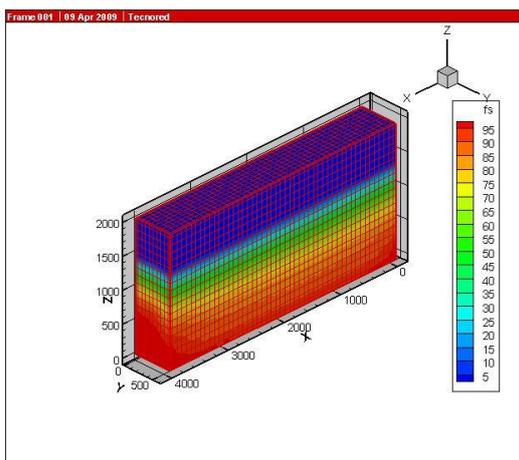
a) Temperatura do "gás exterior"

b) Temperatura do sólido



c) CO do "gás exterior"

d) Fe metálico



e) Grau de redução

Figura 23 - Gráficos mais representativos para o caso 3

A Figura 24 mostra os gráficos mais representativos do caso 4.

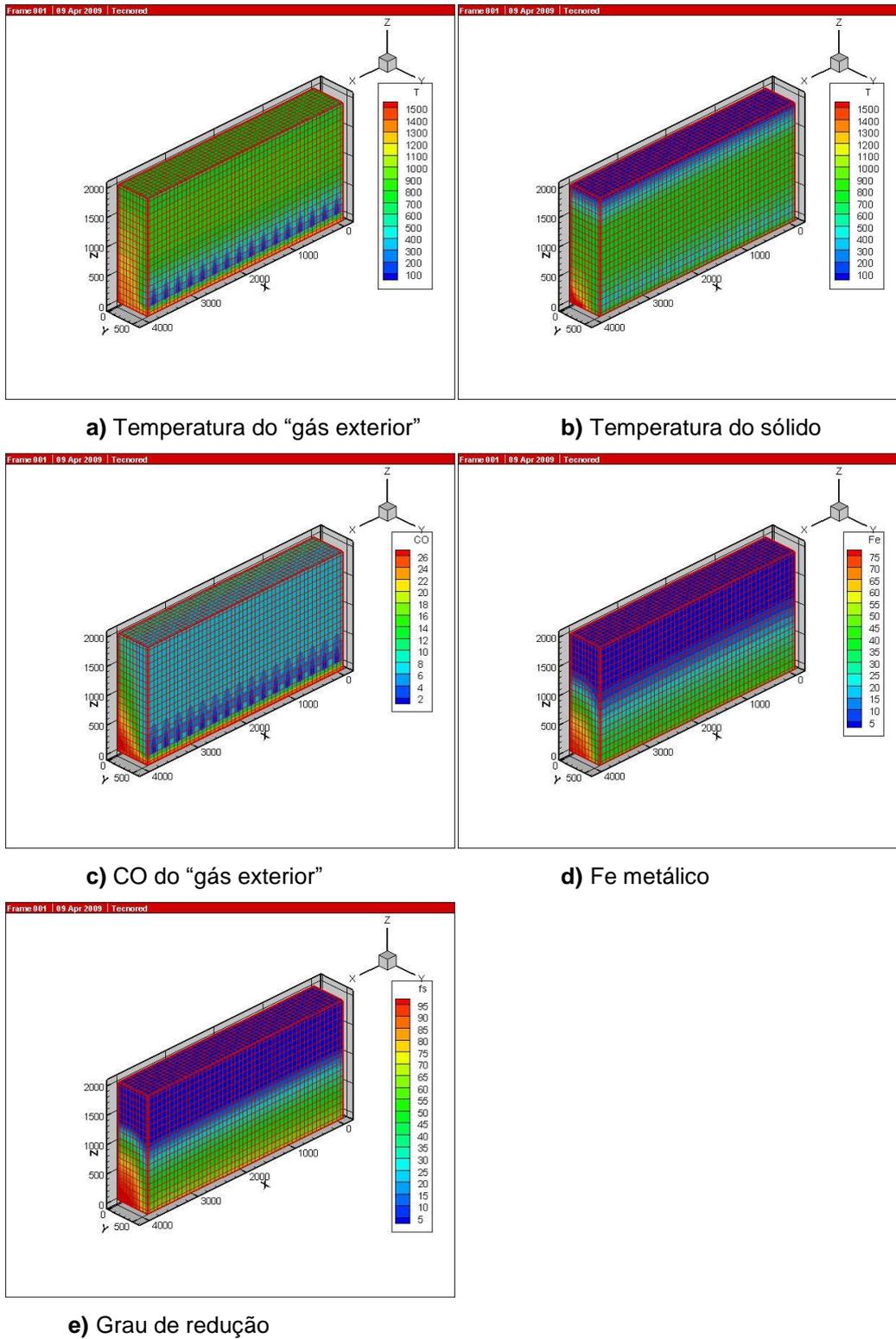
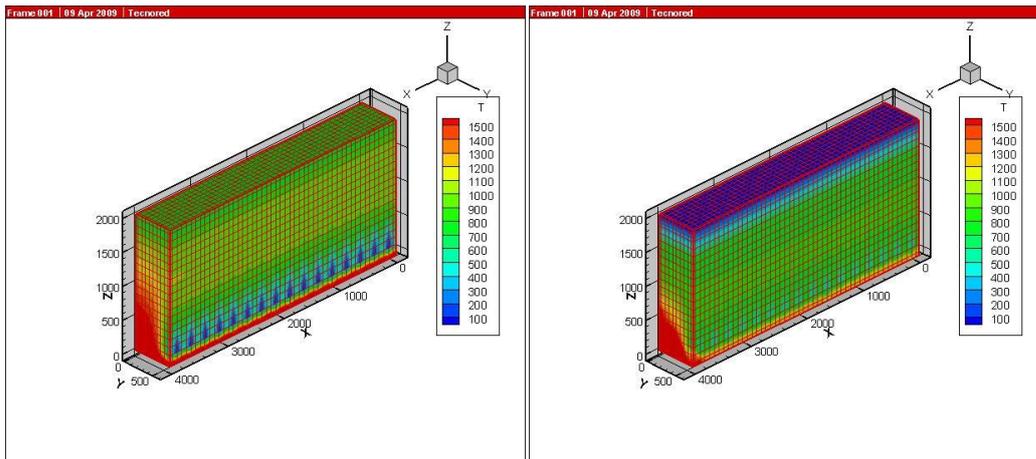


Figura 24 - Gráficos mais representativos para o caso 4

Na Figura 24 pode-se observar que os valores do perfil de temperatura do gás exterior e do sólido diminuíram em relação ao caso base principalmente na parte inferior esquerda. O CO do “gás exterior” mostra zonas menos ricas em comparação ao caso base. A distribuição do Fe metálico e o grau de redução mostram comportamentos parecidos, na parte inferior esquerda pode-se notar zonas com valores mais baixos em relação ao caso base e na parte superior, observa-se que o material sólido tem que alcançar zonas mais baixas para atingir valores iguais ao caso base atingidos em zonas mais altas.

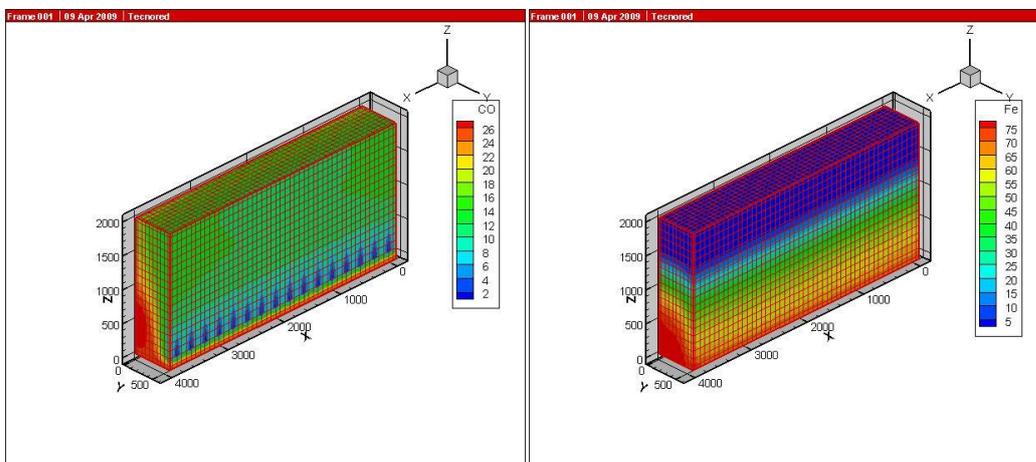
A Figura 25 mostra os gráficos mais representativos do caso 5.

Na Figura 25 observa-se que os perfis de temperaturas do “gás exterior” e do sólido são similares ao caso base. O CO do “gás exterior” apresenta valores ligeiramente mais elevados. Já o Fe metálico o grau de redução apresentam valores maiores em relação ao caso base principalmente na parte inferior.



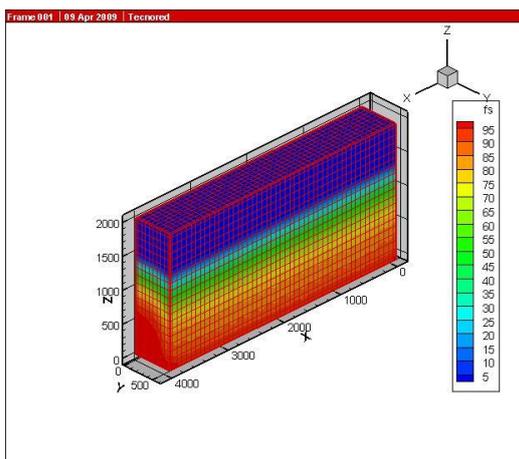
a) Temperatura do "gás exterior"

b) Temperatura do sólido



c) CO do "gás exterior"

d) Fe metálico



e) Grau de redução

Figura 25 - Gráficos mais representativos para o caso 5

A Figura 26 mostra os gráficos mais representativos do caso 6.

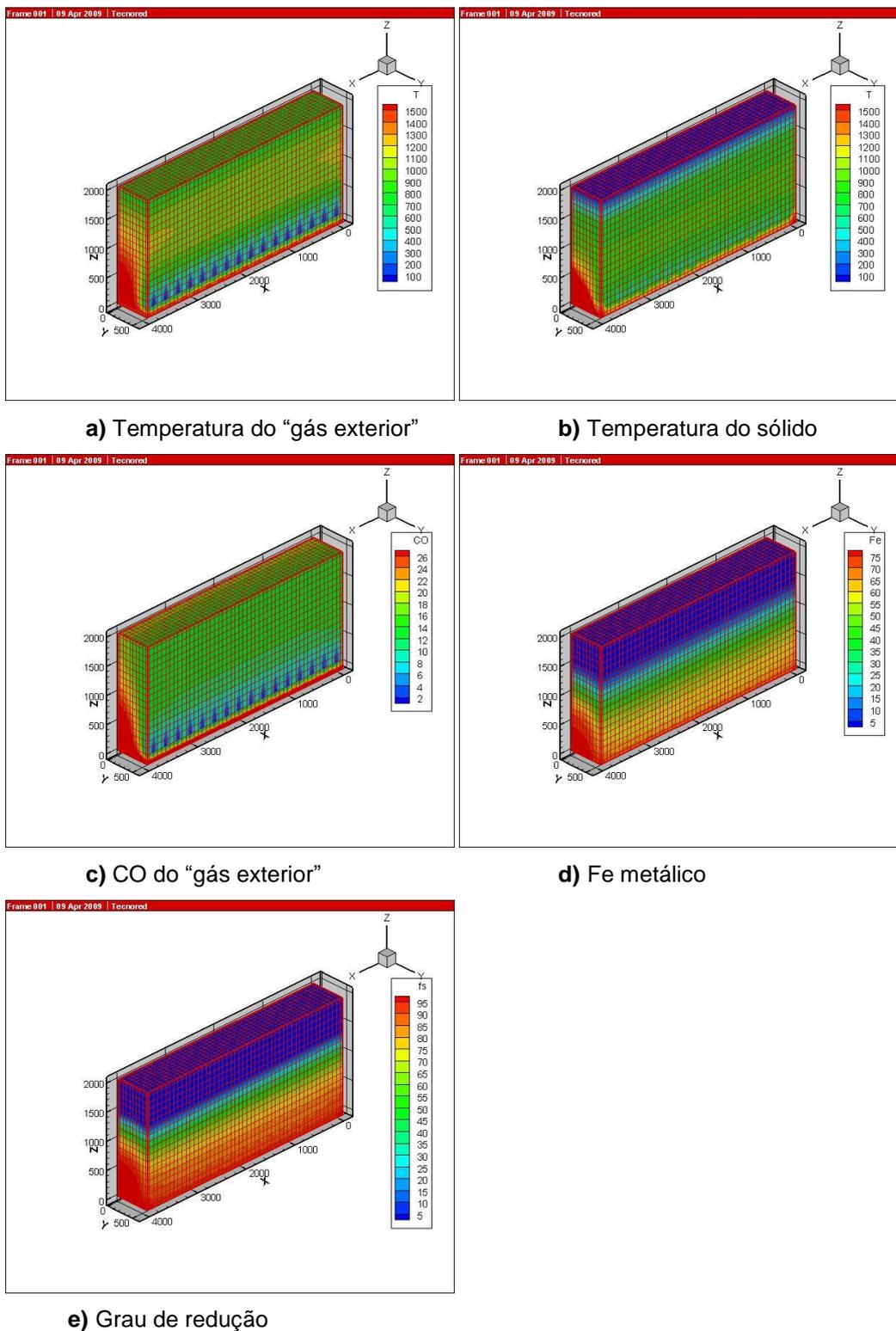


Figura 26 - Gráficos mais representativos para o caso 6.

Observa-se na Figura 26 que a temperatura do sólido e do "gás exterior" apresentam comportamentos similares em relação ao caso base. O CO do "gás

exterior” apresenta zonas com valores maiores na zona das ventaneiras em relação ao caso base e, o Fe metálico e o grau de redução mostram zonas mais ricas na parte inferior da cuba.

A Figura 27 mostra os gráficos mais representativos do caso 7.

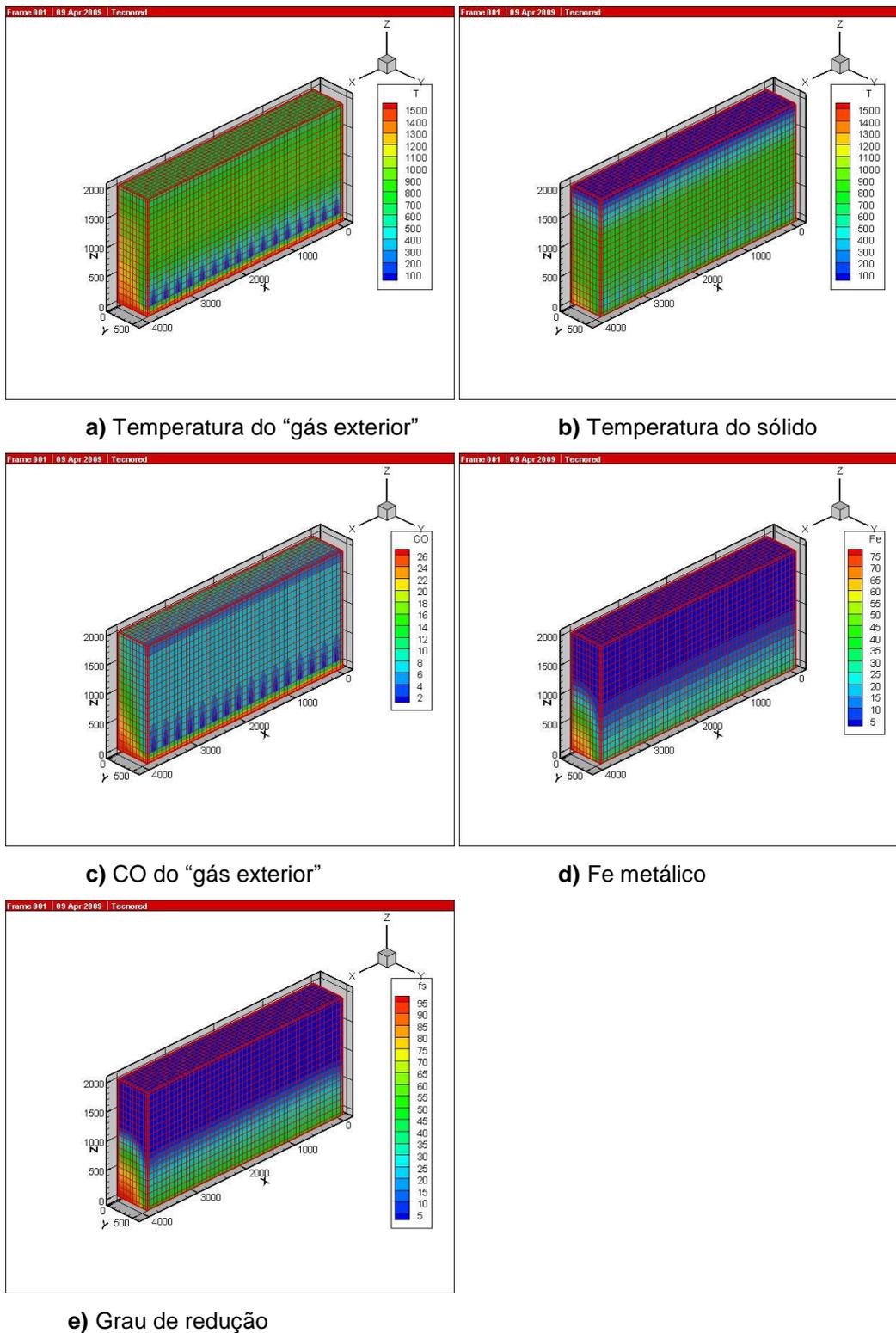
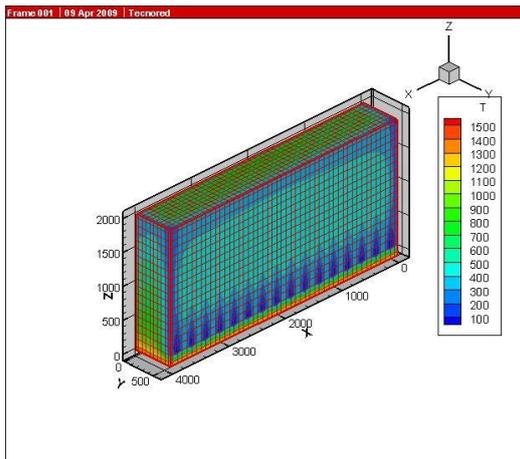


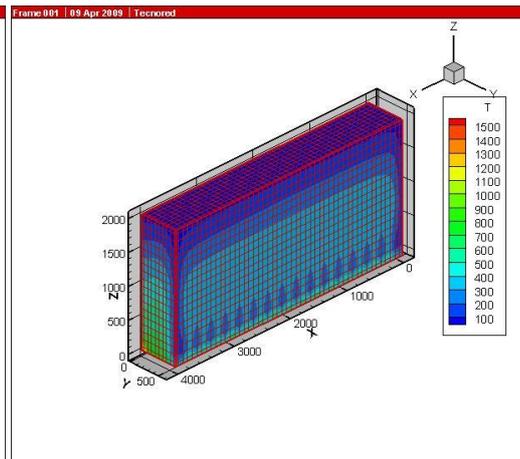
Figura 27 - Gráficos mais representativos para o caso 7

A Figura 27 mostra claramente uma diminuição das zonas com temperaturas mais elevadas (zonas vermelhas) comparadas ao caso base tanto para a fase “gás exterior” como para a fase sólida. O CO do “gás exterior” também mostra zonas com valores menores (zonas em celeste). O Fe metálico e o grau de redução diminuem notoriamente ao longo da cuba (maior zona em azul e menor zona em vermelho).

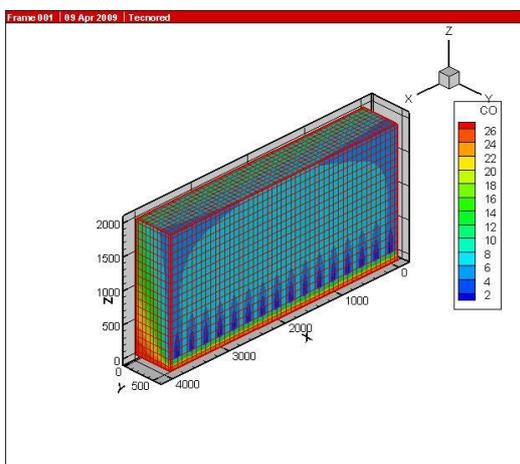
A Figura 28 mostra os gráficos mais representativos do caso 8. Observa-se claramente que a perda térmica através das paredes do forno afeta negativamente o processo de auto-redução, já que todos os gráficos mostram maiores zonas em cor azul e menores zonas em cor vermelha comparadas ao caso base.



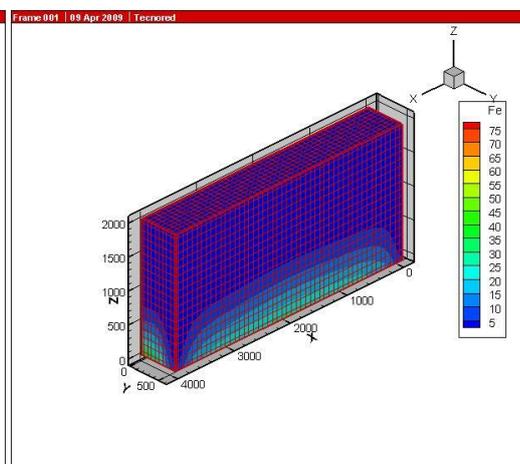
a) Temperatura do "gás exterior"



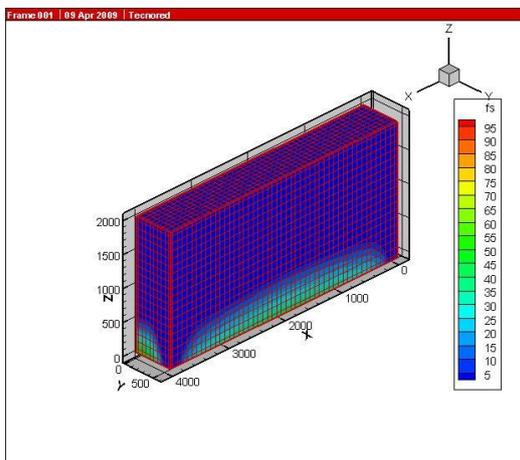
b) Temperatura do sólido



c) CO do "gás exterior"



d) Fe metálico



e) Grau de redução

Figura 28 - Gráficos mais representativos para o caso 8

5.6. Análise dos resultados

Parâmetros globais de funcionamento do forno calculados pelo modelo são apresentados nas Tabelas e Figuras que se seguem.

5.6.1. Composição dos produtos sólidos

As Tabelas 29 e 30 mostram a composição dos produtos sólidos.

A Tabela 29 apresenta a composição do DRI e, considerando que o carbono alimentado no briquete foi de 15,75%, ela apresenta também a composição do carbono não reagido e os outros constituintes do DRI para todos os casos.

Tabela 29: Composição química do DRI [%]

	C não reagido	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	FeO	Fe _{met}	FeS	ganga	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	CaCO ₃
CASO BASE	7.07	0.00	0.15	3.31	74.52	0.62	1.30	5.21	1.90	0.07	5.85	-
CASO 1	6.91	0.02	0.46	6.30	71.35	0.74	1.29	5.18	1.89	0.07	5.81	-
CASO 2	5.70	0.00	0.10	2.44	76.41	0.78	1.32	5.30	1.93	0.07	5.95	-
CASO 3	5.74	0.00	0.07	1.87	76.97	0.77	1.32	5.31	1.94	0.07	5.96	-
CASO 4	10.51	0.00	0.63	9.73	65.07	0.50	1.22	4.93	1.80	0.06	5.53	-
CASO 5	5.01	0.00	0.08	1.93	77.28	1.01	1.33	5.34	1.95	0.07	5.99	-
CASO 6	7.00	0.00	0.08	2.00	75.70	0.84	1.30	5.23	1.91	0.07	5.87	-
CASO 7	11.94	0.03	1.25	15.28	57.94	0.47	1.18	4.77	1.74	0.06	5.35	-
CASO 8	11.11	0.40	5.14	13.48	56.27	0.48	1.18	4.77	1.74	0.06	5.33	0.04

A composição do char é apresentada na Tabela 30. Observa-se que a comparação do “booster” alimentado, o char produzido, para todos os casos, não apresentam matéria volátil.

Tabela 30: Composição química do char [%]

	C	S	ganga	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO
CASO BASE	83.86	0.82	2.05	8.96	4.01	0.17	0.14
CASO 1	83.85	0.81	2.05	8.97	4.01	0.17	0.14
CASO 2	83.85	0.82	2.05	8.96	4.01	0.17	0.14
CASO 3	83.89	0.81	2.05	8.94	4.00	0.16	0.14
CASO 4	84.36	0.79	1.99	8.68	3.88	0.16	0.14
CASO 5	83.70	0.82	2.07	9.04	4.05	0.17	0.14
CASO 6	84.15	0.80	2.01	8.80	3.94	0.16	0.14
CASO 7	84.46	0.79	1.97	8.63	3.86	0.16	0.14
CASO 8	84.24	0.80	2.00	8.74	3.91	0.16	0.14

5.6.2. Dados operacionais do gás de topo

A Tabela 31 mostra os dados operacionais do gás de topo. Como o modelo considera duas fases gasosas a Tabela 31 indica estas diferenças. No caso da temperatura do gás topo foi necessário calculá-lo pela média ponderada das temperaturas de seus constituintes. A mesma lógica foi realizada para a razão CO/CO₂ do gás de topo. O valor do volume total do gás de topo foi realizado fazendo o somatório do volume do “gás interior” adicionado ao “gás exterior”.

A Tabela 31 mostra as temperaturas isoladas das duas fases gasosas e pode ser notar que as temperaturas do “gás exterior” são muito mais altas do que as temperaturas do “gás interior”. Esta diferença é devida principalmente à reação de combustão do CO, a qual é fortemente exotérmica. Este aporte calorífico é transportado ao interior do briquete para que possam proceder as reações de redução e de Boudouard, a qual é intensamente endotérmica, a qual faz diminuir a temperatura do “gás interior”.

A Tabela 32 mostra a composição do gás de topo considerando as fases gasosas “gás interior” e “gás exterior” e a composição ponderada para cada espécie gasosa.

A Tabela 33 mostra a composição média do gás de topo calculada através dos dados ponderados da composição do “gás interior” e do “gás exterior” mostrados na Tabela 32.

Tabela 31: Dados operacionais do gás de topo

		T _{gás topo} °C	T _{gás topo pond.} °C	T _{media gas topo} °C	V [Nm ³ /tDRI]	V _{total} [Nm ³ /tDRI]	CO/CO ₂ topo	CO/CO ₂ media topo
CASO BASE	gás exterior	762	625	665	2065	2518	0.72	1.05
	gás interior	222	40		453		1.83	
CASO 1	gás exterior	817	689	723	2296	2724	0.63	0.93
	gás interior	217	34		428		1.69	
CASO 2	gás exterior	776	650	682	2318	2768	0.98	1.23
	gás interior	197	32		450		1.83	
CASO 3	gás exterior	746	614	645	2098	2548	0.92	1.18
	gás interior	179	32		450		1.74	
CASO 4	gás exterior	720	598	627	1902	2290	0.47	0.76
	gás interior	170	29		388		1.42	
CASO 5	gás exterior	747	615	646	2122	2576	1.03	1.28
	gás interior	179	32		455		1.79	
CASO 6	gás exterior	733	603	633	2044	2487	1.22	1.41
	gás interior	172	31		442		1.76	
CASO 7	gás exterior	676	547	571	1514	1871	0.43	0.72
	gás interior	125	24		357		1.30	
CASO 8	gás exterior	594	494	521	1854	2229	0.45	0.82
	gás interior	156	26		375		1.88	

Tabela 32: Composição do gás de topo (“gás exterior” e “gás interior”)

		CO [% vol]	CO [% vol] pond	CO ₂ [% vol]	CO ₂ [% vol] pond	O ₂ [% vol]	O ₂ [% vol] pond	N ₂ [% vol]	N ₂ [% vol] pond	H ₂ [% vol]	H ₂ [% vol] pond	H ₂ O [% vol]	H ₂ O [% vol] pond	SO ₂ [% vol]	SO ₂ [% vol] pond
CASO BASE	gás exterior	10.99	9.01	15.30	12.55	0.27	0.22	71.37	58.54	0.00	0.00	1.40	1.15	0.68	0.56
	gás interior	54.17	9.74	29.62	5.32	0.00	0.00	1.08	0.19	7.44	1.34	7.57	1.36	0.13	0.02
CASO 1	gás exterior	9.29	7.84	14.77	12.45	1.51	1.28	71.73	60.47	0.57	0.48	1.05	0.88	1.08	0.91
	gás interior	52.92	8.31	31.33	4.92	0.00	0.00	0.91	0.14	7.54	1.18	7.16	1.12	0.13	0.02
CASO 2	gás exterior	13.56	11.36	13.86	11.61	0.18	0.15	69.94	58.56	0.38	0.32	0.85	0.71	1.23	1.03
	gás interior	54.74	8.90	29.95	4.87	0.00	0.00	0.89	0.14	7.40	1.20	6.89	1.12	0.13	0.02
CASO 3	gás exterior	13.08	10.77	14.21	11.70	0.08	0.07	70.25	57.85	0.26	0.21	0.86	0.71	1.27	1.04
	gás interior	53.81	9.50	30.87	5.45	0.00	0.00	0.89	0.16	7.43	1.31	6.87	1.21	0.13	0.02
CASO 4	gás exterior	7.79	6.47	16.48	13.69	0.89	0.74	72.16	59.95	0.36	0.30	1.12	0.93	1.19	0.99
	gás interior	48.98	8.29	34.48	5.84	0.00	0.00	0.96	0.16	7.85	1.33	7.59	1.28	0.14	0.02
CASO 5	gás exterior	14.12	11.63	13.68	11.26	0.05	0.04	69.94	57.59	0.20	0.16	0.77	0.63	1.25	1.03
	gás interior	54.32	9.59	30.41	5.37	0.00	0.00	0.89	0.16	7.39	1.30	6.86	1.21	0.13	0.02
CASO 6	gás exterior	14.73	12.11	12.05	9.91	0.03	0.02	70.99	58.37	0.20	0.17	0.74	0.61	1.26	1.04
	gás interior	53.98	9.60	30.62	5.44	0.00	0.00	0.89	0.16	7.41	1.32	6.96	1.24	0.13	0.02
CASO 7	gás exterior	7.27	5.88	16.89	13.66	0.90	0.73	72.53	58.68	0.10	0.08	1.24	1.01	1.07	0.87
	gás interior	46.81	8.94	35.88	6.85	0.00	0.00	1.01	0.19	8.25	1.57	7.91	1.51	0.15	0.03
CASO 8	gás exterior	7.59	6.32	16.73	13.92	0.92	0.77	72.58	60.37	0.00	0.00	1.48	1.23	0.69	0.57
	gás interior	53.61	9.02	28.49	4.79	0.00	0.00	1.20	0.20	8.56	1.44	8.00	1.35	0.14	0.02

Tabela 33: Composição média do gás de topo

	CO [% vol]	CO ₂ [% vol]	O ₂ [% vol]	N ₂ [% vol]	H ₂ [% vol]	H ₂ O [% vol]	SO ₂ [% vol]
CASO BASE	18.75	17.87	0.22	58.73	1.34	2.51	0.58
CASO 1	16.14	17.37	1.28	60.61	1.66	2.01	0.93
CASO 2	20.26	16.48	0.15	58.70	1.52	1.83	1.05
CASO 3	20.27	17.15	0.07	58.01	1.52	1.92	1.07
CASO 4	14.76	19.53	0.74	60.11	1.63	2.22	1.02
CASO 5	21.21	16.63	0.04	57.75	1.47	1.84	1.05
CASO 6	21.71	15.35	0.02	58.53	1.48	1.85	1.06
CASO 7	14.82	20.51	0.73	58.87	1.65	2.52	0.90
CASO 8	15.34	18.71	0.77	60.57	1.44	2.58	0.60

A Figura 29 apresenta o volume total do gás de topo, volume do “gás exterior” e volume do “gás interior”. Observa-se que os volumes do “gás interior” mostram valores similares para todos os casos. Já os volumes do “gás exterior” revelam algumas diferenças. Considerando o volume do gás de topo, o caso 7 mostra o valor mais baixo ($1871 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{DRI}}$) em relação ao caso base de ($2518 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{DRI}}$), isto devido a que neste caso foi alimentada uma maior quantidade de briquete e booster e conseqüentemente o consumo de gás foi maior. E, os casos 1 e 2 mostram os valores mais altos em relação ao caso base, $2724 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{DRI}}$ e $2768 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{DRI}}$ respectivamente; isto devido a que os valores do volume da vazão da V2 e do volume do gás baixo foram maiores do que o caso base.

A Figura 30 mostra as temperaturas medias do gás de topo para todos os casos. Os casos 7 e 8 denotam os valores mais baixos em comparação ao caso base e o casos 1 revela o valor mais alto. O caso 7 mostra um valor inferior devido à maior quantidade de briquete alimentado e conseqüentemente maior quantidade de energia consumida. E o caso 8 apresenta valores de perda de calor através das paredes muito maiores do que o caso base (a emissividade

variou de 0,001 até 0,3; e o coeficiente de troca de calor por convecção foi alterado de 8 até 500 W/m²K).

O caso 1 mostra a maior temperatura (723°C) devido principalmente a maior queima do CO. Este dado também pode ser notado porque a razão CO/CO₂ em relação ao caso base diminui de 1,05 a 0,93, como observado na Tabela 31.

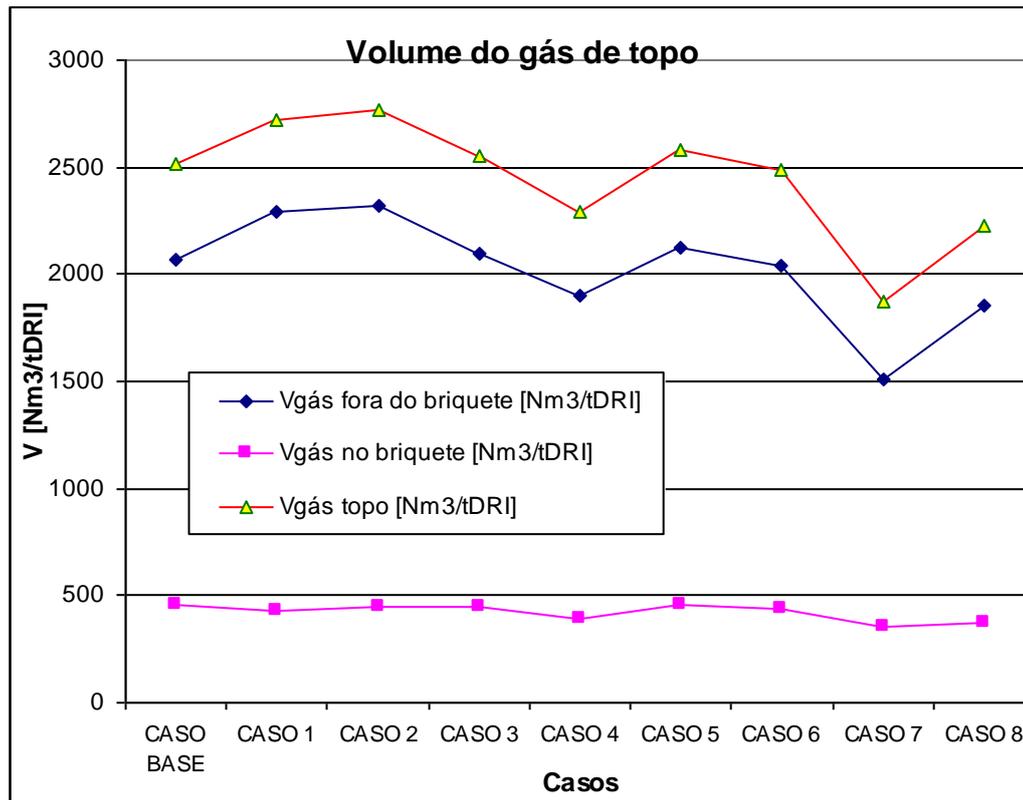


Figura 29 - Volume do gás de topo

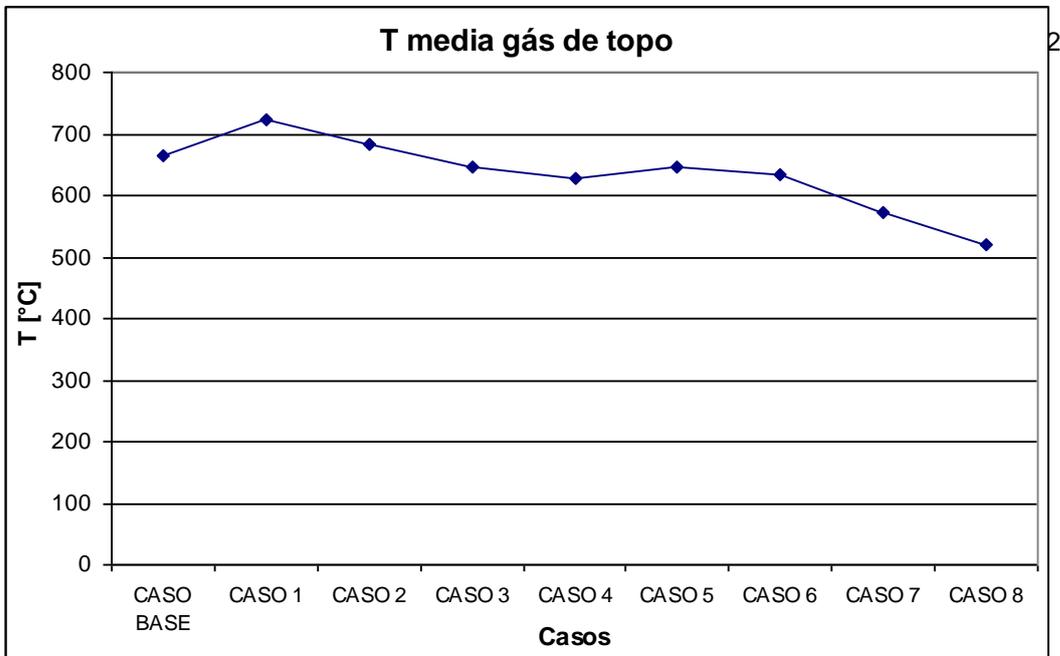


Figura 30 - Temperatura media do gás de topo

A relação CO/CO_2 do gás de topo é apresentada na Figura 31. A maioria dos casos comparativos apresentam valores diferentes ao caso base. Os valores mais altos em relação ao caso base são os casos 5 e 6, e os valores mais baixos são os casos 4, 7 e 8.

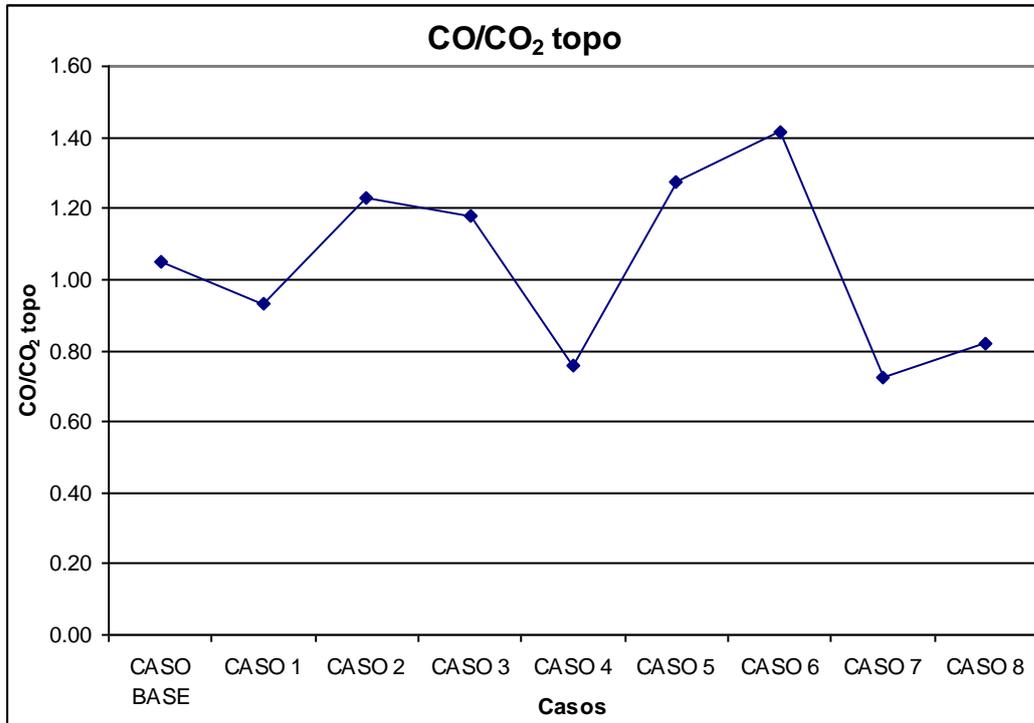


Figura 31 - Relação CO/CO_2 do gás de topo

5.6.3. Parâmetros operacionais gerados

A Tabela 34 mostra os principais dados operacionais gerados pelo modelo: produção de DRI, tempo de residência, temperaturas de saída do sólido (DRI + char), grau de redução, produção de char, temperatura máxima atingida pelo sólido (DRI + char) e pelo “gás exterior” e ainda a temperatura máxima atingida pelo “gás interior”. Além disso a Tabela 34 indica também dados calculados a partir do modelo: a temperatura de saída do gás de topo e a metalização.

Tabela 34: Parâmetros operacionais

	Produção DRI	Tempo de Residência	T saída sólido (DRI+char)	T saída gás de topo	Grau de redução	Metalização	Produção de char	T máx sólido (DRI+char)	T máx gas fora do briquete	T máx gas no briquete
	t/h	min	°C	°C	%	%	kg/tDRI	°C	°C	°C
CASO BASE	6.0	17.1	1359	665	96.39	96.0	24.79	1950	1620	1956
CASO 1	6.1	17.2	1274	723	92.55	92.6	24.59	1882	1646	1886
CASO 2	6.0	17.3	1390	682	97.39	96.9	25.18	1881	1565	1886
CASO 3	6.0	17.2	1413	645	98.04	97.5	25.28	1881	1656	1886
CASO 4	6.4	16.4	1079	627	88.39	88.6	24.19	1675	1312	1679
CASO 5	5.9	17.3	1545	646	97.96	97.2	25.16	1950	1702	1956
CASO 6	6.0	17.2	1468	633	97.85	97.2	25.33	2005	1693	2010
CASO 7	8.0	13.1	999	571	80.87	81.5	23.53	1262	1450	1269
CASO 8	6.6	15.9	1036	521	75.82	79.2	23.23	1675	1464	1679

Como indicado anteriormente, o caso base representa uma situação operacional para referencia. Em base a estes resultados a produção de DRI para a maioria dos casos comparativos oscila em torno de 6 t/h, a exceção dos casos 4 e 7 e 8 onde a produção se eleva a 6,4; 8 e 6,6 t/h respectivamente.

O tempo de residência para a maioria dos casos comparativos esta em torno de 17,2 e 17,3 minutos o qual mostra um valor similar ao caso base (17,1 min) a exceção dos casos 4, 7 e 8.

A produção de char mostra valores parecidos com relação ao caso base para a maioria dos casos. A exceção dos casos 7 e 8 onde a produção diminui.

O grau de metalização atingido pelo caso base foi de 96%. As Figuras 32 e 33 mostram o grau de redução e metalização para o case base e para os casos comparativos. Observa-se que ambas as figuras apresentam comportamentos similares. Os casos 7 e 8 apresentam os valores mais baixos em relação ao caso base. O caso 7 uma vez mais apresenta um valor baixo devido à maior quantidade de briquete alimentado; já o caso 8 apresenta maior perda de calor pelas paredes, e como a temperatura é uma variável importante da redução e na

metalização dos óxidos, este caso apresenta o menor valor. O caso 4 mostra um comportamento ligeiramente inferior com respeito ao caso base devido a que temperatura do gás de baixo neste caso (1300°C) é inferior do que o caso base (1450°C).

Os valores maiores foram obtidos pelos casos 2, 3, 5 e 6. A auto-redução dos óxidos de ferro se dá principalmente no interior do briquete, e esta é influenciada pela temperatura, como o demonstram os casos 3 e 5 onde tanto o aumento da temperatura do sopro quanto do gás de baixo incrementaram o grau de redução. O aumento da vazão do gás de baixo (caso 2) é mais significativo do que o aumento da vazão do sopro; e, o aumento da razão CO/CO₂ (caso 6) também influencia positivamente o grau de redução e metalização. Isto devido provavelmente a que em ambos os casos o CO do “gás exterior” contribui na redução dos óxidos de ferro.

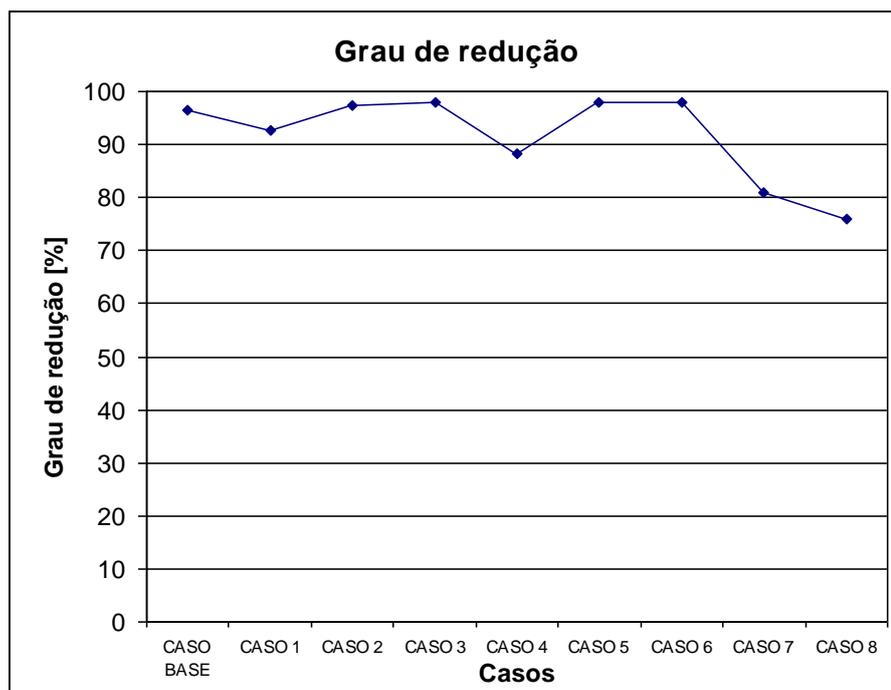


Figura 32 - Grau de redução

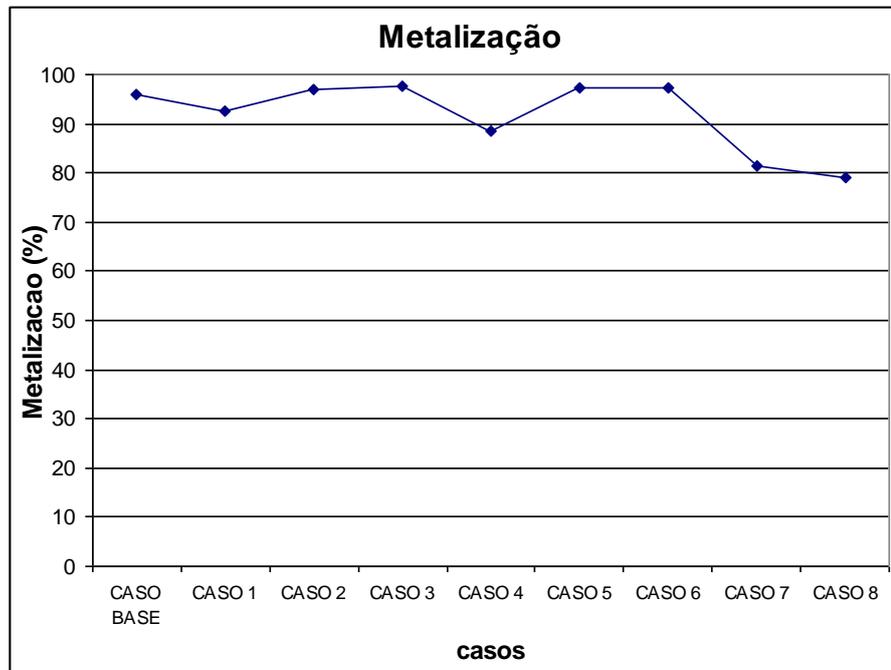


Figura 33 - Metalização