



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Estudo da Influência do Ciclo de Cozimento Sobre a Distribuição de Temperatura em Anodos de Carbono

Paulo Augusto Pessam Miotto

Orientadores: Prof. Dr. José Jaílson Nicácio Alves
Prof. Dr. Romildo Pereira Brito

Campina Grande – Paraíba
Junho/2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Estudo da Influência do Ciclo de Cozimento Sobre a Distribuição de Temperatura em Anodos de Carbono

Paulo Augusto Pessam Miotto

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE
CAMPINA GRANDE COMO PARTE
DOS REQUISITOS EXIGIDOS PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA QUÍMICA

Orientadores: Prof. Dr. José Jaílson Nicácio Alves
Prof. Dr. Romildo Pereira Brito

Campina Grande – Paraíba
Junho/2007

Estudo da Influência do Ciclo de Cozimento Sobre a Distribuição de Temperatura em Anodos de Carbono

Paulo Augusto Pessam Miotto

Dissertação aprovada em: _____/_____/_____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves

Orientador

Prof. Dr. Romildo Pereira Brito

Orientador

Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira

Examinador

Prof. Dr. Luís Gonzaga Sales Vasconcelos

Examinador

AGRADECIMENTOS

À liderança da Alumar, que viabilizou a realização deste curso e permitiu o aumento da minha capacidade profissional, mesmo impactando minha carga de trabalho, em especial Ciro Kato, Joel Câmara, Helio Truci e Nilson Ferraz.

Á minha noiva Renata Medeiros, que sempre me apoiou e incentivou meu desenvolvimento profissional.

Á todos os colegas da turma de mestrado e da Alumar que foram decisivos nesta jornada. Em especial aos amigos Luciano Pontes, Eliezer Batista, Camões Pereira, Felipe Navarro, Marcos Aurélio, Vinicius Piffer e Valério Gomes.

Aos professores do curso em especial aos meus orientadores, professores Romildo Brito e Jailson Alves, e ao meu colega da Universidade Antonio Tavernard que sempre se dispôs a me ensinar com paciência e atenção.

RESUMO

O processo de cozimento de anodos é uma etapa de extrema importância na cadeia de produção de Alumínio primário. Esta etapa consiste no aquecimento sob determinadas condições dos anodos produzidos com coque e piche para em seguida serem enviados aos fornos de produção de Alumínio, que fornecerão o Carbono (C) necessário a reação eletrolítica $2 \text{Al}_2 \text{O}_3 + 3\text{C} = 4 \text{Al} + 3 \text{CO}_2$. A qualidade do anodo em termos de propriedades físico-químicas é determinada em grande parte pela adequada taxa de aquecimento do anodo e pela relação temperatura máxima e tempo de encharque dos anodos.

O aquecimento desses anodos na etapa de cozimento é realizado de forma indireta em poços envoltos por tijolos refratários e cobertos por coque de petróleo (para proteção contra oxidação), onde na seção adjacente existem câmaras de combustão, que são formadas por canais de passagem de gases aquecidos que fornecem o calor necessário para o aquecimento dos anodos nos poços. Este calor depende de variáveis como pressão, vazão de ar, quantidade de combustível injetado dentro das câmaras e geometria do poço/câmara.

O objetivo desse trabalho é realizar simulações numéricas utilizando-se o CFX como ferramenta de análise, alterando-se geometria, temperatura máxima de cozimento e tempo de encharque para alcançar o perfil de temperatura mais uniforme possível dentro da câmara de combustão, de tal forma que os anodos cozidos tenham as propriedades físico-químicas também uniformes e garantam boa performance desses anodos nos fornos de produção de Alumínio.

ABSTRACT

SUMARIO

	Página
Lista de Tabelas	8
Lista de Figuras	9
1. Introdução	11
2. Descrição do Processo de Obtenção do Alumínio	13
2.1. O Eletrólito	14
2.2. Resistência Elétrica das Cubas	21
2.3. Sistema de Alimentação de Alumina	22
2.4. Alumina	24
2.5. Eletrodos	24
3. Descrição do Problema	30
4. Objetivos do Trabalho	33
5. Estado da Arte	35
6. Modelagem e Simulação	38
7. Uso do CFX	40
7.1. O Pré-Processador	40
7.2. O Processador	41
7.3. O Pós-Processador	41
7.4. Arquivos Usados pelo CFX	42
8. Resultados	43
8.1. Simulação Considerando Escoamento de Ar	43
8.2. Simulação Considerando Escoamento de Ar e Queimadores	45
8.3. Simulação Considerando Escoamento de Ar e Queimadores com Anodo	46
8.4. Validação em Regime Estacionário	48
8.5. Simulações em Regime Transiente	49
9. Conclusões	54
10. Sugestões para Trabalhos Futuros	55
11. Bibliografia	56

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Comparação entre desempenho do processo nos últimos 50 anos	14
Tabela 2 – Efeito de aditivos e temperatura sobre as propriedades da alumina.	20
Tabela 3 – Contribuições do consumo do carbono do anodo.	29
Tabela 4 – Arquivos usados e criados pelo CFX.	42

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – cuba eletrolitica modelo A697 - Alcoa Inc	13
Figura 2 – Diagrama de fases do sistema NAF-AlF ₃	15
Figura 3 – Efeito dos aditivos na densidade do banho a 1000°C	18
Figura 4 – Efeito dos aditivos na tensão interfacial entre o metal e o eletrólito a 1000°C	19
Figura 5 – Esquema do forno de cozimento de anodos	26
Figura 6 – passagem de corrente em uma cuba eletrolítica	28
Figura 7 – Esquema de um forno de cozimento de anodo	31
Figura 8 – perfil não uniforme de temperatura dentro dos poços de anodos	32
Figura 9 – Exemplo de geometria de câmara	35
Figura 10 – Exemplo de perfil de velocidade	36
Figura 11 – Curva de cozimento e resfriamento	36
Figura 12 – Exemplo de perfil de velocidade no crossover	37
Figura 13 – Sistema de exaustão de gases	37
Figura 14 – Perfil de velocidade no fluido para a condição <u>sem</u> (a) e <u>com</u> (b) tijolos internos. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$	43
Figura 15 – Perfil de temperatura no fluido para a condição <u>sem</u> (a) e <u>com</u> (b) tijolos internos. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$	44
Figura 16 – Perfil de temperatura no refratário para a condição <u>sem</u> (a) e <u>com</u> (b) tijolos internos. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$	44
Figura 17 – Perfil de velocidade no fluido para a condição <u>sem</u> (a) e (b) <u>com</u> tijolo interno e com queimador. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$; $V_{gás} = 10 \text{ m/s}$; $T_{gás} = 1973 \text{ K}$	45
Figura 18 – Perfil de temperatura no refratário para a condição (a) <u>sem</u> e (b) <u>com</u> tijolo interno e com queimador. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$; $V_{gás} = 10 \text{ m/s}$; $T_{gás} = 1973 \text{ K}$	46
Figura 19 – Perfil de temperatura na interface anodo-refratário para a condição com tijolo interno, com queimador, com anodo (a) <u>sem</u> e <u>com</u> (b) perdas pelas bordas. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$; $V_{gás} = 10 \text{ m/s}$; $T_{gás} = 1973 \text{ K}$	47
Figura 20 – Geometria com malha numérica usada para obtenção dos	48

resultados apresentados nas Figuras 18 e 19	
Figura 21 – Perfil de temperatura (a) simulado e (b) real; imediatamente após o 7º estágio (ou 4º cozimento)	48
Figura 22 – Perfil de temperatura no anodo para o 1º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h	49
Figura 23 – Perfil de temperatura no anodo para o 2º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h	50
Figura 24 – Perfil de temperatura no anodo para o 3º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h	50
Figura 25 – Perfil de temperatura no anodo para o 4º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h	51
Figura 26 – Perfil de temperatura no anodo para o 5º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h	51
Figura 27 – Perfil de temperatura no anodo para o 6º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h	52
Figura 28 – Perfil de temperatura no anodo para o 7º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h	52
Figura 29 – Geometria com malha numérica usada para obtenção dos resultados apresentados nas Figuras 22 a 28	53
Figura 30 – Perfil de temperatura no anodo para o 7º estágio: estado estacionário	53

1. Introdução

O processo de produção de Alumínio é dividido em dois tipos principais – Sodeberg e Prebake. Em ambos os casos, o Alumínio é obtido a partir da redução eletrolítica do óxido de alumínio (Al_2O_3).

Esta reação ocorre em reatores eletrolíticos também conhecidos como cubas. A alumina é adicionada de maneira contínua numa taxa pré-definida e dissolvida em um banho eletrolítico, onde a molécula é quebrada pela presença de corrente elétrica e não retorna em função do carbono proveniente do anodo. O metal produzido fica então depositado no fundo da cuba (catodo) de onde é retirado por meio de sucção.

Os dois tipos de cubas eletrolíticas têm como fundamento a utilização de carbono para a reação eletrolítica, porém este carbono pode vir em forma de pasta anódica ou blocos de carbono pré-cozidos, daí a origem para o nome do segundo tipo – Prebake.

Nas plantas que usam tecnologia Prebake, os blocos de carbono passam por um processo intermediário entre sua fabricação. Em plantas Sodeberg, esta etapa é realizada dentro da própria cuba, onde a pasta anódica é colocada ainda em seu estado primário, e o processo de cozimento se dá ao longo da sua utilização na cuba. Porém como a cuba opera em uma temperatura significativamente abaixo da considerada ideal para o alcance do potencial máximo de qualidade da pasta anódica, em termos de propriedades físico-químicas, o processo Sodeberg fica limitado em termos de rendimento na produção de Alumínio.

A tendência mundial é a completa migração das plantas Sodeberg para plantas Prebake, onde os anodos são pré-cozidos em uma área conhecida como Fornos de Cozimento de Anodos. O objetivo principal do processo de cozimento de anodos é permitir atingir as melhores propriedades físico-químicas para o bloco de carbono, através de uma adequada relação tempo x temperatura, além de uma suave taxa de aquecimento.

Uma cuba eletrolítica opera adequadamente com anodos com baixa resistência elétrica, aproveitando melhor a corrente elétrica para a eletrólise, alta densidade e, conseqüentemente, baixa permeabilidade ao ar, levando a um baixo consumo bruto de carbono, e adequada condutividade térmica, o que garante pleno balanço térmico do reator.

Estas características são determinadas em parte pela qualidade da matéria-prima usada, no caso coque de petróleo e piche de alcatrão, pelas propriedades de formação do bloco, especificamente densidade verde e teor de piche na formulação, e pelas condições de tratamento térmico, ou processo de cozimento do anodo.

Para se alcançar uma satisfatória qualidade para o anodo cozido, os parâmetros do processo de cozimento devem ser previamente estudados e definidos em função de diversas condições de operação, projeto e matéria-prima utilizados. Os principais parâmetros do processo de cozimento são: ciclo de produção (parâmetro que determina o tempo total de cozimento), taxa de aquecimento, configuração e posicionamento dos equipamentos para elevação da temperatura e temperatura máxima de patamar.

O objetivo deste trabalho é estudar os impactos do ciclo de cozimento, incluindo tempo total de cozimento, tempo sob patamar máximo de temperatura, taxa de aquecimento do anodo e temperatura de patamar, sobre a distribuição de temperatura dos anodos dentro dos poços nos fornos de cozimento, pois como os poços são relativamente profundos e compridos, a temperatura pré-definida como target não é atingida em todas as regiões do poço, levando a uma não uniformidade no grau de cozimento de cada anodo, e criando distorções na distribuição da corrente elétrica pelos anodos dentro das cubas.

2. Descrição do Processo de Obtenção do Alumínio

Todo alumínio primário é produzido pelo processo Hall-Héroult [9]. Este processo consiste basicamente na redução eletrolítica da alumina, dissolvida em um banho de criolita fundida ($3\text{NaF}\cdot\text{AlF}_3$). O banho fica a uma temperatura de aproximadamente 960°C . A Figura 1 apresenta o esquema de uma cuba eletrolítica desenvolvida pela Alcoa.

Com a decomposição da alumina, o oxigênio se dirige ao anodo (pólo positivo), e combina com ele, e o alumínio se deposita no fundo da célula eletrolítica (catodo, que é o pólo negativo). A principal reação eletroquímica que acontece no processo é a seguinte:

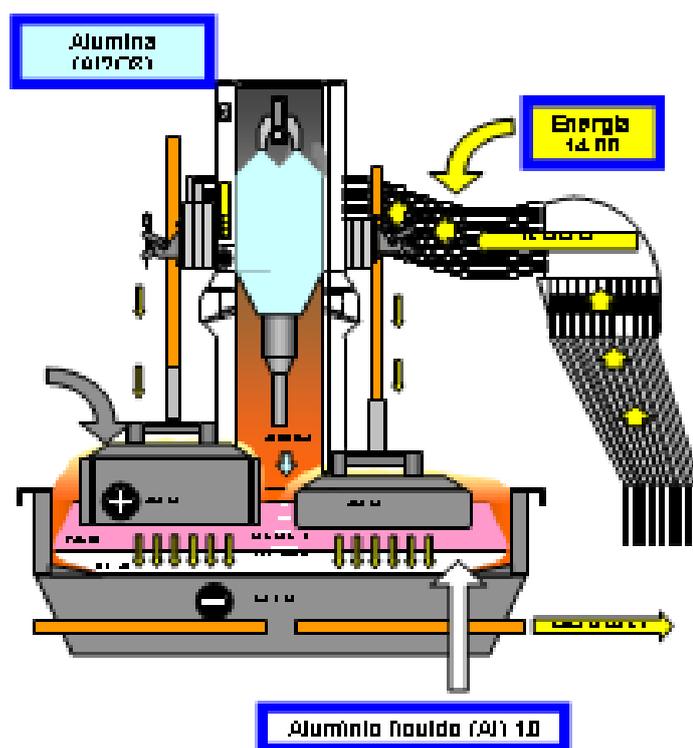
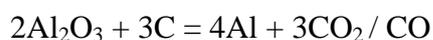
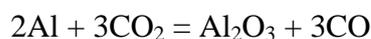


Figura 1 – cuba eletrolítica modelo A697 - Alcoa Inc.

Assumindo que $\text{PCO}_2 = 0,1013 \text{ kPa}$ (1 atm), a entalpia de reação sendo 550 kJ a 1000°C , a energia teórica para a produção de 1kg de Al , nesta temperatura é $5,64\text{kWh/kg Al}$. Se não fosse utilizado o carbono como agente redutor, a energia seria de $8,69\text{kWh/kg Al}$ [10]. Na prática este valor é de $14\text{-}15 \text{ kWh/kg Al}$. Um dos

principais motivos de perda de eficiência de corrente, conseqüentemente aumento do consumo de energia, é que algum metal sempre se dissolve no eletrólito e pode ser conduzido para próximo do anodo, sendo então, re-oxidado, de acordo com a reação a seguir [1, 9].



Os fundamentos do processo Hall-Héroult descritos acima, são os mesmos desde a sua descoberta. Porém muitos foram os desenvolvimentos nos últimos 50 anos. Dentre eles podemos citar melhorias na química do banho, alimentação de alumina, qualidade do anodo e catodo e controle de processo. Também muitos tem sido o progresso com relação ao tamanho e desenho da célula, capacidade de produção, consumo de energia e modelamento dos campos magnéticos [14]. A Tabela 1 mostra alguns desenvolvimentos ocorridos ao longo destes anos, comparando uma célula de 1945 e outra de 1995.

Tabela 1 – Comparação entre desempenho do processo nos últimos 50 anos [14].

Parâmetros Operacionais	1945	1995
Corrente da célula (kA)	25-50	175-300
Voltagem (V)	5,0	4,1
Eficiência de corrente (%)	80-85	92-95
Consumo de Energia (kWh/kg Al)	20-25	13
Produção da célula (t / ano)	55	820
Operação da célula	Manual	Alta automação
Produção/ano por trabalhador	7t de Al	200t de Al
Condições de trabalho	Más	Boas

2.1. O Eletrólito

Fundamentalmente o eletrólito é uma solução de alumina em criolita fundida. A criolita é um fluoreto duplo de alumínio e sódio ($3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$). A escolha da criolita como solvente se deve a vários fatores, entre os quais podemos citar [4]:

- a) É um bom solvente para a alumina;
- b) Sua voltagem de decomposição é maior que a da alumina;
- c) Possui boa condutividade elétrica quando fundida;
- d) Sua temperatura de fusão é baixa com relação à alumina;

- e) Não reage com o alumínio, nem com o carbono em grau que se possa considerar;
- f) Quando fundida forma um fluido sem turbulência;
- g) Sua densidade é menor que a do alumínio, quando ambos estão fundidos;
- h) Tem uma baixa pressão de vapor.

O diagrama de fases do sistema fluoreto de sódio - fluoreto de alumínio (NaF- AlF_3) é dado na Figura 2. Neste diagrama temos a presença da criolita na composição de 25% AlF_3 e 75% NaF (%mol) fundindo a 1010°C . Aumentando o teor de AlF_3 além desta composição, obtém-se uma fase líquida a partir de 734°C . Da mesma forma se for adicionado fluoreto de sódio a criolita, forma-se um eutético a 888°C com 89% NaF e 11% AlF_3 (%mol) [5].

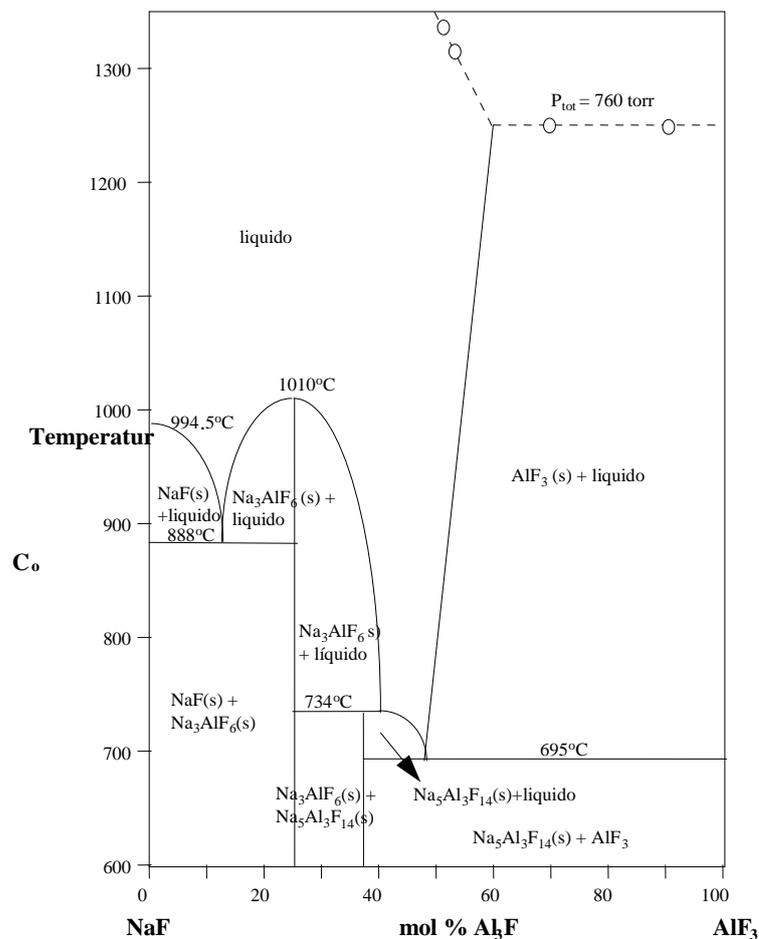
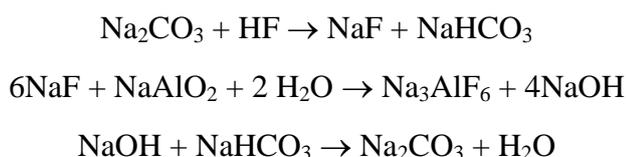


Figura 2 – Diagrama de fases do sistema NaF- AlF_3 .

A ocorrência da criolita na forma natural é rara. Entretanto ela pode ser fabricada em processo alcalino. Muitas vezes, a adição de fluoretos para acerto da composição do banho, gera excedente de banho na cuba. O excesso é retirado e usado em outra célula, também pode ser estocado ou vendido. No processo alcalino a criolita é formada pela absorção do fluoreto de hidrogênio em uma solução de carbonato de sódio. O fluoreto de sódio obtido é tratado com uma solução de aluminato de sódio de acordo com as reações abaixo [4]:



Além da criolita que é o solvente básico, existem mais dois tipos de fluoretos presente no eletrólito das fábricas de alumínio. Eles são fluoreto de alumínio e fluoreto de cálcio (CaF_2). Além desses, fluoreto de sódio (NaF) é usado (adicionado como Na_2CO_3), principalmente, nos primeiros dias de vida da cuba. Muitas fábricas tentam melhorar algumas propriedades do eletrólito introduzindo no banho, por exemplo, fluoreto de Lítio (LiF) e/ou fluoreto de magnésio (MgF_2), fluoreto de potássio (KF) e etc. [4]. A Alumar não utiliza estes aditivos. A composição típica do banho (% massa) nas fábricas de alumínio é a seguinte: criolita de 70% a 90%, fluoreto de Al (AlF_3) de 2% a 25%, fluorita (CaF_2) de 4% a 8% e alumina de 2% a 8%. A composição do banho da Alumar é a seguinte: 81% de criolita, 11% de AlF_3 , 5% de CaF_2 e 3% de Al_2O_3 [1]. O fluoreto de alumínio é bastante volátil, na temperatura de operação da célula, além disso, ele reage com algumas impurezas presente na alumina. Por causa disso, ele precisa freqüentemente ser adicionado ao banho para que sua composição seja mantida. Já o teor de CaF_2 , muitas vezes, é mantido pelo cálcio presente na alumina. O óxido de cálcio reage com o fluoreto de alumínio formando a fluorita. Para alumina de baixa qualidade, com níveis elevados de CaO , pode formar uma quantidade alta de CaF_2 e aumentar demais a densidade do banho. A fluorita tem uma baixa pressão de vapor e é eletroquimicamente, praticamente, inerte na célula. Assim, deve-se evitar que o CaF_2 ultrapasse percentuais desejados, porque a retirada do excesso ocorrerá em tempo longo. A fluorita tem a função de baixar o ponto de fusão do banho [1]. Para cada aumento de 1% em massa de CaF_2 , teremos [4]:

- Diminuição em 3°C no ponto de fusão do banho;
- Aumento na resistência do banho em 0,4%;
- Redução da solubilidade da alumina em 0,25% em massa;
- Aumento na densidade em 0,3%.

Nas fábricas de alumínio o parâmetro mais utilizado para controlar a composição do banho é o ratio. O ratio é a relação entre a percentagem, em peso, do fluoreto de sódio e do fluoreto de alumínio. O ratio da criolita é 1,50. Como, normalmente, o banho contém AlF_3 em excesso, o valor do ratio é menor que 1,5. As modernas reduções procuram trabalhar com ratio baixo, isto aumenta a eficiência de corrente, devido menor dissolução do metal no banho e redução da temperatura de operação [4]. Entretanto, o excesso de AlF_3 pode provocar um aumento demasiado da resistividade do banho, causando instabilidade da cuba. Na Alumar objetiva-se trabalhar com o ratio de 1,11, com faixas de controle de 1.06 a 1.16 [1]. Abaixo temos o cálculo do ratio para criolita:

$$\text{Ratio} = \% \text{NaF} / \% \text{AlF}_3 = 3(\text{NaF}) / (\text{AlF}_3) = 3(23+19) / ((27 + (3 \times 19))) = 1,5$$

Diminuindo o ratio (em peso) em 0,02 teremos [4]:

- Aumento no excesso de AlF_3 entre 0,6-0,8% em massa;
- Diminuição em 2°C no ponto de fusão;
- Aumento na resistência do banho em 0,4%;
- Redução na solubilidade da alumina em 0,25% em massa;
- Diminuição na densidade em 0,14%.

As propriedades mais importantes do banho são [1, 5, 6]:

a) Ponto de fusão; Esta propriedade deve ser a menor possível, pois menor energia será gasta para fundir o banho, logo maior será a eficiência de corrente. Todo aditivo diminui a temperatura de liquidus. A temperatura de fusão pode ser expressa em função da percentagem em massa de CaF_2 , AlF_3 e Al_2O_3 . A equação obtida experimentalmente [6] é válida na faixa de 5-20% AlF_3 e 3,8 - 11,3% CaF_2 . A equação é a seguinte:

$$t (^\circ\text{C}) = 1009,4 + 4,059\% \text{CaF}_2 - 1,167(\% \text{CaF}_2)^2 + 0,968 (\% \text{CaF}_2)(\% \text{AlF}_2) - 0,105(\% \text{CaF}_2)(\% \text{AlF}_3)^2 + 0,073(\% \text{CaF}_2)^2(\% \text{AlF}_3) + 0,002 (\% \text{CaF}_2)^2(\% \text{AlF}_3)^2 - 4,165(\% \text{AlF}_3) - 0,054 (\% \text{AlF}_3)^2 - 5,33(\% \text{Al}_2\text{O}_3)$$

b) Solubilidade da alumina no banho; deve ser a maior possível para facilitar a dissolução da alumina. Todos os aditivos, exceto o fluoreto de potássio, diminuem tanto a solubilidade, quanto a taxa de dissolução [6] de alumina no banho. Logo eles contribuem para geração de lama;

c) Densidade; Também deve ser a menor possível, porque a separação entre o metal e banho será mais consistente e ocorrerá menos reoxidação do alumínio. A densidade do alumínio líquido é de $2,3 \text{ g/cm}^3$. A mudança causada na densidade do banho pelos aditivos deve manter uma diferença mínima entre a densidade do alumínio e do banho de $0,2 \text{ g/cm}^3$. A Figura 3 mostra o efeito dos aditivos na densidade do banho. A equação (8) [6], obtida experimentalmente, calcula o valor da densidade (ρ) do banho em função da temperatura do eletrólito (t em $^\circ\text{C}$), ratio e das percentagens (em massa) dos aditivos;

$$\rho (\text{g/cm}^3) = 2,64 - 0,0008t + 0,18(\text{ratio}) - 0,008(\% \text{Al}_2\text{O}_3) + 0,005\% \text{CaF}_2 + 0,008\% \text{MgF}_2 - 0,004\% \text{LiF}$$

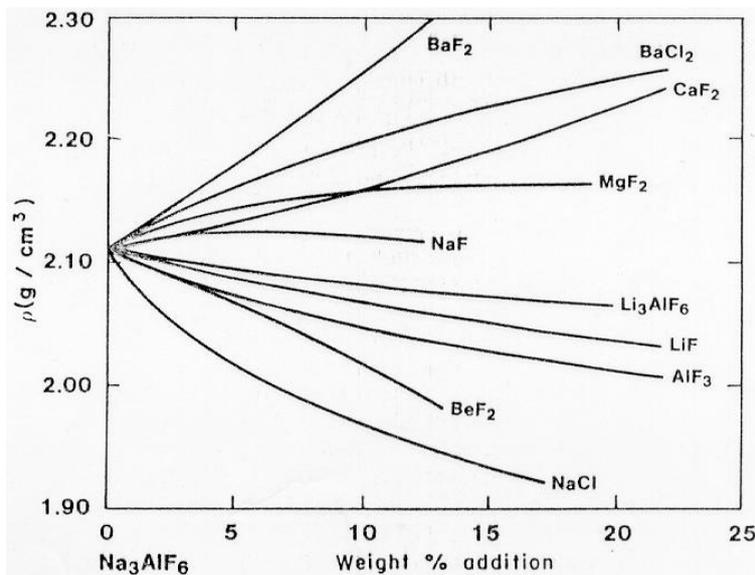


Figura 3 – Efeito dos aditivos na densidade do banho a 1000°C [6].

d) Condutividade elétrica; Esta é a propriedade físico-química de maior importância, visto que influencia diretamente o consumo de energia do processo. A condutividade elétrica (χ) pode ser calculada através apresentada a seguir. Esta equação é em função da temperatura (t °C) e composição (% massa). Ela foi obtida experimentalmente [6] e é dada em S/cm;

$$\ln\chi = 2,0156 - (2068,4)/(t+273) + 0,4349(\text{ratio}) - 0,0207 \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 0,005\% \text{CaF}_2 - 0,0166\% \text{MgF}_2 + 0,0178\% \text{LiF} + 0,0077\% \text{Li}_3\text{AlF}_6$$

e) Tensão interfacial; A tensão interfacial entre o metal e o eletrólito é definida como a diferença entre a tensão superficial do metal e do eletrólito. Esta propriedade deve ter o maior valor possível. Com isso, tem-se uma melhor separação entre eles e redução de transporte do metal na interface e no eletrólito, diminuindo a reoxidação. A tensão interfacial entre o eletrólito e o carbono deve, também, ser elevada para evitar penetração do eletrólito nos poros do carbono do anodo e catodo. A Figura 4 mostra que todos os fluoretos adicionados aumentam tensão interfacial entre o eletrólito e o alumínio, exceto o KF. O efeito da alumina nesta propriedade não é totalmente conhecido, porém há quem afirme que ela aumenta [5].

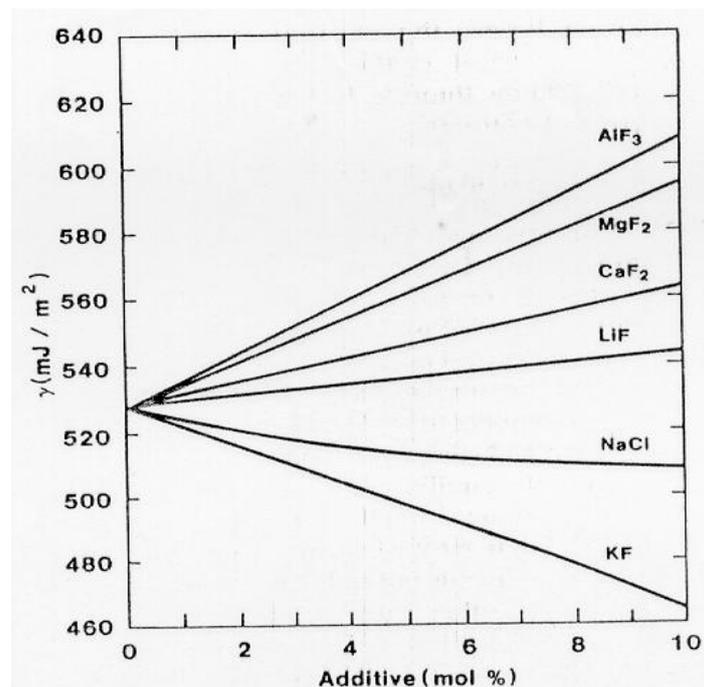


Figura 4 – Efeito dos aditivos na tensão interfacial entre o metal e o eletrólito a 1000°C [6].

f) Viscosidade; Esta propriedade influencia alguns processos hidrodinâmicos na célula, como movimentação do metal e dispersão de gotas de alumínio no eletrólito, sedimentação de partículas de alumina e evolução de bolhas de gases do anodo. Um valor levado da viscosidade seria benéfico para reduzir o transporte do metal dissolvido no eletrólito para o anodo, diminuindo a re-oxidação;

g) Pressão de vapor; As perdas de fluoretos por evaporação são fortemente determinadas por esta propriedade. Os vapores são ricos em AlF_3 . Por causa disso, é necessário sempre o ajuste do ratio das cubas, através da adição de AlF_3 .

A Tabela 2 apresenta o efeito de alguns aditivos, alumina e temperatura nas propriedades da criolita. Setas para cima indica que a propriedade aumenta. Setas para baixo indica o contrário. Setas em curva indica que o efeito é não linear. Espaço em branco indica que não há dados na literatura. Traço indica que não há influência [1,6].

Tabela 2 – Efeito de aditivos e temperatura sobre as propriedades da alumina.

Aumen t. variáve l	Solubil . Al_2O_3	Condut elétrica	Densid ade	Viscosid ade	Temper . liquidu s	Solubil . Al	Tensã o suberf .	Pressã o vapor
CaF_2	↓	↓	↑	↗	↓	↓	↑	↓
AlF_3	↓	↓	↓	↓	↖	↓	↓	↑
LiF	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↓
MgF_2	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↓
NaCl	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	
NaF	↘	↑	↖	↖	↖	↑	↑	↓
Al_2O_3	—	↓	↓	↗	↓	↓	↘	↓
Temper	↑	↑	↓	↓	—	↑	↓	↑

2.2. Resistência Elétrica das Cubas

A resistência é o parâmetro que determina a estabilidade da cuba. Quando a resistência varia pouco, a cuba está estável. A resistência elétrica da célula é influenciada por [4]:

- Concentração de alumina;
- Composição do banho;
- Quantidade de alumina precipitada no fundo da cuba;
- Nível de metal contido na cuba;
- Distância entre o catodo e o anodo.

O cálculo da resistência é feito pela equação abaixo:

$$R = (V - E) / I$$

Onde V é a tensão da cuba, I a corrente e E é a tensão necessária para dar início ao processo. Ela é formada pela tensão de decomposição da alumina e pela sobre-tensão existentes no anodo e catodo. Em geral, os valores da sobre-tesão no anodo e catodo são, respectivamente, 0,48V e 0,05V [1, 4]. A tensão de decomposição a 1000°C é 1,18V [4]. A Alumar utiliza E = 1,76 V. Como a corrente das cubas desta fábrica é de 216000A e a voltagem é cerca de 4,5V, logo a resistência é aproximadamente 12μΩ.

Na Alumar o computador mede a resistência das cubas a cada 15 segundos. Toda cuba tem a sua faixa de controle de resistência. Quando ela está fora dos limites, o computador altera a distância anodo-catodo (distância AC) para que ela retorne a faixa de controle. O controle da resistência através da distância AC é feito movimentando-se o barramento anódico.

O parâmetro utilizado para medir a estabilidade da célula é o ruído. Na Alumar, o ruído é calculado a cada 3 minutos (ciclo de ação). O cálculo é feito subtraindo-se a maior e a menor resistência neste período. Entretanto, o ruído calculado pelo computador e usado para o controle do processo é chamado de ruído filtrado. O cálculo é feito de acordo com a equação abaixo [1]:

$$\text{Ruído filt.} = (R_{\text{máx}} - R_{\text{mín}})_{\text{ciclo atual}} \times 0,2 + (\text{Ruído filt.})_{\text{ciclo anterior}} \times 0,8$$

Na Alumar considera-se que a cuba está estável quando o ruído filtrado é menor que $0,15\mu\Omega$. Nas fábricas de alumínio, algumas vezes, quando a cuba está com estabilidade boa, a distância AC é diminuída. Isto é uma tentativa de diminuir o consumo de energia e temperatura, visto que a resistência diminui [16]. Quando a cuba está instável, a distância AC é aumentada.

2.3. Sistema de Alimentação de Alumina

Existem várias formas de alimentar a cuba com alumina. Nas fábricas mais antigas isto é feito pela parte lateral da célula eletrolítica (side brake), através da quebra de uma crosta solidificada [5,6]. A composição química desta crosta depende do tipo de alumina usada e da temperatura de operação da célula [4]. Tipicamente ela contém aproximadamente 30% de banho e o remanescente sendo alumina. A maior parte da alumina da crosta apresenta uma forma cristalográfica diferente da alumina adicionada em forma de pó. Ela sofre uma transformação de fase gama para forma alfa. Esta transformação se dá pela ação do banho e de vapores provenientes da cuba. Esta alumina alfa torna mais difícil a dissolução da crosta, além disso, a crosta precisa ser fundida e ela diminui a área de contato da alumina com o eletrólito [4].

Em células mais modernas a alumina é adicionada automaticamente, ao longo de uma linha central. Este sistema é conhecido como “break-and-feed”. Ele consiste de uma barra de aço, localizada na parte central da cuba, cuja função é quebrar a crosta enquanto a alumina é adicionada diretamente no eletrólito. A operação da barra para quebrar a crosta é feita através de ar comprimido. O intervalo de tempo em que a alimentação é realizada varia de 20 a 90 minutos [4, 5]. As principais desvantagens das técnicas de alimentação descritas acima são as grandes flutuações da concentração de alumina ao longo do banho e da temperatura do eletrólito. As mudanças na temperatura são causadas pelas grandes quantidades de alumina adicionada. A dissolução da alumina é endotérmica. As dificuldades de manter a cuba dentro da faixa de controle são bem mais difíceis do que no sistema descrito abaixo [6, 9]. Além disso, no caso da alimentação lateral, geralmente existe uma distância relativamente grande entre o anodo e a parede da cuba. Isto requer uma crosta resistente para suportar seu próprio peso e atuar como isolante térmico. Entretanto ela também deve ser frágil para não dificultar a operação de quebra.

A mais recente inovação na alimentação de alumina é um sistema denominado de “point feeding”. Ele possui, ao longo da linha central da cuba, de 1 a 5 alimentadores. Estes alimentadores têm ponteiras (quebra-crosta) responsáveis em fazer pequenos furos (de 6 a 10 cm de diâmetro) na crosta. Então a alumina é adicionada nestes orifícios em um curto intervalo de tempo (de 1 a 2,5 minutos) e em pequena quantidade (de 1 a 5 quilogramas em cada ponto de alimentação) como a frequência de alimentação é alta, os furos feitos na crosta tendem a ficar abertos, facilitando saída de gases [1, 5, 7].

A principal razão das modernas fábricas preferirem o “point feeding” é devida melhor dissolução de alumina. Com este sistema chega-se próximo de uma alimentação contínua, ou seja, menor tendência de formar “lama” ou efeito anódico [6,7, 9]. Além disso, as variações térmicas são menores.

Em geral podemos dizer que o número de alimentadores e suas posições dependem do tamanho e design da célula. Outra estimativa é que existe um alimentador para cada 50kA de corrente da célula. De uma forma mais criteriosa, a quantidade de alimentadores na cuba será determinada por [7, 8]:

- a) Melhor dissolução da alumina. A quantidade não pode ser muito grande, senão gerará “lama”, nem pode ser muito pequena para evitar efeito anódico;
- b) Menores gradientes de concentração de alumina. Evitar que algumas regiões do banho possuam maiores teores de alumina que outras;
- c) Ser capaz de eliminar o efeito anódico. Quando ocorre o efeito anódico o sistema tem que aumentar a taxa de alimentação para exterminá-lo.

A Alumar utiliza o sistema de “point feeding”. A alimentação é feita através de três alimentadores. O tempo entre uma adição e outra não é igual em todas as cubas. Ele é estipulado conforme o comportamento da cuba ao longo do tempo, sendo reavaliado periodicamente (semanalmente) em função de diversas variáveis de processo da cuba em questão [3]. Entretanto, em média a frequência aproxima-se de 140 segundos. Cada alimentador adiciona cerca de 1,7kg de alumina na cuba. A Figura 1 mostra uma célula com este tipo de alimentação.

2.4. Alumina

O primeiro estágio na produção do alumínio é a extração da alumina da bauxita. Isto é realizado através de um processo químico denominado de “Bayer”.

A alumina tem algumas funções na indústria de alumínio, as principais são:

- a) Matéria prima para o processo Hall-Héroult;
- b) Diminuir as perdas térmicas da cuba. Mistura-se ao banho formando uma crosta sobre a parte fundida, agindo como isolante térmico;
- c) Recobrir os anodos (prebaked) para prevenir a reação deles com o ar;
- d) Absorver os fluoretos emitidos pela sala de cubas.

2.5. Eletrodos

Tanto o anodo como o catodo das cubas são fabricados com carbono. Enquanto o anodo é um elemento sempre consumido na eletrólise de redução da alumina, os blocos de carbono que formam o catodo servem apenas de condutor elétrico e isolante térmico. A camada de alumínio líquido que está sobre os blocos catódicos também faz parte do catodo. As indústrias de alumínio no mundo consomem cerca de 8 milhões de toneladas de carbono por ano devido ao desgaste do anodo [1].

O anodo fica suspenso sobre o catodo, parcialmente submerso no banho. Nele verifica-se a queima do carbono que combina com o oxigênio proveniente da eletrólise da alumina. Para o anodo ter o desempenho operacional esperado, ele deve conter algumas propriedades e alguns cuidados devem ser tomados. Abaixo seguem os principais [13, 15]:

- a) Alta condutividade elétrica;
- b) Ter bom isolamento, para não reagir com o ar;
- c) Baixa condutividade térmica;
- d) Alta resistência ao choque térmico e mecânico;
- e) Alta densidade;
- f) Baixa porosidade;
- g) Baixos níveis de impurezas;
- h) Base plana e horizontal;
- i) Ao ser trocado, o anodo novo deve manter-se no mesmo nível dos demais.

Na produção do alumínio, existem dois tipos de células eletrolíticas, Soderberg e prebaked. As células são diferenciadas pelo design e processo de fabricação do anodo [15].

Os dois tipos de cubas eletrolíticas têm como fundamento a utilização de carbono para a reação eletrolítica, porém este carbono pode vir em forma de pasta anódica ou blocos de carbono pré-cozidos, daí a origem para o nome do segundo tipo – Prebake.

Nesse tipo de processo, os blocos de carbono passam por um processo intermediário entre sua fabricação (moldagem do bloco, conhecido como anodo verde) e seu uso na cuba eletrolítica – esta etapa intermediária é conhecida por cozimento de anodos.

Em plantas Sodeberg, esta etapa é realizada dentro da própria cuba, onde a pasta anódica é colocada ainda em seu estado primário, e o processo de cozimento se dá ao longo da sua utilização na cuba. Porém como a cuba opera em uma temperatura significativamente abaixo da considerada ideal para o alcance do potencial máximo de qualidade da pasta anódica, em termos de propriedades físico-químicas, o processo Sodeberg fica limitado em termos de rendimento na produção de Alumínio.

Por esta razão, a tendência mundial é a completa migração das plantas Sodeberg para plantas Prebake, onde os anodos são pré-cozidos em uma área conhecida como Fornos de Cozimento de Anodos. O objetivo principal do processo de cozimento de anodos é permitir atingir as melhores propriedades físico-químicas para o bloco de carbono, através de uma adequada relação tempo x temperatura, além de uma suave taxa de aquecimento.

Basicamente o processo de cozimento resume-se em um tratamento térmico onde o calor é transferido de forma indireta ao anodo de carbono, permitindo alterações na composição química e mudanças na estrutura dos grãos de carbono dentro do bloco. A Figura 5 ilustra, de forma simplificada, o forno de cozimento.

Em Fornos de Cozimento a carga (anodo verde) é colocada dentro de poços profundos, abertos na parte superior e envoltos por tijolos refratários. Em seguida, os anodos são cobertos com coque granulado (chamado coque fluido), de composição química e temperatura de calcinação diferentes do coque do anodo. Entre dois poços com anodos, existem câmaras fechadas por onde passam gases aquecidos para permitir aquecimento indireto do anodo pela parede refratária e pelo coque fluido. Os anodos normalmente passam entre 14 e 16 dias dentro desses poços, onde obedecem a uma

curva de temperatura (ciclo de cozimento) garantida pela colocação de equipamentos móveis sobre estas câmaras de combustão, que injetam ar e combustível para geração de calor. Os gases gerados por este processo são captados por dutos de exaustão e lançados para a atmosfera através de chaminés com altura de cerca de 75 metros. Após o ciclo total de cozimento, os anodos são retirados dos poços e enviados a sala de chumbamento, onde uma haste de cobre é colocada no anodo para permitir posicionamento dentro da cuba eletrolítica.

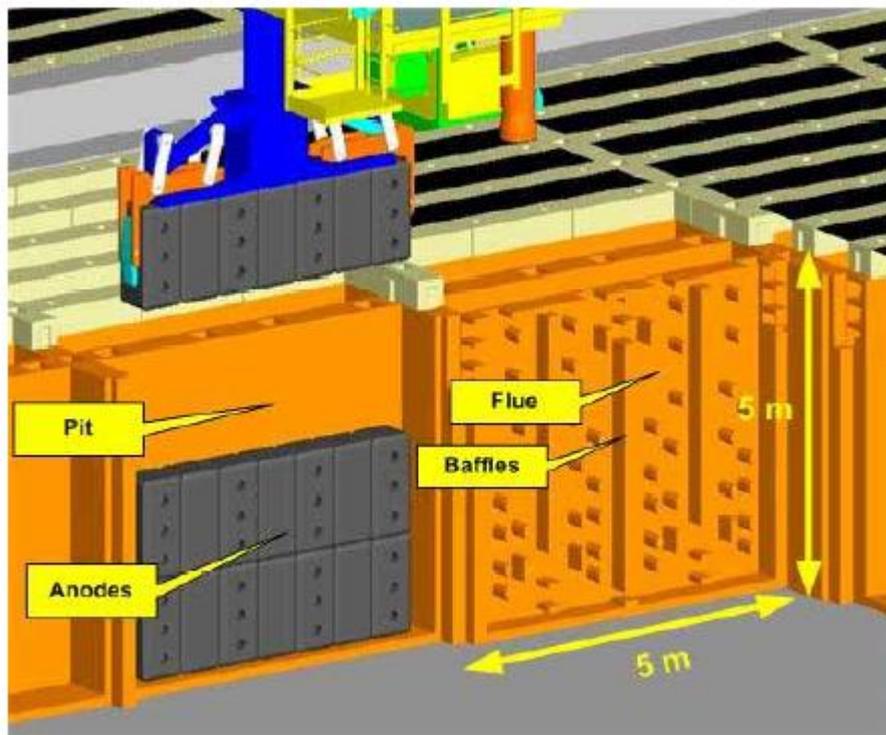
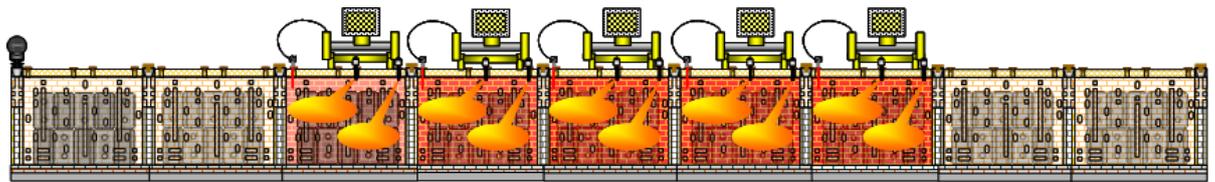


Figura 5 – Esquema do forno de cozimento de anodos.

Uma cuba eletrolítica opera adequadamente com anodos com baixa resistência elétrica, aproveitando melhor a corrente elétrica para a eletrólise, alta densidade e conseqüentemente baixa permeabilidade ao ar, levando a um baixo consumo bruto de carbono, e adequada condutividade térmica, o que garante pleno balanço térmico do reator.

Estas características são determinadas em parte pela qualidade da matéria-prima usada, no caso coque de petróleo e piche de alcatrão, pelas propriedades de formação do bloco, especificamente densidade verde e teor de piche na formulação, e pelas condições de tratamento térmico, ou processo de cozimento do anodo.

Para se alcançar uma satisfatória qualidade para o anodo cozido, os parâmetros do processo de cozimento devem ser previamente estudados e definidos em função de diversas condições de operação, projeto e matéria-prima utilizados. Os principais parâmetros do processo de cozimento são: ciclo de produção (parâmetro que determina o tempo total de cozimento), taxa de aquecimento, configuração e posicionamento dos equipamentos para elevação da temperatura e temperatura máxima de patamar.

Um dos pontos mais importantes do processo de cozimento é seu impacto nos aspectos ambientais. Como o anodo normalmente tem em torno de 15% de sua formulação (em peso) composto por piche de alcatrão, e cerca de 55% desse total tornam-se voláteis a temperatura de cozimento, existe a necessidade de manter um bom controle dos parâmetros de processo para que todo esse material seja queimado antes de emitidos pelas chaminés dos fornos, pois normas e controles são impostos por órgãos ambientais para não emissão de resíduos de hidrocarbonetos para atmosfera.

As células Soderberg usam um anodo apenas. À medida que este anodo é consumido, material carbonáceo (pasta anódica) é adicionado. Já as células prebaked, o tipo mais utilizado pelas modernas fábricas, os anodos são constituídos por blocos de carbono pré-cozidos. Os anodos permanecem na cuba durante certo período, até serem consumidos, então são trocados por anodos novos. A Alumar utiliza células prebaked e os anodos permanecem na cuba por 28 dias.

O anodo, conforme dito anteriormente é o eletrodo positivo. A corrente entra nele, atravessando o bloco de carbono. Em seguida, passa pelo banho eletrolítico para decompor a alumina. Segue através do leito de metal líquido, daí para o carbono do catodo e sai por barras de aço (coletoras) nele engastadas (Ver figura 4). Vale lembrar que as cubas são ligadas em série.

Os principais fatores que contribuem para o consumo do carbono do anodo são os seguintes [5,13]:

a) Reação eletroquímica: Nesta reação (ver equação 1) ocorre o consumo da maior parte do carbono do anodo, cerca de 75%. Estequiometricamente são usados 333 kg de C / t Al;

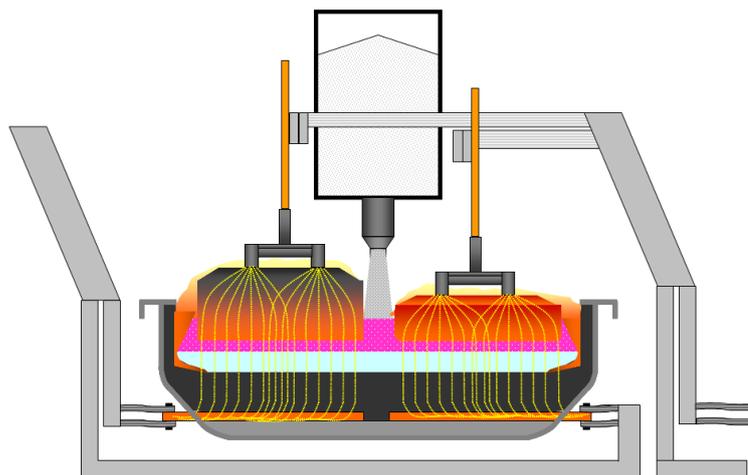


Figura 6 – passagem de corrente em uma cuba eletrolítica

b) Re-oxidação do alumínio: Por causa desta reação (ver reação 2) mais carbono é consumido para produzir uma quantidade de alumínio que já havia sido produzido, gerando perda de eficiência. Aproximadamente 8% do carbono do anodo é gasto nesta reação;

c) Reação do anodo com o oxigênio do ar: Muitos devem ser os cuidados para que o anodo não fique exposto ao ar. As perdas vão depender das condições da cobertura do anodo e da presença de impurezas, principalmente V e Ni, pois são fortes catalisadores da reação. Estima-se que 8% do carbono do anodo é perdido nesta reação;

d) Formação de pó de carbono: Muitas vezes observa-se a presença deste pó sobrenadando o banho eletrolítico. Trata-se de partículas finas de C, que se desprendem do anodo e que não reagem com os gases. O carbono do piche (aglutinante), que forma o anodo, é mais reativo que os grãos de coque. Assim, o piche é preferencialmente consumido durante a eletrólise. As partículas de coque são consumidas mais lentamente, as vezes se desprendem do anodo, formando os pós de carbono. Por volta de 3% do carbono do anodo é perdido em forma de pó;

e) Reação das laterais do anodo com CO_2 emitido da cuba: A 1010°C o CO_2 reage com o C (ver reação 10). Como a célula, normalmente, trabalha em temperaturas inferiores a 1000°C , pequena é a perda de carbono devido esta reação, aproximadamente 5%.



A Tabela 3 mostra um resumo dos principais fatores que contribuem para o consumo do anodo com seus percentuais.

Tabela 3 – Contribuições do consumo do carbono do anodo [5].

Mecanismos	Consumo do anodo (%massa)	
	Prebaked	Soderberg
Reação básica: $1/2 \text{Al}_2\text{O}_3 + 3/4\text{C} = \text{Al} + 3/4\text{CO}_2$	66-76	58-66
Perdas de carbono: $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ ou $2 \text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$	8-15	4-5
$\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$	5-6	7-8
Re-oxidação do Al	7-8	8-10
Reação com impurezas e perda por butts (anodos gastos)	3,5-4,5	2-3
Consumo teórico de carbono (kg C/kg Al)	0,333	0,333
Consumo real de carbono (kg C/kg Al)	0,4-0,45	0,5-0,55

A parte catódica da cuba é uma carcaça de aço revestida internamente com uma camada de material isolante e uma camada de blocos de carbono. O catodo é o eletrodo negativo ele é trocado após alguns anos, em geral após 5 anos. Nas células da Alumar, a vida útil do catodo, muitas vezes ultrapassa 7 anos.

As principais características que deve ter o catodo são as seguintes [13, 15]:

- a) Alta condutividade elétrica;
- b) Alta resistência ao choque térmico;
- c) Baixa condutividade térmica;
- d) Bom contato elétrico com a barra coletora;
- e) Baixa porosidade;
- f) Molhabilidade pelo alumínio fundido;
- g) Alta resistência a penetração do sódio e eletrólito;
- h) Resistência à abrasão.

A redução na vida do revestimento catódico é devida, geralmente, a interação dele com o eletrólito e produtos da eletrólise, principalmente o sódio [15].

3. Descrição do Problema

O processo de cozimento de anodos consiste no aquecimento indireto do bloco de carbono pelo calor gerado dentro das câmaras de combustão. Este calor é proveniente da queima de combustível (podendo ser óleo Diesel, pesado ou gás natural), injetado por equipamentos que se movem sobre os anodos a cada ciclo de produção. Este ciclo de produção reflete a velocidade com que cada equipamento é movido sobre os anodos que se localizam dentro dos poços, determinando assim a produção total de blocos de um determinado forno. Desta forma, quanto maior a necessidade de produção, menor será o tempo de cozimento, pois os equipamentos serão movidos mais rapidamente e os anodos retirados com um tempo total de cozimento menor.

A determinação da demanda de anodos varia em função do ciclo de vida do anodo dentro da cuba. Normalmente estabelece-se um ciclo de vida que permite enviar um anodo com um determinado peso (cerca de 1.050 kg no caso da Alumar) e retornar com uma parte dessa massa (chamada butts), de tal forma que a massa retornada garanta pelo menos 20% da formulação de um novo anodo. Esta massa de butts é necessária para atingir o mínimo de resistência mecânica para o anodo verde durante a formação do novo bloco. A equação que descreve a demanda de blocos anodos por dia (P BA) é a seguinte:

$$P\ BA = \frac{\text{número de anodos na cuba} \times \text{número de cubas em operação} \times 24}{\text{Ciclo de vida do anodo na cuba}} \times \text{taxa de falha}$$

Com a demanda de anodos calculada, calcula-se o ciclo de produção necessário para atender a esta demanda, ou seja, define-se a velocidade de movimentação dos equipamentos sobre os anodos.

O ciclo de produção é definido levando-se em conta a quantidade de fornos em operação, a quantidade de equipamentos disponíveis para cada forno e a quantidade de anodos colocados dentro de cada poço.

Cada forno opera com conjuntos de equipamentos que se movimentam sobre os anodos de acordo com o ciclo de produção. Estes conjuntos de equipamentos são chamados “fires”. Cada fire consiste em uma unidade de produção autônoma, composta por equipamentos que injetam combustível dentro das câmaras de combustão, injetam ar

para a combustão e exaustores que captam os gases. A Figura 7 mostra o esquemático de um forno.

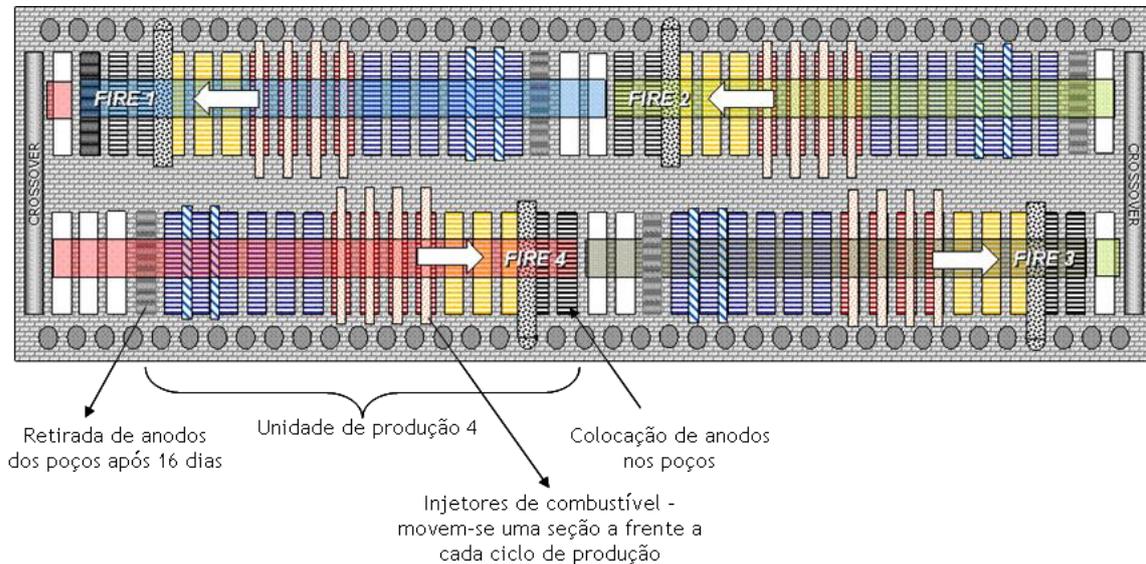


Figura 7 – Esquema de um forno de cozimento de anodo.

Com estes aspectos de produção definidos pela demanda de blocos pela cubas, criando restrições em termos de otimização, as alterações de processo tornam-se ainda mais significativas.

A partir deste ponto, o processo de cozimento pode ser alterado pela temperatura de patamar, tempo sob patamar e quantidade de equipamentos sobre os anodos. Vale lembrar que o objetivo principal é encontrar o ponto ótimo entre tempo e temperatura, apesar das restrições impostas por questões de produção. Porém, a busca pelo ponto ótimo é fundamentada não somente pelo comportamento teórico das propriedades físico-químicas em função da curva de cozimento, mas também pelas limitações impostas pela não uniformidade de temperatura dentro dos poços. Este fator torna-se o principal problema na otimização de um processo de cozimento de anodos, atingir o ponto ótimo de tempo x temperatura levando-se em conta sua variabilidade quando aplicada na prática.

Pela Figura 8 pode-se observar um perfil comum de temperatura dentro de um poço de anodos. Pode-se observar no perfil térmico do poço que as regiões dos cantos são mais frias que a região central, em função da maior perda de calor pelo topo e pelo fundo. Em fornos mais modernos, esta variação gira em torno de 50°C, porém em

foros como os da Alumar, o Delta T pode chegar a 150°C. Foros mais antigos, da década de 70 este valor chegava a 250°C.

Em termos de qualidade de anodo, isso pode se tornar dramático para o desempenho do anodo na produção de Alumínio, principalmente em questões relacionadas ao balanço térmico da cuba. Uma variação acima de 150°C faz com que propriedades como condutividade térmica e resistência elétrica adquiram o mesmo comportamento e aumentem suas variabilidades, comprometendo a estabilidade da cuba.

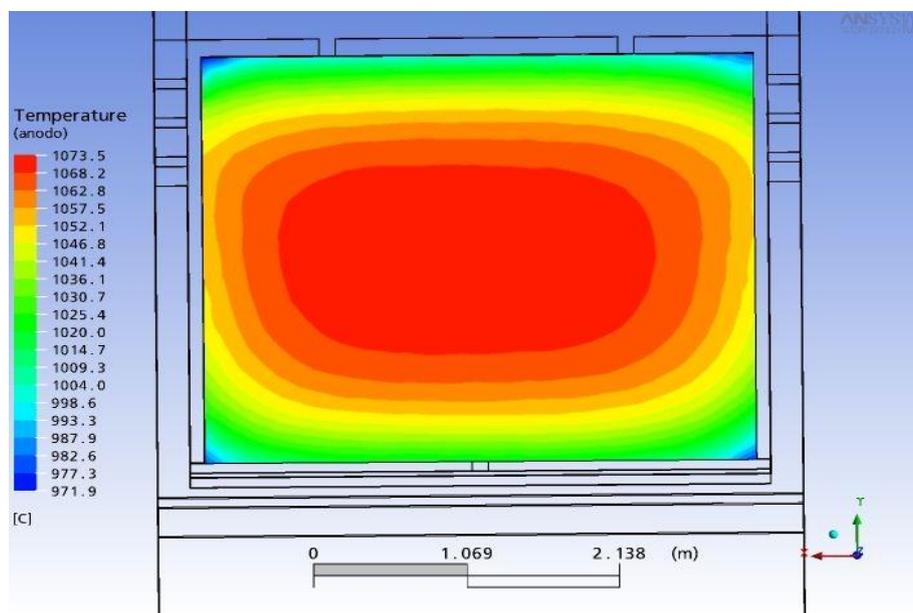


Figura 8 – perfil não uniforme de temperatura dentro dos poços de anodos.

Diante desses aspectos, a previsibilidade em termos de distribuição de temperatura em função dos testes e modificações nos parâmetros de processo com o objetivo de aperfeiçoar, torna-se fundamental para manutenção da estabilidade na produção de Alumínio, pois ela é diretamente afetada em função de modificações no processo de cozimento.

4. Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho é estudar os impactos do ciclo de cozimento, incluindo tempo total de cozimento, tempo sob patamar máximo de temperatura, taxa de aquecimento do anodo e temperatura de patamar, sobre a distribuição de temperatura dos anodos dentro dos poços nos fornos de cozimento, pois como os poços são relativamente profundos (cerca de 5 metros) e compridos (cerca de 6 metros), a temperatura pré-definida como target não é atingida em todas as regiões do poço, levando a uma não uniformidade no grau de cozimento de cada anodo, e criando distorções na distribuição da corrente elétrica pelos anodos dentro das cubas.

A proposta desta dissertação faz parte de um estudo de otimização maior em andamento nos Fornos da Alumar. Há em andamento um projeto com o objetivo de realizar o modelamento completo do processo de cozimento, onde todas as variáveis de processo estão sendo estudadas individual e conjuntamente. O resultado deste projeto será um modelo validado experimentalmente que mostre a influência de cada parâmetro de processo sobre a distribuição de temperatura nos poços de anodos. Este modelo irá rodar em CFX e permitirá prever o comportamento da distribuição de temperatura em função de alterações nos parâmetros de processo. Isso permitirá aumentar a velocidade e a assertividade nos testes propostos pela engenharia de processo para otimizar o processo de cozimento.

Diante disso, a proposta desse estudo é conduzir todos os testes experimentais programados para validar o modelo estudado teoricamente pelo projeto e participar ativamente das decisões em relação à definição das condições de contorno e de algumas características que deverão ser inferidas no modelo.

Conforme já citado, esta dissertação terá como focos principais a participação ativa na definição das condições de contorno e inferências (baseadas em julgamento de engenharia) no modelo em desenvolvimento e a condução dos testes experimentais.

Como resultado é esperado um modelo validado experimentalmente, onde todas as características do processo de cozimento, tanto do aspecto de processo quanto de projeto, estejam inseridas. Isso significa ter a possibilidade de trabalhar as informações contidas no modelo e permitir à engenharia de processo simular interações e alterar parâmetros de processo no sentido de buscar otimizar a distribuição de temperatura dos anodos dentro dos poços.

O objetivo tático desta dissertação será a definição junto ao pessoal de projeto as melhores interações entre tempo e temperatura para que seja testado em campo, além da condução dos testes escolhidos. Em cada teste, será observado o perfil de temperatura e os resultados de qualidade dos anodos em cada ponto do poço, normalmente dividido em 48 pontos, e os aspectos ambientais do teste. Em relação a este ponto, serão observados os resultados de emissões visíveis pelas chaminés e avaliado o percentual de Enxofre no anodo cozido, indicador para composição dos gases emitidos e indicador de qualidade de anodo (baixa perda de Enxofre indica melhores propriedades anódicas).

Os testes consistirão em alterar a temperatura de patamar, alterar o tempo de encharque sob patamar e o ciclo de produção do forno, para que seja possível identificar o impacto de cada um na distribuição de temperatura.

5. Estado da Arte

Nos últimos 5 anos o Processo de Cozimento de Anodos passou a ser estudado de forma mais aprofundada, tendo como base simulações iniciais em softwares de modelamento fluido-dinâmico como o CFX. OS trabalhos mais avançados foram desenvolvidos por empresas especializadas em simulações computacionais como a PCE Engenharia e a suíça R&D Carbon.

Nesses trabalhos, foram realizadas simulações fluido-dinâmicas 3D em fornos de cozimento, com validação do modelo em campo através de experimentos práticos. As principais variáveis estudadas são as mesmas desta dissertação, como temperatura máxima de cozimento, geometria da câmara e tempo total de encharque, tendo como resultado o perfil de temperatura e Delta T da câmara de cozimento.

Para se chegar a esses resultados, os trabalhos baseiam-se tanto no estudo em regime estacionário quanto no regime transiente (Severo, 2005), em ciclos de cozimento próximos ao estudado nessa dissertação.

Os primeiros trabalhos tinham como meta principal desenvolver uma geometria de câmara que permitisse alcançar o melhor resultado em termos de perfil de temperatura, deixando a câmara o mais uniforme possível. A Figura 9 apresenta um exemplo de geometria para a câmara por onde o ar quente escoava.

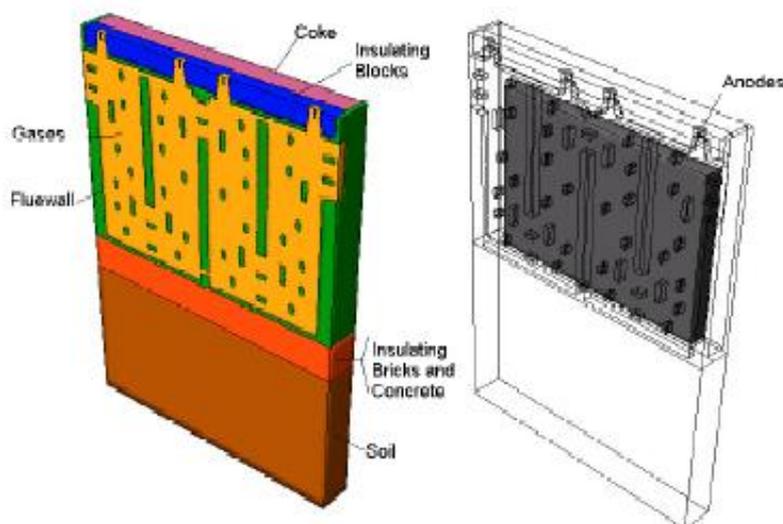


Figura 9 – Exemplo de geometria de câmara.

Desta forma foram realizadas modificações na geometria, tais como simulações das posições de tijolos intermediários que pudessem melhorar o fluxo de gases e tempo

de residência reduzindo os pontos frios dentro da câmara. A Figura 10 apresenta um exemplo de perfil de velocidade.

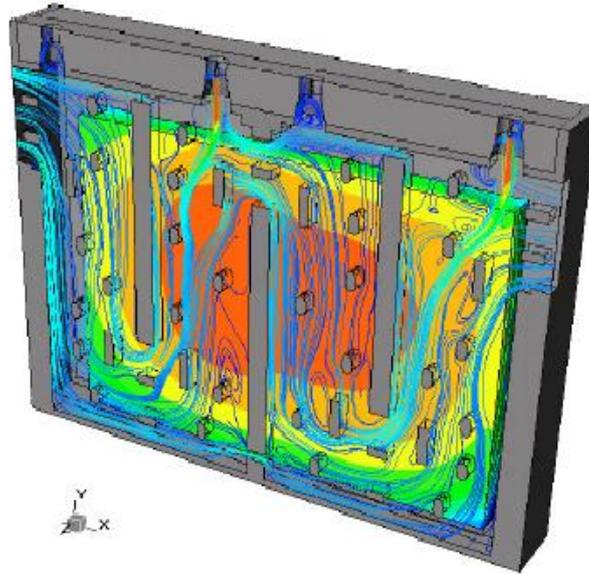


Figura 10 – Exemplo de perfil de velocidade.

Os trabalhos também consideraram os efeitos do tempo de cozimento e temperatura máxima sobre o perfil de temperatura, independente da geometria utilizada. Testes em campo foram executados para validação dos resultados. Um dos trabalhos foi executado no mesmo Forno de Cozimento dessa dissertação, o Forno # 3 da Alumar.

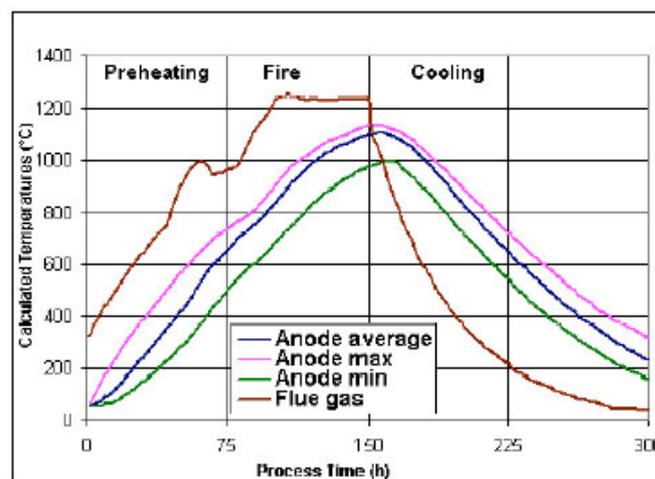


Figura 11 – Curva de cozimento e resfriamento.

Alguns desenvolvimentos foram mais a fundo, estudando os detalhes da geometria do forno como um todo, desde as seções retas até as curvas do crossover

(Perruchoud, 2007), que é a região onde os gases retornam e fluem para o outro lado do Forno (em fornos do tipo Open Ring). Nessa região há uma perda excessiva de calor e pressão, impactando o perfil de temperatura das câmaras seguintes. Por essa razão um estudo detalhado é necessário, tal qual foi realizado pelos trabalhos da PCE e R&D Carbon (Gendre, 2007).

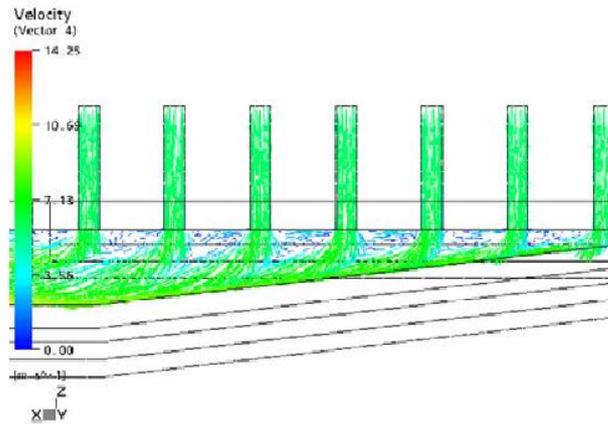


Figura 12 – Exemplo de perfil de velocidade no crossover.

Há ainda estudos de fornos de cozimento com o detalhamento de todas as regiões do Forno, incluindo o sistema de exaustão dos gases no sentido de estudar o impacto do modelo de escoamento de gases e perfil de temperatura interna das chaminés sobre as câmaras de combustão dentro das seções do Forno, Figura 13.



Figura 13 – sistema de exaustão de gases.

6. Modelagem e Simulação

A modelagem do forno de cozimento baseou-se na aplicação dos princípios de conservação da massa, energia e quantidade de movimento e está sendo desenvolvida usando fluidodinâmica computacional (CFD).

O modelo matemático baseia-se nas equações de conservação da quantidade de movimento, da massa e da energia (Alves, 1998).

QUANTIDADE DE MOVIMENTO

$$\frac{\partial[\rho\vec{v}]}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho\vec{v}\vec{v} - \mu_{eff}(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T))] = (\rho\vec{g} - \nabla P)$$

onde v é velocidade, P é a pressão, ρ é a densidade e μ_{eff} é a viscosidade efetiva do meio.

CONTINUIDADE

$$\frac{\partial[\rho]}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho\vec{v}] = 0$$

CONSERVAÇÃO DAS ESPÉCIES

$$\frac{\partial[\rho_i]}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{v}\rho_i - D_{im}^{eff}\nabla\rho_i] = R_i$$

Onde ρ_i é a concentração do componente “i”, D_{im}^{eff} é a difusividade efetiva do componente “i” na mistura e R_i a taxa de reação do componente “i”.

ENERGIA

$$\frac{\partial[\rho C_p T]}{\partial t} + \nabla \cdot [C_p \rho \vec{v} T - k_{eff}(\nabla T)] = G + \phi$$

onde C_p é o calor específico, k_{eff} é a condutividade térmica efetiva do meio ϕ é geração de calor devido a dissipação viscosa (atrito viscoso) e G a taxa de geração de energia (devido as reações, por exemplo) por unidade de volume.

O modelo matemático está sendo resolvido numericamente utilizando-se o método dos volumes finitos com malha não estruturada, utilizando-se o software CFX-10.

As variáveis do modelo são: a velocidade v (vetor com três componentes), a qual é obtida da equação do movimento; a pressão, a qual é obtida da equação da continuidade através de um acoplamento pressão-velocidade; a concentração das espécies ρ_i , a qual é obtida a partir da equação de conservação das espécies; e T , a temperatura, a qual é obtida a partir da equação da energia.

Os parâmetros do modelo são: a densidade, a viscosidade, a condutividade térmica, o calor específico do meio e a difusividade efetiva de cada componente “ i ” na mistura. Estas propriedades são necessárias para todos os materiais que compõem o domínio de cálculo.

As equações constitutivas necessárias são a cinética da reação para cada componente “ i ” e os calores de reação envolvidos.

Condições de contorno são necessárias em todos os contornos do domínio e no caso transiente, a condição inicial.

O processo de cozimento consiste de 14 estágios (etapas); todas realizadas em câmaras semelhantes. Dessa forma, apenas um estágio está sendo modelado, o qual será usado para simular todas as etapas, mudando apenas as condições iniciais e de contorno.

As simulações foram realizadas de modo a considerar a influência dos seguintes aspectos: geometria, queimadores, presença do anodo e tempo.

7. Uso do CFX

O Solver do CFX-10 é um programa para predição de fluxo laminar e turbulento, transferência de calor, junto com modelos adicionais para fluxo multifásico, combustão e transporte de partículas. A primeira versão do código (originalmente FLOW3D) era limitada a simples geometrias, tais como formas cilíndricas e cartesianas. A versão 2 superou estas limitações através do uso do sistema de coordenadas “body-fitted”. As versões 3 e 4 entendem a capacidade do código através do uso de multi-blocos ou bloco de malha não estruturada, isto é, a malha pode ser construída pela união de um numero arbitrário de blocos de malha topologicamente retangular, ou por blocos. Neste período outras melhorias foram incorporadas ao software CFX, chegando-se até a versão CFX-10, utilizada neste trabalho.

O conjunto de programas que constituem o CFX-10 é formado pelo Pré-Processador, Processador e pelo Pós-Processador. Um problema típico pode envolver primeiro o uso do pré-processador CFX-MeshBuild ou CFXBuild para construção do arquivo de geometria. O CFX-Solver para resolução do problema e o pós-processador composto pelo CFX-View e CFX-Visualyse (CFX: User Manual, 2006).

7.1. O Pré-Processador

O pré-processador, também conhecido como o gerador de malhas, pode ser usado para definir o domínio de calculo e para gerar a malha propriamente dita. Detalhes da topologia e sistema de coordenadas são gravados no disco em um arquivo de comandos (command file), lido posteriormente pelo Modulo Frontend do Processador. O uso desses módulos é opcional.

Malhas e topologias simples podem ser definidas com o uso do módulo CFX-Setup. Os geradores de malha e de geometria incluem geradores de malha iterativos tais como: o CFXMeshbuild e o CFX-Build, que podem ser usados para especificar as características da geometria e converter elementos finitos para malha multi-blocos com o CFX-Meshimport.

O CFX-Setup é um programa interativo usado para gerar e editar o arquivo de comandos. Este programa exhibe comandos, subcomandos e palavras-chave numa seqüência lógica. O CFX-Setup oferece três facilidades para ajudar na construção e edição do arquivo de comandos, que são:

- A facilidade de adicionar complexidade de acordo com o nível que usar (iniciante, intermediário e avançado);
- Exibe em uma janela o arquivo de comandos em tempo de construção;
- Tem a opção de checar o arquivo de comandos em busca de erro de sintaxe e/ou de lógica;

O CFX-Build é um dos geradores de geometrias do CFX. Suporta pacotes inclusos do CATIA, EUCLID3, CADD5 5, Unigraphics, ProENGINEER e IGES. Porém, para este último são necessárias licenças adicionais. Para a criação da geometria usando o pré-processo deve-se seguir a seqüência:

- a) Criar a geometria;
- b) Definir os patches;
- c) Criar a malha;
- d) Criar o arquivo de geometria.

7.2. O Processador

Este é dividido em dois módulos: o Frontend e o Solver:

- Modulo Frontend – tem a finalidade de converter o arquivo de comandos produzidos pelo usuário para uma execução eficiente e promover ajuda necessária para resolução de problemas. O arquivo de comandos é um arquivo de texto simples (ASCII) composto de comando escrito em inglês e é dividido em comandos, subcomandos e palavras-chave. Permite ainda inserir subrotinas em Fortran;
- Modulo Solver – tem como finalidade resolver as equações discretizadas que representam o problema. O solver recebe informações do arquivo de comandos, que permite a máxima eficiência, em diferentes tipos de computadores, incluindo processamento paralelo e vetorial. As informações da resolução do problema são escritas num arquivo de dump.

7.3. O Pós-Processador

Tem a função de produzir gráficos para visualização da resposta do problema, lidos a partir do arquivo de dump produzido pelo solver. O uso deste módulo é opcional. O CFX tem alguns programas de pós-processamento: o CFX-View, CFX-Linegraph e o

CFX-Visualise. Destes três destacam-se:

- CFX-View: tem como função principal ler os resultados contidos no arquivo de dump e exibir em forma de mapa de contornos, superfícies e etc., de acordo com a necessidade do usuário. Tem como principal vantagem sobre o CFX-Analyse, a opção de aplicar um fator de escala para qualquer direção, isoladamente;
- CFX-Analyse: tem a mesma função do CFX-View, sendo mais simples de ser utilizado.

7.4. Arquivos Usados pelo CFX

A Tabela 4 lista e descreve os arquivos utilizados e gerados pelo CFX. Os ** representam um numero que inicia em 01 e termina em 99 e indica a simulação corrente. Quando a simulação é iniciada, o CFX lê os arquivos necessários fornecidos pelo usuário e faz uma copia com esse numero incrementado. Quando chegar a 99, a próxima cópia produzida será 01.

Tabela 4 – Arquivos usados e criados pelo CFX.

Arquivo	Descrição
m*.fc	Arquivo de comando escrito pelo usuário
m*.dmp	Arquivo onde a resposta é encontrada
m*.fo	Arquivo de texto simples que contém uma lista de todos os possíveis erros que impediram a execução do CFX-Solver
m*.ft	Arquivo que contém o diagnóstico e histórico de execução do CFX-Solver
m*.geo	Arquivo que contém a geometria construída pelo pré-processador
m*.f	Arquivo que contém sub-rotinas em Fortran escritas pelo usuário

8. Resultados

8.1. Simulação Considerando Escoamento de Ar

Nesse caso, a simulação assemelha-se à etapa de pré-aquecimento ou resfriamento.

As Figuras de 14 a 16 apresentam os resultados para diferentes geometrias, considerando um estágio hipotético. Nesse caso, não foi considerada a presença do anodo.

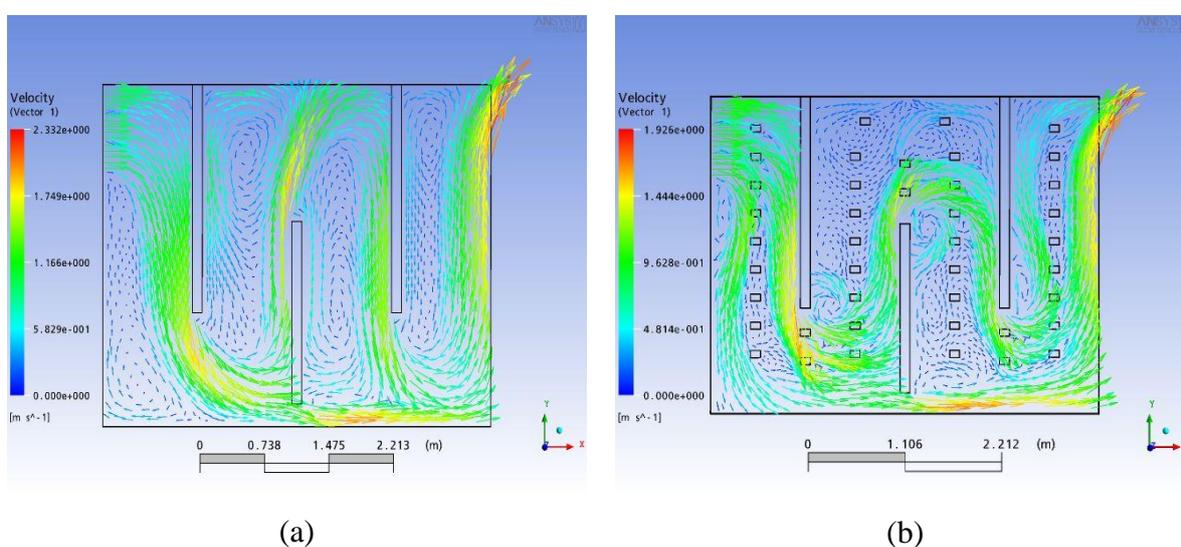


Figura 14 – Perfil de velocidade no fluido para a condição sem (a) e com (b) tijolos internos. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$.

Nas Figuras 14a, 15a e 16a tem-se a condição onde não foi considerada a presença dos tijolos internos, enquanto as Figuras 1b, 2b e 3b apresentam os resultados para a situação onde os tijolos internos estão presentes. A comparação dessas figuras permite observar a ***influência da geometria*** sobre os perfis de velocidade e temperatura na fase fluida (centro da câmara) e perfil de temperatura no refratário (face em contato com o anodo).

É possível observar através da Figura 14a, a qual não apresenta tijolos internos, a existência de caminhos preferenciais de fluxos, tornando menos uniforme a distribuição de temperatura no fluido, Figuras 15a e 16a. Conforme mostra a Figura 14b, a inclusão dos tijolos internos diminui (mas não elimina os caminhos preferenciais) tornando a distribuição de temperatura mais uniforme, Figuras 15b e 16b.

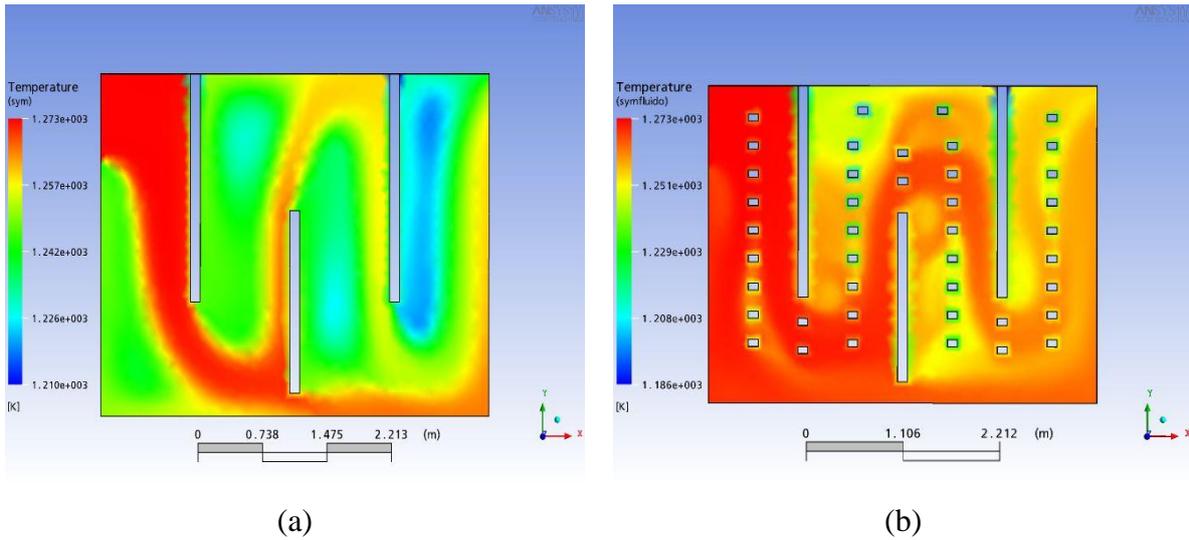


Figura 15 – Perfil de temperatura no fluido para a condição sem (a) e com (b) tijolos internos. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$.

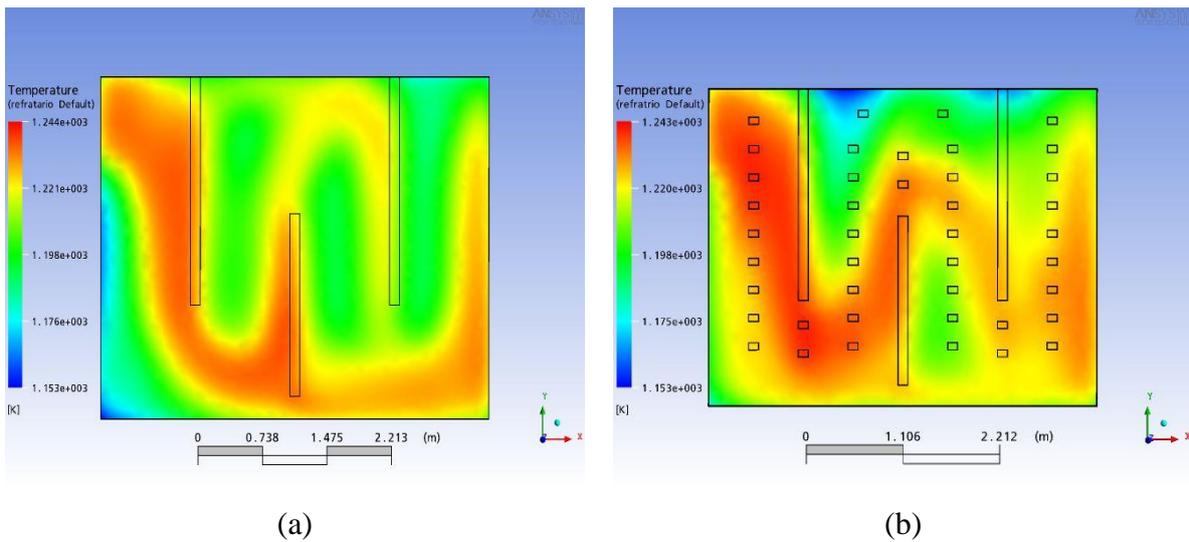


Figura 16 – Perfil de temperatura no refratário para a condição sem (a) e com (b) tijolos internos. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$.

A comparação das Figuras 15a e 15b mostra a importância que o perfil de velocidade na fase fluida tem sobre a distribuição de temperatura no fluido, que por sua vez tem influência direta sobre a distribuição de temperatura no refratário, conforme mostram as Figuras 16a e 16b.

Uma observação importante é a não consideração, nesse caso, das perdas de calor pelas partes inferior e superior da câmara, o que torna a distribuição de temperatura mais uniforme.

8.2. Simulação Considerando Escoamento de Ar e Queimadores

As Figuras de 17 a 19 têm a mesma finalidade das figuras anteriores: comparar a influência da geometria sobre os perfis de velocidade e temperatura na fase fluida (centro da câmara) e perfil de temperatura no refratário (face em contato com o anodo), considerando a presença dos queimadores. Nesse caso, a simulação assemelha-se à etapa de aquecimento.

Comparando as Figuras 17a e 17b, observa-se mais uma vez que a presença dos tijolos internos dispersa melhor os gases. Entretanto, comparando as Figuras 18a e 18b, percebe-se que isso é mais verdadeiro depois da 1ª chicana, visto que antes dessa a região apresenta baixa temperatura.

A presença dos tijolos internos faz com que a distribuição de temperatura também no refratário, Figuras 18a e 18b, seja mais intensa na região de saída da câmara. Esse é um resultado que deverá ser mais estudado.

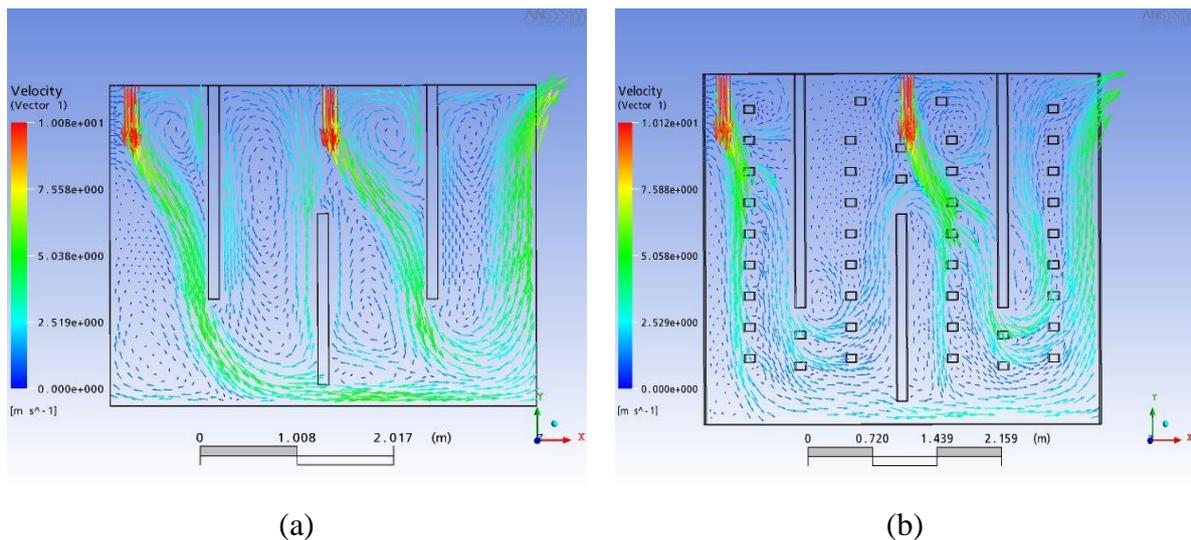
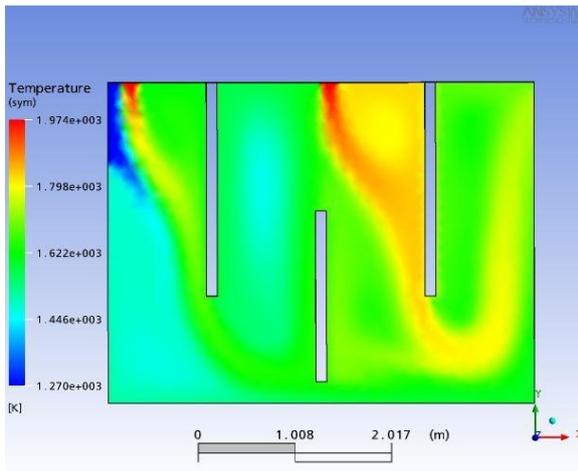
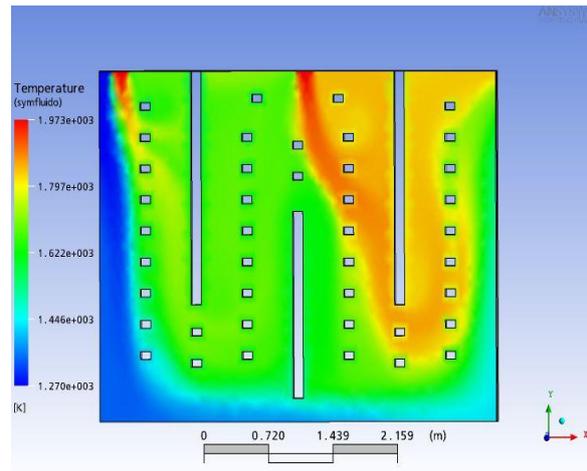


Figura 17 – Perfil de velocidade no fluido para a condição sem (a) e com tijolo interno e com queimador. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$; $V_{gás} = 10 \text{ m/s}$; $T_{gás} = 1973 \text{ K}$.

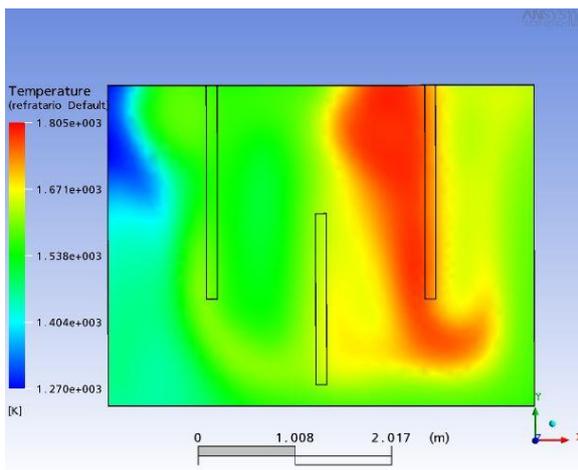


(a)

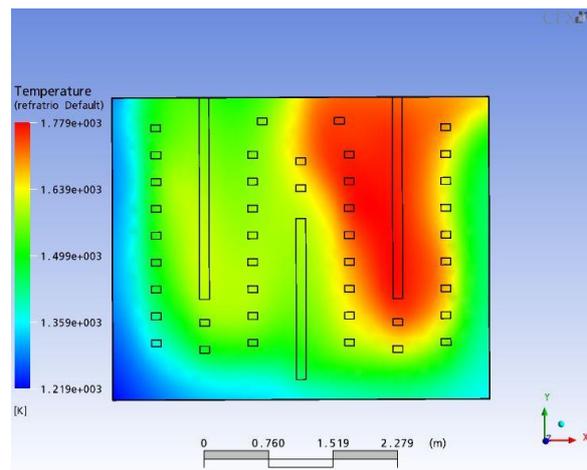


(b)

Figura 17 – Perfil de temperatura no fluido para a condição (a) sem e (b) com tijolo interno e com queimador. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$; $V_{gás} = 10 \text{ m/s}$; $T_{gás} = 1973 \text{ K}$.



(a)



(b)

Figura 18 – Perfil de temperatura no refratário para a condição (a) sem e (b) com tijolo interno e com queimador. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$; $V_{gás} = 10 \text{ m/s}$; $T_{gás} = 1973 \text{ K}$.

8.3. Simulação Considerando Escoamento de Ar e Queimadores com Anodo

Nesse caso, foram considerados os tijolos internos e a presença do anodo. É importante salientar que o anodo na malha representa o conjunto de 10 anodos usados na planta.

Para simular a energia gasta na evaporação dos voláteis foi fixada uma perda de 200 W/m^3 .

A perda de energia pelas laterais (anodo e câmara de combustão) foi fixada em 250 W/m^3 , enquanto as perdas pela base (anodo e câmara de combustão) em 1000 W/m^3 . Esses valores foram estimados (ajustados) a partir da comparação entre os dados teóricos e os dados reais. A perda de energia pelo topo foi calculada levando-se em consideração as temperaturas da superfície e a temperatura do ambiente.

A Figura 19 tem como objetivo comparar a influência da perda de calor pelas bordas da câmara e do anodo, onde se percebe uma completa modificação em relação aos resultados apresentados até agora. A perda de calor pelas bordas faz com que as maiores temperaturas ocorram na parte central do anodo, conforme mostra a Figura 19b.

Nesse caso específico (hipotético), conforme mostra a Figura 19, observa-se um gradiente de temperatura máximo de $56 \text{ }^\circ\text{C}$ e uma distribuição de temperatura aproxima daquela observada na prática.

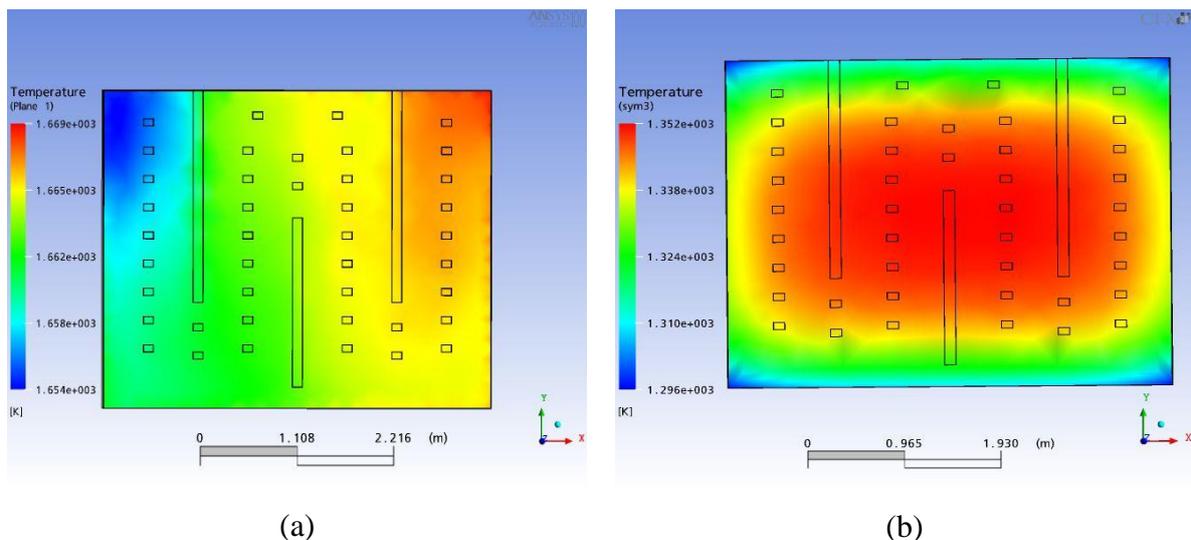


Figura 19 – Perfil de temperatura na interface anodo-refratário para a condição com tijolo interno, com queimador, com anodo (a) sem e com (b) perdas pelas bordas. $V_{ar} = 1 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1273 \text{ K}$; $V_{gás} = 10 \text{ m/s}$; $T_{gás} = 1973 \text{ K}$.

A Figura 20 apresenta a malha com a geometria usada nas simulações que forneceram os resultados apresentados nas Figuras 18 e 19, onde se percebe um maior refinamento (maior quantidade de volumes) em algumas regiões.

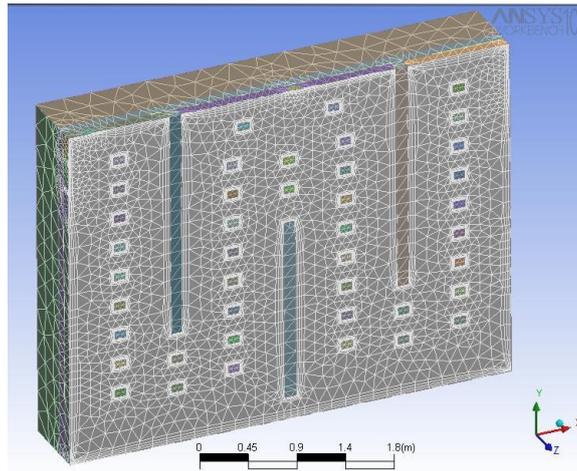


Figura 20 – Geometria com malha numérica usada para obtenção dos resultados apresentados nas Figuras 18 e 19.

8.4. Validação em Regime Estacionário

A Figura 21a apresenta o perfil de temperatura no anodo obtido via simulação para as seguintes condições: $V_{ar} = 2.5 \text{ m/s}$; $T_{ar} = 1373 \text{ K}$; $V_{gás} = 25 \text{ m/s}$; $T_{gás} = 2123 \text{ K}$; condição com tijolo interno, com queimador, com perdas pelas bordas. As condições de perda de calor foram as mesmas usadas nas simulações anteriores.

Comparando-se as Figuras 21a e 21b observa-se uma concordância razoável entre os dados reais e simulados. No caso dos dados reais, o perfil foi obtido para um tempo de 24 h em cada estágio.

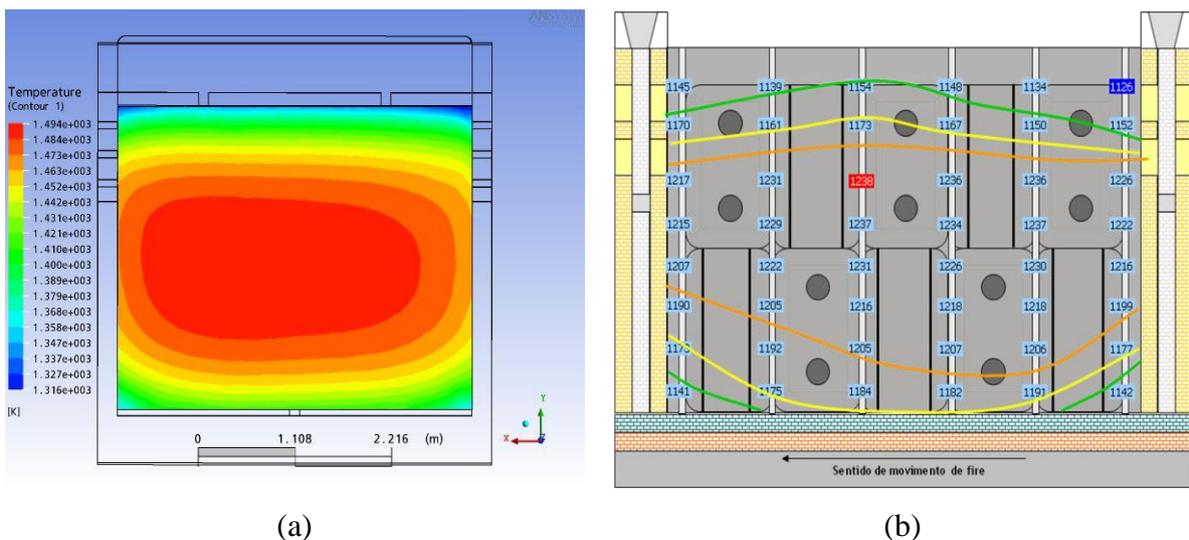


Figura 21 – Perfil de temperatura (a) simulado e (b) real; imediatamente após o 7º estágio (ou 4º cozimento).

A diferença entre os dados reais e simulados é devido às incertezas nas seguintes variáveis: temperatura do gás, vazão do gás, temperatura do ar, vazão do ar e perdas de calor. No caso da temperatura do gás, isso será resolvido quando for incluída a reação de combustão. Para as demais variáveis novos estudos serão necessários, incluindo plano de teste na planta.

8.5. Simulações em Regime Transiente

As Figuras 22 a 28 apresentam o perfil de temperatura no anodo para cada estágio do pré-aquecimento (03 estágios) e do aquecimento (04 estágios). As simulações foram realizadas considerando dois intervalos de tempo em cada estágio: 20 e 24 h. De modo a proporcionar melhor análise, a escala de temperatura foi mantida igual para os dois ciclos. As condições de perda de calor foram as mesmas usadas nas simulações anteriores. A Figura 30 apresenta a geometria usada nas simulações.

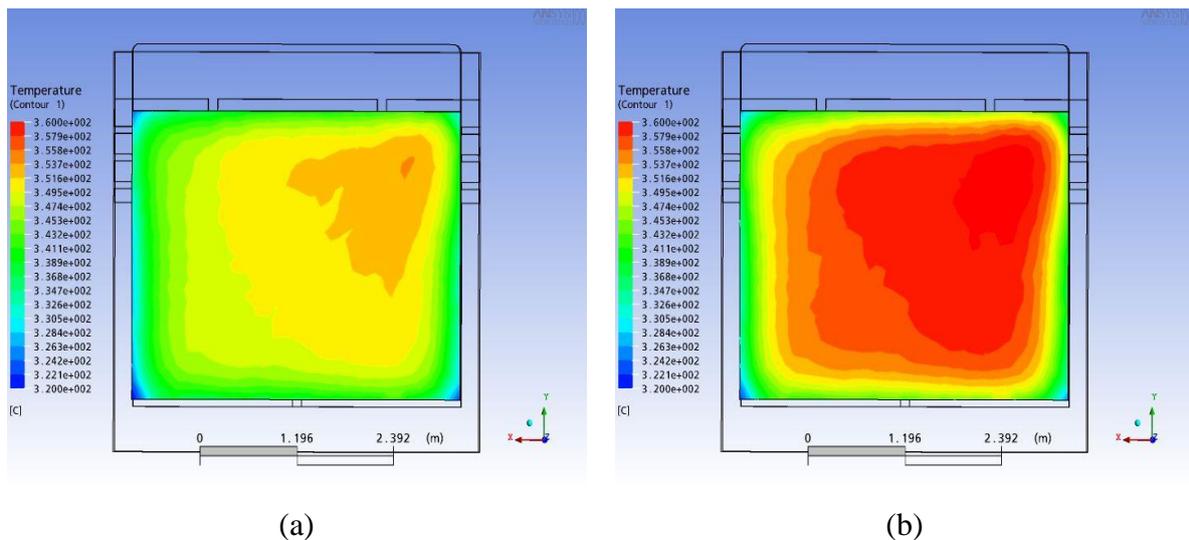


Figura 22 – Perfil de temperatura no anodo para o 1º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h.

Para o 1º estágio, Figura 22, somente ar oriundo do 2º estágio alimenta a câmara de combustão. A temperatura do ar foi fixada em 400 °C, enquanto a temperatura inicial do anodo (perfil uniforme) foi fixada em 30 °C.

Para o 2º estágio, Figura 23, somente ar oriundo do 3º estágio alimenta a câmara de combustão. A temperatura do ar foi fixada em 800 °C, enquanto o perfil inicial de temperatura do anodo foi o resultado do 1º estágio.

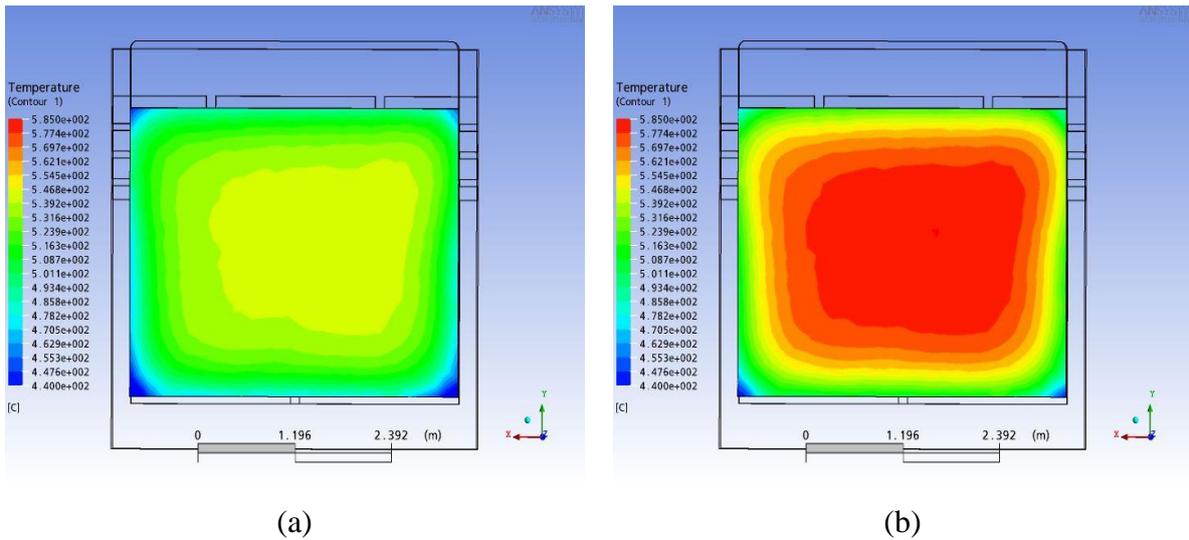


Figura 23 – Perfil de temperatura no anodo para o 2º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h.

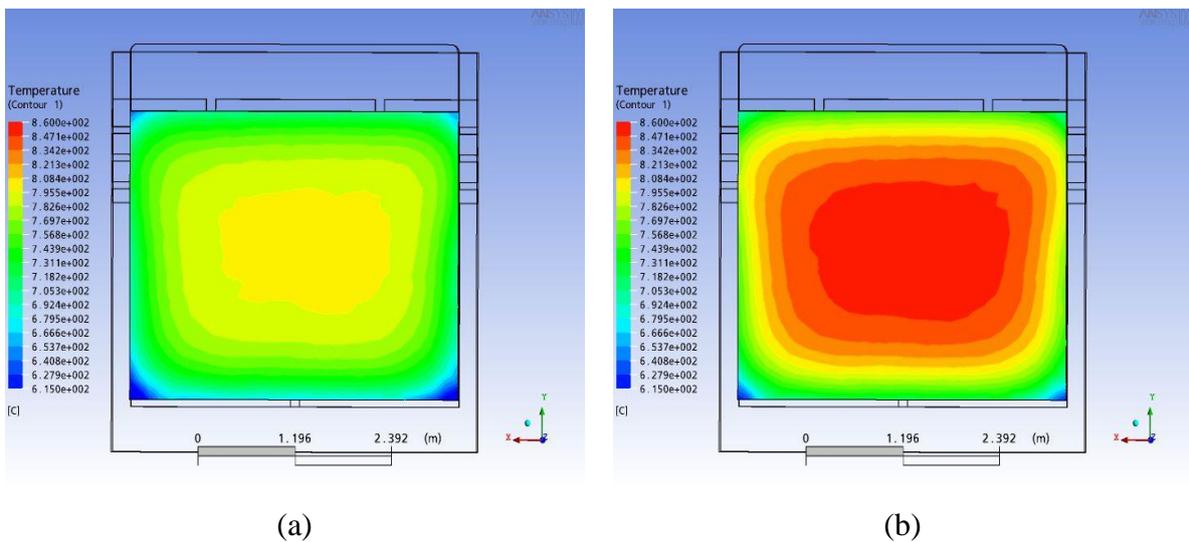


Figura 24 – Perfil de temperatura no anodo para o 3º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h.

Para o 3º estágio, Figura 24, somente ar oriundo do 4º estágio alimenta a câmara de combustão. A temperatura do ar foi fixada em 1100 °C, enquanto o perfil inicial de temperatura do anodo foi o resultado do 4º estágio.

Para os estágios 4º, 5º, 6º e 7º, Figura 25, 26, 27 e 28, além de ar à 1100 °C, uma vazão de gás à 2112 °C (temperatura de chama do diesel) alimenta a câmara de combustão.

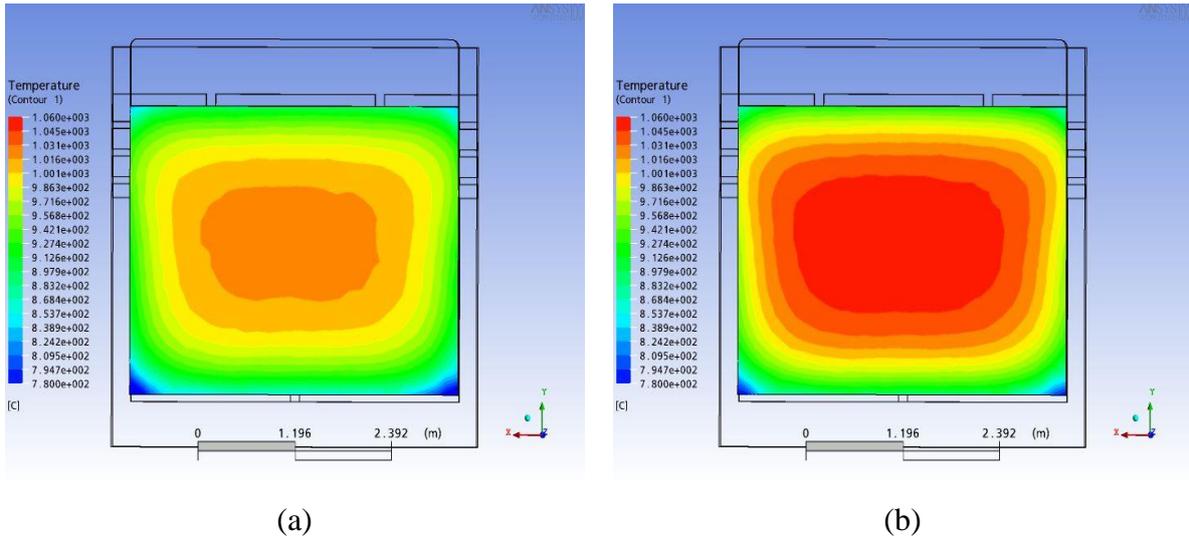


Figura 25 – Perfil de temperatura no anodo para o 4º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h.

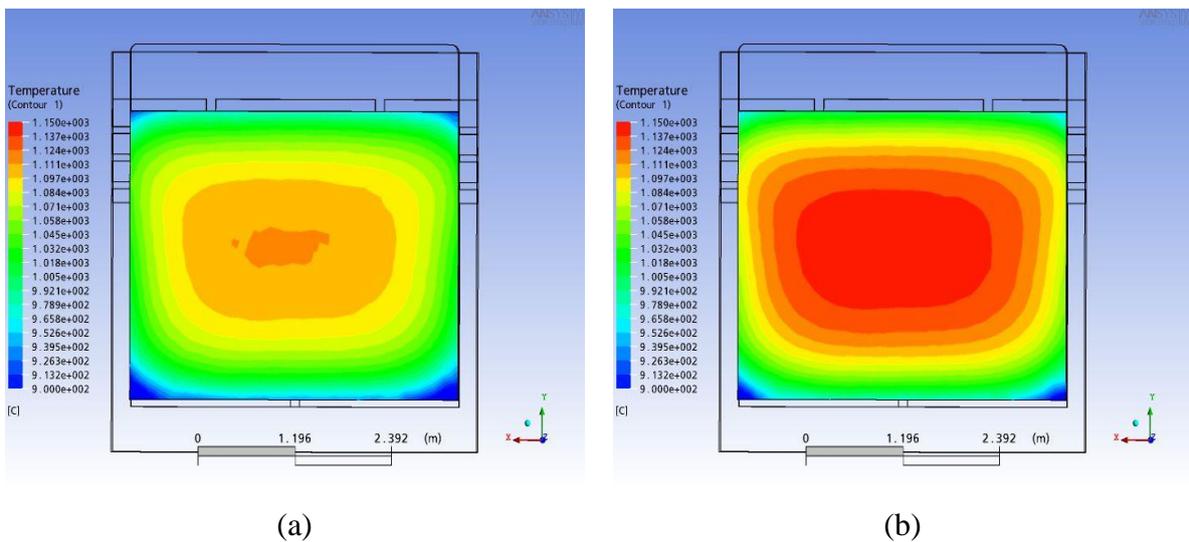


Figura 26 – Perfil de temperatura no anodo para o 5º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h.

A partir da Figura 22 percebe-se que, inicialmente, o aquecimento é mais proeminente na saída; a partir do 2º estágio, Figura 23, o perfil de temperatura assume a forma tradicional de apresentar maiores valores na região central. Dessa forma, do 2º ao 7º estágio a distribuição de temperatura é bem semelhante para as duas situações. Entretanto, as Figuras 22 a 28 (“a” e “b”) mostram que o aumento de 4 h causa uma diferença razoável na diferença de temperatura ΔT (máxima e mínima) alcançada em todo o anodo.

A maior ΔT observada na Figura 28, quando comparada com os dados reais, deve-se também à posição onde os dados reais são medidos.

Para cada estágio o tempo computacional variou de 4 a 5 h de processamento, em uma máquina Intel Core2 Duo com 2 GB de memória RAM.

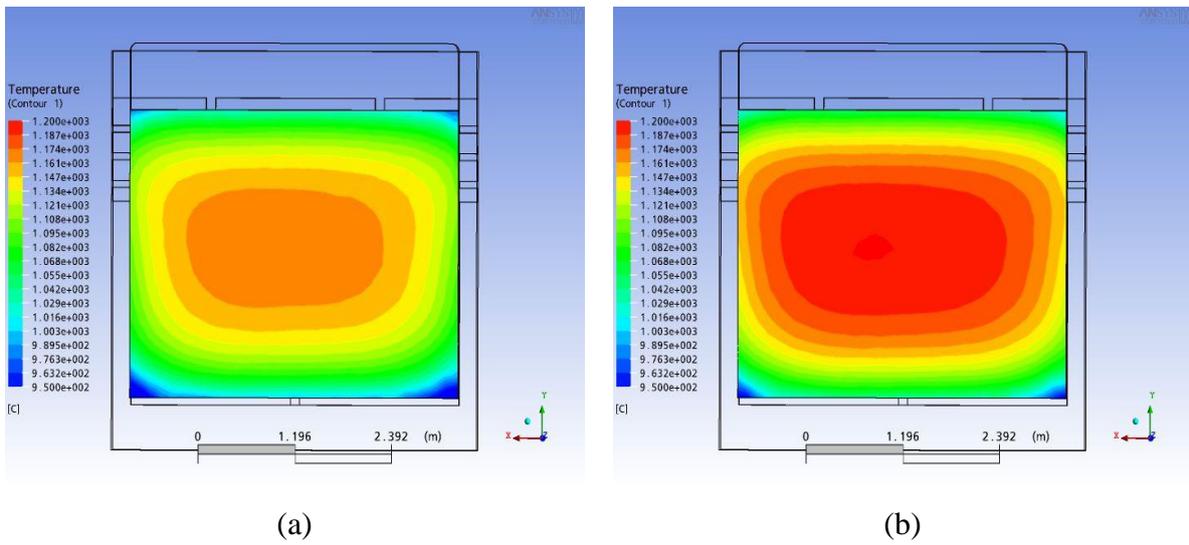


Figura 27 – Perfil de temperatura no anodo para o 6º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h.

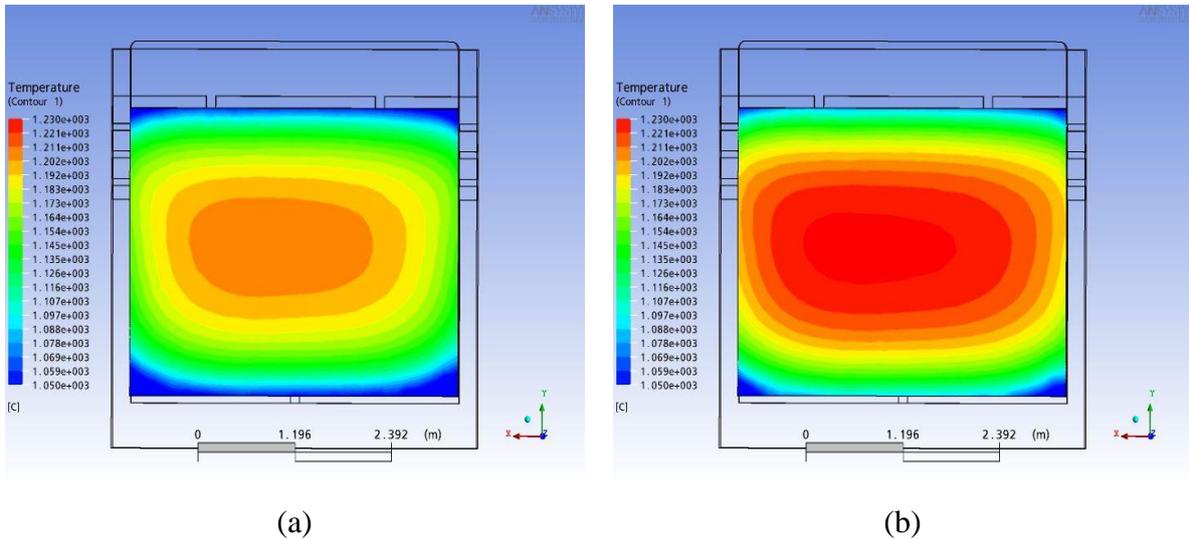


Figura 28 – Perfil de temperatura no anodo para o 7º estágio: a) ciclo de 20 h e b) ciclo de 24 h.

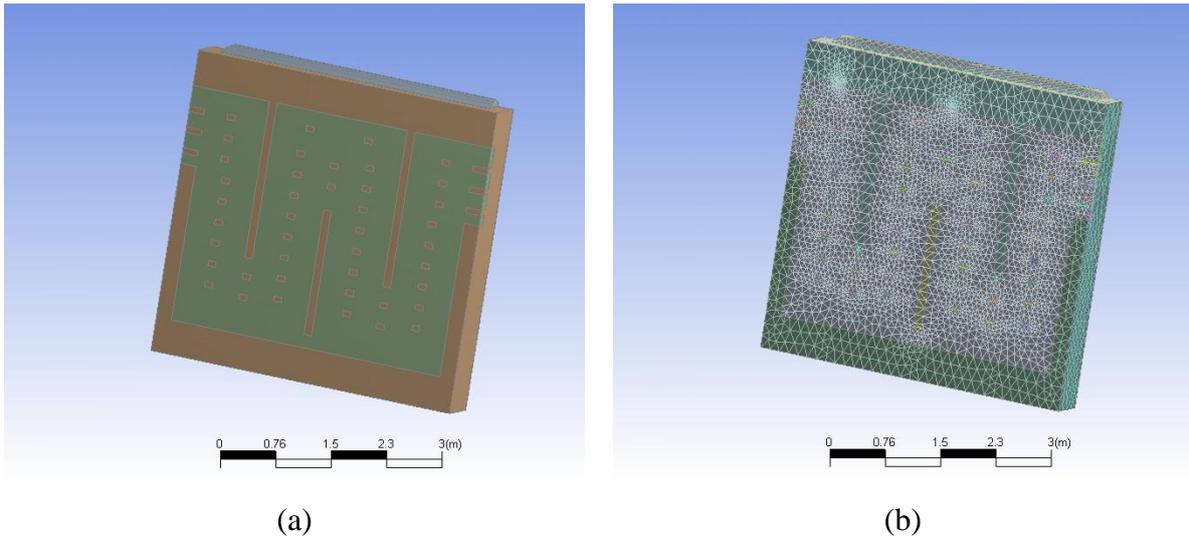


Figura 29 – Geometria com malha numérica usada para obtenção dos resultados apresentados nas Figuras 22 a 28.

A Figura 30 apresenta o perfil de temperatura no regime estacionário para o 7º estágio. Comparando-se as Figuras 28b e 30 (escalas iguais) percebe-se que na saída do 7º estágio o estado estacionário ainda não foi alcançado. Ou seja, é provável que em nenhum estágio o estado estacionário seja alcançado.

Em função dos resultados da Figura 19, torna-se interessante testar o cozimento com apenas 03 aquecimentos, considerando um tempo de 26 h (ou mais). Outro teste a ser realizado é o efeito do aumento da temperatura e/ou vazão do gás.

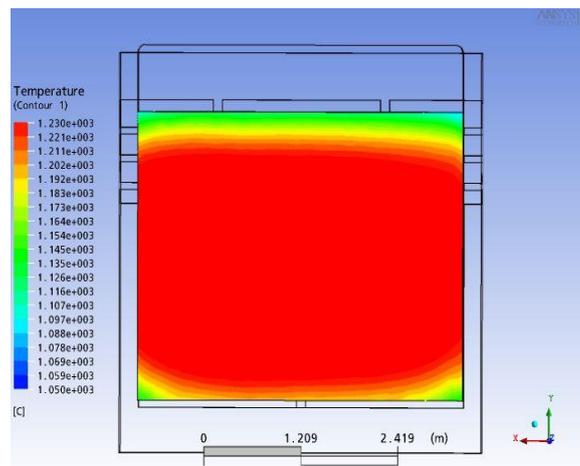


Figura 30 – Perfil de temperatura no anodo para o 7º estágio: estado estacionário.

9. Conclusões

1. A geometria tem importância fundamental na obtenção de perfis de temperatura mais uniformes;
2. A presença de tijolos internos torna mais uniforme a distribuição de temperatura;
3. A perda de calor pelas bordas inferior e superior é o principal responsável pelo surgimento de gradientes de temperaturas mais elevados;
4. O modelo fluidodinâmico em regime estacionário pode ser usado para prever a distribuição de temperatura de acordo com:
 - A geometria da câmara;
 - A vazão e a temperatura do combustível;
 - A vazão e a temperatura do ar;
 - A perda de calor pelas bordas inferior e superior;
5. O modelo fluidodinâmico em regime transiente pode ser usado para prever a distribuição de temperatura em função do número de estágios e do tempo de cada estágio.

10. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Introdução de geometria mais complexa (por exemplo a geometria real do Forno #3)
- Introdução da reação química de combustão como fonte de energia
- Vazão correta de injeção de combustível
 - Pressão
 - Geometria do bico
 - Mistura de materiais (diesel x vapor)
- Regime transiente considerando todas as etapas inclusive resfriamento (estudar o efeito do tempo – ciclo de cozimento)
- Perdas por convecção pelo topo (calculadas)
- Perdas num meio semi-infinito na base
- Perdas na cabeceiras (ao invés de adiabático)
- Considerar coque fluido no pogo
- Considerar bolhas de ar entre parede e anodo
- Calcular energia necessária para reação do anodo (consumo para o cozimento)
- Estudar perfil dos gases de combustão (concentração de oxigênio e resíduos de combustão)

11. Bibliografia

Sulger, Peter; TECHNICAL REPORT FOR ALUMAR, RD Carbon, Suíça – 2005

Perruchoud, Raymond; PROCESS OPTIMIZATION IN BAKE FURNACE, Light Metals 2007

Gendre, Magali; A BREAKTHROUGH IN ANODE BAKING FURNACE FLUEWALL DESIGN, Light Metals 2007

Severo, Dagoberto; ADVANCED 3D MODELLING FOR ANODE BAKING FURNACES, Light Metals 2005

Batista, Eliezer S.; AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE ALIMENTAÇÃO DE ALUMINA NA ALUMAR, Monografia de Graduação, Volta Redonda, 1997

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)