



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE



FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

ESTÁGIO LABORAL

TEMA:

**IMPACTO DAS REACÇÕES DE OXIDAÇÃO PARASÍTICA NO
CONSUMO DO ÂNODO DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE
ALUMÍNIO**



Autor: Massinguil, Juvêncio Armando Fabião

Maputo, Agosto 2014



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE



FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

ESTÁGIO LABORAL

TEMA:

**IMPACTO DAS REACÇÕES DE OXIDAÇÃO PARASÍTICA NO
CONSUMO DO ÂNODO DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE
ALUMÍNIO**

Autor: Massinguil, Juvêncio Armando Fabião

Supervisora: Prof. Doutora. Tatiana Kuleshova

Co-Supervisor: Eng^o Felizardo Bouene

Maputo, Agosto 2014

DEDICATÓRIA

Ao Senhor meu Deus

Pela vida, saúde e protecção durante a minha formação.

Aos meus Pais

Anita Pedro Sambo e Armando Fabião Massinguil que sempre estiveram presentes nas minhas realizações, desde os primeiros anos da minha escolaridade e durante todo o meu percurso académico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pai todo-poderoso pela vida, protecção e presença nos momentos difíceis, nas decisões e na escolha das melhores opções, nas oportunidades e nos desafios da vida.

Agradeço aos meus pais Anita Pedro e Armando Fabião Massinguil pelo carinho, força e apoio durante os meus estudos. Endereço especiais agradecimentos a todos meus irmãos e a família Sebastião Pernal pela força, carinho e estima durante a minha formação.

Agradeço a minha Supervisora **Prof. Doutora Tatiana Kuleshova** pela atenção, paciência nos ensinamentos que vem dando desde o tempo de carteira até a realização deste trabalho.

Ao Co-supervisor Eng.º Felizardo Bouene pela disponibilidade prestada durante a realização deste trabalho. Ao superintendente do Departamento de Redução Rajan Pillay pela motivação e elaboração deste tema, ao Eng.º Yusuke Tsuji do Departamento de Carbono pela ajuda na pesagem e medições geométricas, Ao Prof. Doutor Pedro Massinga, pela contribuição, motivação durante elaboração do trabalho. A **Prof. Doutora Fung Dai Kin** pela revisão e correcção do trabalho.

A Mozal pela oportunidade de estágio e apoio financeiro. A todos os meus colegas do Departamento de Redução, Carbono, e Laboratório pela amizade que dispensaram bem como pela simpatia e apoio que tanto contribui para um bom ambiente de trabalho.

A todos meus colegas do curso em especial Vasco Cossa, dra. Nilza Marinela, dra. Suraya Morade, Jaime Macome, Portásio Joaquim, e a todos meus colegas da Residência Universitária em especial Aldino Afonso Jovo, Mário Filipe Muabsa.

O meu agradecimento especial vai para minha colega a dra. Alda Saíde pela amizade, força e ajuda que tem dado desde o tempo de carteira até ao estágio na Mozal. A Cristina Chichava pela companhia e carinho durante a minha formação.

A todos aqueles que de algum modo contribuíram durante a minha formação e não foram referidos, o meu muito obrigado.

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **Juvêncio Armando Fabião Massinguil**, declaro por minha honra que o presente trabalho de licenciatura foi concebido no Departamento de Química, e desenvolvido como Estágio Laboral por mim, com uso dos recursos que se encontram referenciados no trabalho, para além da orientação dada pela supervisora.

Maputo, Agosto de 2014

(Juvêncio Armando Fabião Massinguil)

RESUMO

No presente trabalho, um estudo foi feito no sentido de dar uma contribuição na indústria de alumínios de Moçambique (Mozal), sobre o impacto das reacções de oxidação parasítica no consumo do ânodo, uma vez que a fábrica tem verificado um consumo em excesso do ânodo de carbono em relação ao esperado na produção de alumínio. O estudo baseou-se na investigação das condições de ocorrência de duas principais reacções que contribuem no consumo do ânodo de carbono, a primeira é a reacção de oxidação com oxigénio do ar, que ocorre na superfície do ânodo quando exposto ao ar durante a operação da célula electrolítica. O grau desta reacção pode ser minimizado ou eliminado através da protecção dada ao ânodo na célula electrolítica através da cobertura por uma mistura de alumina e banho electrolítico solidificado. A segunda é a reacção de oxidação com dióxido de carbono que ocorre imediatamente acima da separação electroquímica (superfície do banho e do ânodo), e o grau desta reacção dependerá da facilidade com que o dióxido de carbono flui através dos poros do ânodo, da permeabilidade do ar como medida do fluxo do gás e da pressão hidráulica gerada pelo banho. A Metodologia do trabalho foi baseada na análise da literatura disponível sobre o assunto, uma revisão e sistematização das informações colectadas, realização dos ensaios tecnológicos e análise e discussão dos resultados de estudo. Durante os ensaios tecnológicos foi feito o controlo de cobertura dos ânodos, que tem um papel importante na minimização do efeito dessas reacções, que contribuem no aumento do carbono total consumido por tonelada de alumínio “net carbon”, nos parâmetros operacionais de controlo como o peso, espessura, *under pin* dos ânodos gastos, teor de ferro devido a exposição dos pinos ao banho electrolítico contaminando o metal, e nos parâmetros de controlo do processo (temperatura do banho electrolítico, altura do banho electrolítico). No trabalho foram obtidos os resultados de medição de cada parâmetro mencionado em determinados períodos nas células electrolíticas em estudo. Em relação a quantidade de carbono consumido em excesso, os resultados obtidos foram satisfatórios para as células electrolíticas com cobertura melhorada. Os resultados deste trabalho permitem alertar sobre o efeito da deficiência de cobertura dos ânodos na qualidade do metal e na quantidade do carbono consumido de modo a melhorar os procedimentos das operações de cobertura e de produção dos ânodos.

GLOSSÁRIO DE ABREVIATURAS

MOZAL: Moçambique Alumínios,

AP35: Tecnologia “Aluminium Pechiney,”

EDM: Electricidade De Moçambique

MOTRACO: Mozambique Transmission Company,

SEB: Swaziland Electricity Board,

EDM: Electricidade de Moçambique,

ESCOM: Electricity Supply Commission,

kw/h : Quilo watts por hora,

Pote: Célula electrolítica, dentro da qual ocorre o processo de electrólise de alumina,

A.B: Altura do Banho,

C080: Designação/localização do pote na linha de produção. Significa que o pote C080 localiza-se no potroom C, número 80. C079, C081 respectivamente,

BPO ou **BOP:** Boas Práticas de Produção,

Stem: haste do ânodo

Clad: liga bimetálica (alumínio e ferro) usada para assegurar o stem ao hexápode,

CTF: Centro de Tratamento de fumos,

APTV: (*Anode Palet Transport Vehicle*), Veiculo de Transporte de Paletas de Ânodos,

ΔG° : variação de energia de Gibbs,

AMD: Anode Metal Distance

Butt: designação dada ao ânodo gasto depois do seu tempo de vida na célula electrolítica.

Net carbon: Quantidade de carbono consumido por tonelada de alumínio (kg de C/ t de Al),

ppm: partes por milhão

PTA: Pot Tending Assembly

PML: Portable Measurement Logger

ISO: International Standard Organizational

UEM: Universidade Eduardo Mondlane

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
DECLARAÇÃO DE HONRA.....	iii
RESUMO.....	iv
GLOSSÁRIO DE ABREVIATURAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABELAS.....	ix
ÍNDICE DOS ANEXOS.....	x
Capítulo I. INTRODUÇÃO	1
1.1. Problema.....	2
1.2. Objectivos.....	3
1.2.1. Geral.....	3
1.2.2. Específicos	3
1.3. Justificação da escolha do tema	3
1.4. Metodologia do trabalho	4
1.5. Limitações do trabalho	5
Capítulo II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. História do alumínio.....	6
2.2. Matéria-prima para a produção de alumínio	6
2.3. Processo de produção de alumínio	8
2.3.1. Processo de Bayer	8
2.3.2. Processo Hall-Heroult.....	10

2.4.	Propriedades físicas e químicas do alumínio	15
2.5.	Aplicação de alumínio	16
2.6.	Processo de produção de ânodos de carbono	16
2.7.	Reações de oxidação parasítica do ânodo de carbono	19
2.7.1.	Mecanismos do consumo do ânodo.....	19
2.8.	Efeito anódico	21
2.9.	Parâmetros de qualidade dos ânodos	22
2.9.1.	Efeito catalítico de sódio e vanádio nas reações parasíticas	22
Capítulo III. TRABALHO DO CAMPO		24
3.1.	Descrição do local de estudo.....	24
3.2.	Troca de ânodos	25
3.3.	Cobertura de ânodos.....	27
Capítulo IV. EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS USADOS PARA ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....		34
4.1.	Procedimento geral dos ensaios tecnológicos	34
4.2.	Equipamentos	36
4.3.	Procedimentos da experiência	38
Capítulo V. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....		45
Capítulo VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		60
6.1	CONCLUSÕES.....	60
6.2	RECOMENDAÇÕES	61
BIBLIOGRAFIA.....		62
ANEXOS		I

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localização da Monçanbique alumínios.	1
Figura 2. Matéria-prima usada na produção de 1 tonelada de alumínio primário.	6
Figura 3. Etapas de produção de alumínio.	8
Figura 4. Fluxograma e esquema do processo de Bayer.	8
Figura 5. Sistema liquido bifásico formado pelo banho eletrolítico e alumina.	11
Figura 6. Esquema que ilustra uma célula electrolítica com ânodo pré-cozido.	12
Figura 7. Disposição das células electrolíticas conectadas em série	13
Figura 8. Diagrama de fases criolite/ fluoreto de alumínio	14
Figura 9. Imagem de ânodo de carbono.	17
Figura 10. Esquema dos fornos de cozimento dos ânodos..	18
Figura 11. Pinos e stem de uma assembleia de ânodos.	18
Figura 12. Esquema dos mecanismos do consumo do ânodo.	19
Figura 13. Esquema da oxidação preferencial do oxigénio do ar.	21
Figura 14. Esquema da formação dos gases do efeito anódico.	22
Figura 15. Gráfico do efeito catalítico do sódio sobre as reacções parasíticas.	23
Figura 16. Departamento de Redução.	24
Figura 17. Disposição dos ânodos na célula electrolítica conforme o seu tempo de vida.	26
Figura 18. Gráfico da dependência entre temperatura, resistência e fluxo de corrente do ânodo em função do tempo.	26
Figura 19. Material de cobertura a ser depositado na superfície do ânodo.	27
Figura 20. Formação da incrustação em volta do ânodo 4 horas depois da troca.	28
Figura 21. Formação de lama de alumina e ataque dos pinos devido ao baixo e alto nível do banho.	29
Figura 22. Esquema ilustrativa para o cálculo do net carbon.	31
Figura 23. PTA - " <i>Pot tending assembly</i> "	36
Figura 24. Equipamentos usados na medição da temperatura do banho.	37
Figura 25. Equipamentos usados na medição da altura do banho e do nível do metal.	37
Figura 26. Equipamentos usados na medição da espessura.	38
Figura 27. Processo de troca de ânodos e limpeza da cavidade.	39
Figura 28. Cobertura do ânodo.	40

Figura 29 Sequência da limpeza dos ânodos consumidos.	42
Figura 30. Integridade da cobertura dos ânodos no pote de referência	45
Figura 31. Integridade da cobertura dos ânodos nos potes de teste	46
Figura 32. Efeito do excesso de cobertura dos ânodos.	47
Figura 33. Imagem que ilustra o impacto do atraso na cobertura dos ânodos.	47
Figura 34. Impacto dos movimentos operacionais na cobertura dos ânodos e consequente oxidação por reacções parasíticas.	48
Figura 35. Ânodos com cobertura adequada	48
Figura 36. Gráfico de variação da altura do banho.	49
Figura 37. Gráfico que representa a variação da temperatura do banho	50
Figura 38. Gráfico de variação do teor de ferro	51
Figura 39. Gráfico do impacto da oxidação no peso dos ânodos gastos.....	52
Figura 40. Impacto da oxidação no peso do ânodo gasto.	52
Figura 41. Gráfico do impacto da oxidação do carbono na espessura dos ânodos gastos.....	53
Figura 42. Impacto da oxidação de carbono na espessura dos ânodos.	53
Figura 43. Impacto da oxidação do ar no underpin.	54
Figura 44. Gráfico do impacto da oxidação do ar no underpin dos ânodos removidos.....	54
Figura 45. Gráfico da quantidade de carbono consumido por tonelada de alumínio	55
Figura 46. Gráfico do impacto das reacções parasíticas no consumo do ânodo.....	56
Figura 47. Gráfico da contribuição das reacções parasíticas no consumo total do ânodo.....	57
Figura 48. Gráfico que representa o comportamento da reactividade do ânodo de carbono oxigénio do ar	57
Figura 49. Gráfico do comportamento do teor de vanádio no ânodo de carbono	58
Figura 50. Gráfico do comportamento da reactividade do ânodo de carbono com dióxido de carbono	58
Figura 51. Gráfico que representa o comportamento do teor de sódio no ânodo de carbono	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Impacto dos aditivos no banho electrolítico	15
-------------------------------------------------------------	----

ÍNDICE DOS ANEXOS

ANEXO I

1. Tabela A - Resultados obtidos na pesagem dos ânodos gastos.	II
2. Tabela B - Resultados da quantidade do metal produzido por pote.	III
3. Tabela C - Resultados obtidos na medição da espessura e cálculo do underpin	III
4. Tabela D- Resultados do cálculo do net carbon e quantidade carbono consumido por oxidação com dióxido de carbono.....	IV
5. Tabela E - Resultados do cálculo do net carbon e quantidade de carbono consumido por oxidação com oxigénio do ar.	IV

ANEXO II

6. Tabela A - Resultados dos parâmetros de controlo do pote (C080) - 27 dias antes do melhoramento da cobertura.....	VI
7. Tabela B- Resultados dos parâmetros de controlo do pote (C080) - 27 dias durante o melhoramento da cobertura.....	VII
8. Tabela C - Resultados dos parâmetros de controlo do pote (C080) - 27 dias depois do melhoramento da cobertura.....	VIII
9. Tabela D - Resultados dos parâmetros de controlo do pote (C081) - 27 dias antes do melhoramento da cobertura.....	IX
10. Tabela E - Resultados dos parâmetros de controlo do pote (C081) - 27 dias durante o melhoramento da cobertura.....	X
11. Tabela F- Resultados dos parâmetros de controlo do pote C081- 27 dias depois do melhoramento da cobertura.....	XI

ANEXO III

12. Tabela A - Resultados da determinação dos teores de Na, Ve da reactividade do ânodo com CO ₂ e O ₂	XII
13. Tabela B- Limites aceitáveis dos parâmetros de qualidade do ânodo segundo as normas ISO	XIII
14. Esquema da determinação da reactividade do ânodo com oxigénio e CO ₂	XIV

Capítulo I. INTRODUÇÃO

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre depois do oxigénio e do silício, ocorrendo a um teor de 7.3% em massa. Devido a sua reactividade química, ele nunca se encontra na natureza na sua forma pura, encontra-se associado sob a forma de óxido livre combinado com água ou outros compostos. O mineral mais importante para se extrair o alumínio é a bauxite, a qual contém alumina (óxido de alumínio) separada das impurezas pelo processo de Bayer e submetida a uma electrólise ígnea pelo processo de Hall-Heroult.

A produção mundial de alumínio metálico primário gira em torno de 34 milhões de toneladas por ano enquanto a produção em Moçambique pela Mozal é de 570 mil toneladas por ano (Gusbert 2007, citado por Chitaca, 2012).

A Moçambique alumínios (Mozal) é ma empresa de fundição de alumínio primário localizada na Província de Maputo, Distrito de Boane, no Parque Industrial de Beluluane, a 20 km da Cidade de Maputo (figura 1). A Mozal é uma empresa multinacional do grupo BHP Billiton (com 47% das acções), com participação dos grupos Mitsubishi Corporation (25%), Industrial Development Corporation of South Africa Limited (24%) e o Governo Moçambicano com 4% das acções.

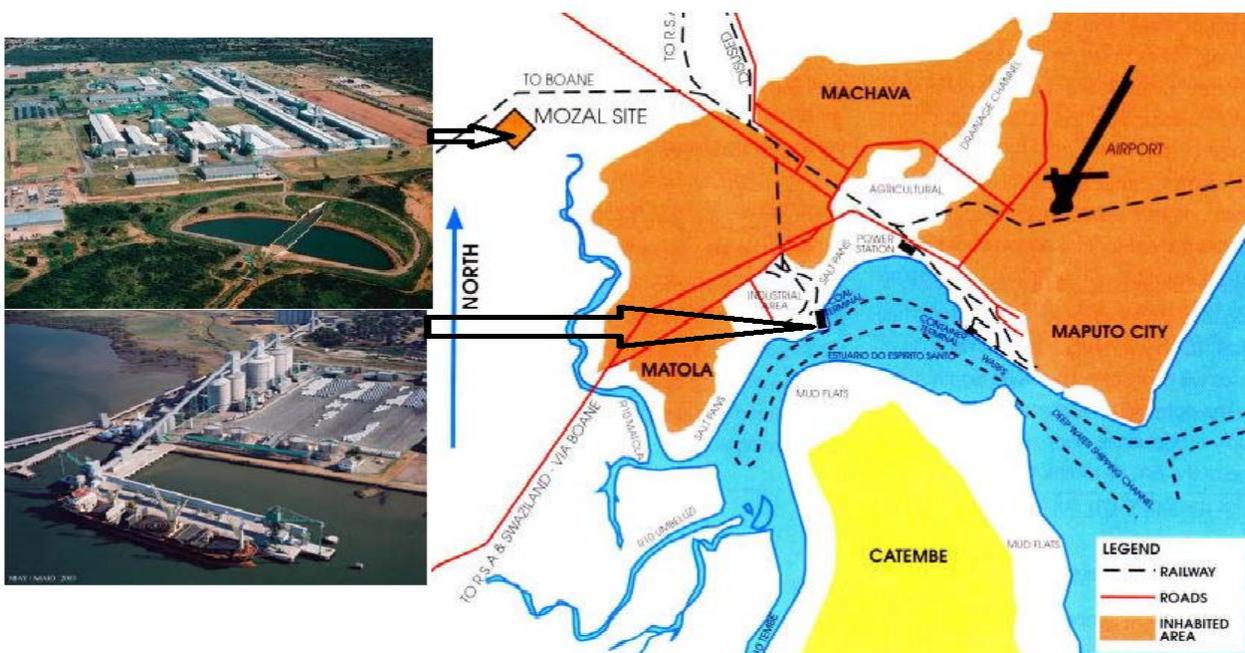


Figura 1. Localização da Moçambique alumínios (Fonte Mozal).

O processo de Hall-Heroult é o único método correntemente usado na produção industrial do alumínio primário. Neste processo o alumínio é produzido em células electrolíticas nas quais a alumina (Al_2O_3) é alimentada e dissolvida em criolite fundida (Na_3AlF_6) a uma temperatura de 960°C . O alumínio fundido é depositado no fundo da célula na superfície do bloco catódico de carbono, enquanto os iões de oxigénio libertados a partir da dissociação da alumina, reagem com os blocos de carbono, gerando dióxido de carbono (CO_2).

O ânodo de carbono é um bloco produzido através de uma mistura de coque de petróleo, alcatrão de carvão e ânodos velhos reciclados. O seu tempo de vida na célula electrolítica é de 27 dias e durante este tempo, espera-se que a quantidade total do carbono consumido participe na reacção electroquímica de obtenção de alumínio. Observações práticas dos ânodos removidos das células electrolíticas revelam que existem reacções que contribuem no consumo do ânodo de carbono, não usado para obtenção de alumínio, designadas *reacções de oxidação parasítica*.

As medições geométricas e variações dos pesos dos ânodos removidos das células em função da idade, fornecem medidas aproximadas da importância relativa dessas reacções no consumo total de carbono. Dado que o processo de produção de alumínio consome grandes quantidades de carbono, é importante garantir que não haja ocorrência de reacções de consumo de carbono que se oponham a formação do produto de interesse, pois tornaria o processo oneroso.

É nessa base que no presente trabalho foi escolhido o tema de avaliar o impacto das reacções parasíticas no consumo total do ânodo de carbono, em condições melhoradas e de deficiência de cobertura dos ânodos.

1.1. PROBLEMA

O Departamento de Redução da Mozal está a verificar que o ânodo de carbono é consumido em excesso em relação a quantidade de consumo teoricamente esperada e usada nos últimos tempos de produção da fábrica, nas mesmas condições de operação. Assim, neste estudo pretende-se avaliar o impacto das reacções parasíticas no consumo total do ânodo de carbono em condições melhoradas de cobertura em comparação com cobertura convencional dos ânodos.

Deste modo é importante compreender os mecanismos de diversas reacções que contribuem no consumo do carbono, que não participa na reacção electroquímica de obtenção de alumínio.

Pergunta de pesquisa

- ✓ Será que o consumo do ânodo em excesso é devido qualidade das operações de cobertura durante o processo electroquímico de produção de alumínio ou qualidade de produção do ânodo?
- ✓ Será que a cobertura não adequada dos ânodos resulta no incremento da quantidade de carbono consumido por tonelada de alumínio (net carbon)?

Mais especificamente pretende-se analisar o que acontece com o nível de consumo do ânodo nas seguintes situações:

- O que acontece quando há atrasos na cobertura do ânodo,
- O que acontece quando a cobertura não é adequada.
- O que acontece com o grau de reactividade do ânodo com oxigénio e CO₂ quando o teor de sódio e vanádio é elevado, sendo estes os principais catalisadores das reacções.

Para o efeito foram traçados os seguintes objectivos:

1.2. OBJECTIVOS

1.2.1. Geral

- ✓ Avaliar o impacto das reacções de oxidação parasítica no consumo do ânodo de carbono.

1.2.2. Específicos

1. Avaliar o efeito da deficiência de cobertura dos ânodos na oxidação por reacções parasíticas.
2. Determinar a quantidade de carbono consumido devido a oxidação parasítica por oxigénio do ar e dióxido de carbono em condições de cobertura melhoradas e convencionais.
3. Determinar o grau de reactividade do ânodo com dióxido de carbono, oxigénio do ar, e o teor de sódio, vanádio como catalisadores das reacções parasíticas.

1.3. JUSTIFICAÇÃO DA ESCOLHA DO TEMA

A razão da escolha do tema em estudo, deve-se fundamentalmente a possibilidade de poder compreender se o consumo em excesso do ânodo deve-se a oxidação por reacções parasíticas, e

que o grau dessas reacções, pode ser influenciada pela execução não adequada das operações de produção de alumínio. Deste modo a compreensão dos fundamentos teóricos e práticos do consumo do ânodo é uma importante guia para a fábrica, no melhoramento das operações de produção, no controlo de processos e melhoria da qualidade dos ânodos, num período em que a fábrica ambiciona ser o líder mundial na produção de alumínio primário e a baixos custos. Assim o trabalho busca compreender o impacto dessas reacções no carbono total consumido, em condições melhoradas de cobertura, comparando o consumo em ânodos com deficiência de cobertura, sendo o papel da cobertura de minimizar o potencial dessas reacções.

1.4. METODOLOGIA DO TRABALHO

Para o alcance dos objectivos deste trabalho recorreu-se a seguinte metodologia:

1.4.1. Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica consistiu na pesquisa, sistematização de informações relacionados com o processo de produção de alumínio, o impacto e os mecanismos das reacções de oxidação parasítica no consumo total do ânodo de carbono, impurezas nos ânodos como catalizadores dessas reacções, abordados em livros, artigos científicos, trabalhos de licenciatura, manuais de tecnologia de produção de alumínio, módulos de treinamento e de procedimentos operacionais da Mozal.

1.4.2. Parte experimental

A parte experimental obedeceu a seguinte ordem:

- Amostragem: que consistiu na escolha das células eletrolíticas e identificação dos ânodos.
- Medição dos parâmetros de controlo do processo (temperatura do banho electrolítico, altura do banho electrolítico, teor de ferro) 27 dias antes, durante e depois do experimento. A razão da escolha do periodo de 27 dias, esta relacionado com o tempo de permanência do ânodo na célula electrolitica, pois durante este período o ânodo é consumido quase na sua totalidade.
- Verificação do grau de reactividade do ânodo num ambiente de gases, determinação do teor de sódio e vanádio como impurezas que catalisam as reacções parasíticas.

- Troca dos ânodos anteriores em ânodos novos nas células electrolíticas e melhoramento das práticas de cobertura.
- Pesagem, medições geométricas dos ânodos gastos removidos das células electrolíticas e cálculos da quantidade de carbono consumido por reacções parasíticas.

1.4.3. Resultados, sua análise e discussão

Baseou-se na:

- Apresentação dos resultados na forma de gráficos.
- Discussão e interpretação dos resultados.

1.4.4. Elaboração do relatório

O relatório engloba a informação obtida da revisão bibliográfica sobre o tema em estudo, problema de estudo, justificação da escolha do tema, e os procedimentos seguidos na execução da experiência até apresentação e discussão dos resultados, respeitando o regulamento dos trabalhos de licenciatura do Departamento de Química da UEM.

1.5. Limitações do trabalho

A maior limitação do trabalho relaciona-se com o tamanho da amostra. Previa-se analisar uma amostra significativa em relação ao número total de células electrolíticas nas duas linhas de produção, mas devido a complexidade das operações feitas durante a produção escolheu-se 3 células electrolíticas e pesou-se 7 assenbleias de ânodos correspondententes a 14 blocos de carbono por cada pote de estudo, para não interferir nas operações normais de produção nos Departamentos envolvidos no estudo. As razões que condicionaram a escolha de um número reduzido de potes e conseqüente menor número de ânodos estudados são as seguintes:

As células de teste passaram a ter tratamentos e cuidados especiais em relação aos outros potes da linha de potes "*potline*", e isto perturbava o cronograma das actividades planeadas em cada dia.

O processamento dos ânodos gastos (butts) para reciclagem é feita no Departamento de Carbono de forma contínua, onde os butts são processados em série, a paralisação de um butt por medir e pesar, implica parar todo sistema de processamento, isto retarda o processo de reciclagem, aumentando os custos de produção.

Capítulo II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. História do alumínio

A primeira publicação do alumínio metálico foi em trabalhos colectivos do primeiro autor do Centenário Romano, Gaius Plinius. Em 1825, o Físico alemão H.C. Ørsted conseguiu produzir alguns miligramas do alumínio metálico por redução térmica do cloreto de alumínio com amálgama de potássio, mas com o inconveniente desta ser cara (Grjotheim, 1993 citado por Fotine, 2000). A alumina é insolúvel em muitos solventes contudo a criolite mostrou-se possuir propriedades necessárias para o processo electrolítico como um bom solvente para a alumina. A electrólise do sistema criolite-alumina foi patenteada de uma forma independente em 1886 por Paul T. Heroult na França e Charles Martin Hall nos Estados Unidos da América.

A produção comercial e mais barata do alumínio metálico teve início no ano de 1889, com a dissolução do óxido de alumínio (Al_2O_3) em criolita fundida a 975°C , desta forma surgiu o processo de produção industrial de alumínio conhecido como processo de Hall-Heroult e é actualmente o único método de obtenção industrial de alumínio com elevados rendimentos. Nascendo assim, o processo actualmente usado na Mozal para a produção do alumínio (Grjotheim, 1988 citado por Fotine, 2000).

2.2. Matéria-prima para a produção de alumínio

As matérias-primas necessárias para a produção de alumínio apresentadas na figura 2, são a alumina, a electricidade, os ânodos de carbono produzidos na base de coque de petróleo e alcatrão de carvão, os produtos fluorinados (AlF_3 e CaF_2) e banho electrolítico (Criolita) (Cowie, 1988).

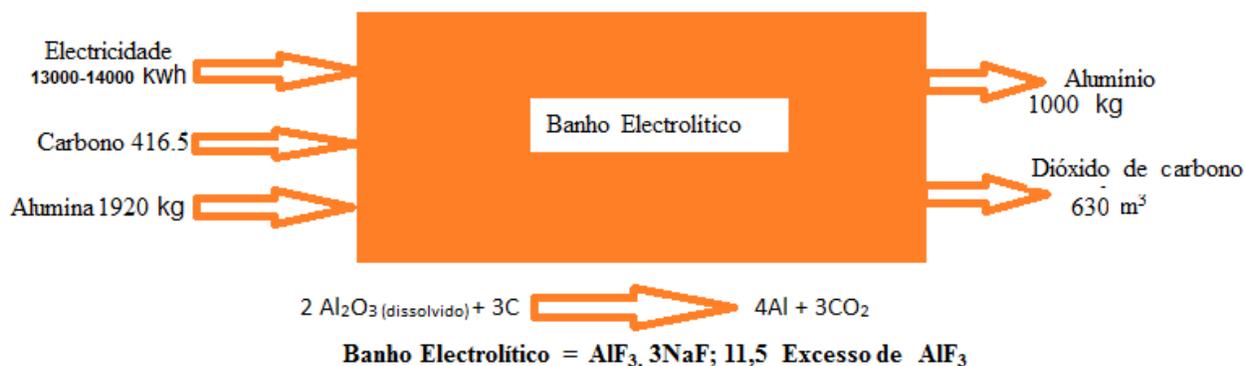


Figura 2. Matéria-prima usada na produção de 1 tonelada de alumínio primário.

2.2.1 Coque de petróleo

O coque é obtido da calcinação do material residual da refinação do petróleo, existem instituições especializadas no processo de refinação de entre elas a REYNOLDS e CII (Americanas), que são as fornecedoras do coque usado para a produção do alumínio na Mozal. Para a produção são necessários cerca de 184 000 toneladas de coque de petróleo por ano. O coque é usado na manufactura dos ânodos de carbono (Maurienne, 1997 citado por Fotine, 2000).

2.2.1 Alcatrão de carvão

O alcatrão de carvão é um produto de destilação a vácuo do alcatrão obtido da destilação do carvão mineral. Ele é importado da República da África do Sul e é produzido pela SUPRACHEM. Cerca de 44 000 toneladas de alcatrão de carvão são fornecidos a Mozal em cada ano. O alcatrão de carvão é usado na produção dos ânodos para manter juntas as partículas do coque (MAURIENNE, 1997 citado por Fotine, 2000).

2.2.2 Produtos fluorinados

Os produtos fluorinados incluem a criolite, trifluoreto de alumínio e o fluoreto de cálcio. Estes produtos são fornecidos pela FLUOROSIDSPA, uma empresa italiana que fornece a Mozal cerca de 800 toneladas por ano (Cowie, 1988).

2.2.3 Electricidade

O processo da electrólise requer muita quantidade de corrente, para a satisfação desta necessidade eléctrica foi formada uma nova empresa, MOTRACO, um consórcio entre a ESCOM, EDM e SEB. A MOTRACO fornece corrente eléctrica alternada à Mozal, e esta por sua vez, através da sua subestação transforma a corrente alternada em corrente contínua de (aproximadamente 360 kA para a linha 1-Mozal I e 355.5 kA para a linha 2-Mozal II e uma voltagem de cerca de 1240V) (Cowie, 1988 citado por Macuacua, 2000).

2.2.4 Alumina

É a principal matéria-prima usada para a produção do alumínio, é obtida a partir do bauxite, pelo processo de Bayer. A bauxite é o mais importante minério de alumínio, contém cerca de 40 a 60% em massa de alumina combinada com pequenas quantidades de óxido de silício (1.5 a 3.0%), óxido de ferro (12 a 17%), e óxido de cálcio (<0.5%). A alumina é produzida pela

WORSLEY na Austrália e é importada por via marítima para Moçambique (Cowie, 1988 citado Macuacua, 2000).

2.3 Processo de produção de alumínio

O processo de produção de alumínio ocorre em duas etapas principais como demonstra a figura 3, a primeira conhecida como processo de Bayer, que consiste em produzir óxido de alumínio anidro a partir do minério de alumínio chamado bauxite, a segunda denominada redução (Processo de Hall-Heroult) que consiste em reduzir o óxido por electrólise fundida em células electrolíticas (Midea, 2009).

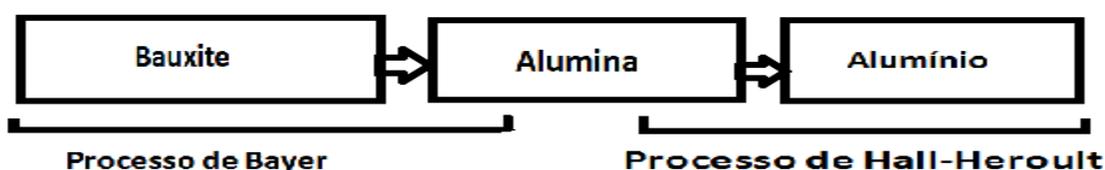


Figura 3. Etapas de produção de alumínio.

2.3.1 Processo de Bayer

O processo de Bayer, inventado por Friedrich Bayer em 1886, esquematicamente representado pela figura 4, é o principal e o mais económico método para produção de alumina a partir de bauxitos gibbsíticos com baixa percentagem de sílica, com a seguinte descrição geral do processo por etapa:

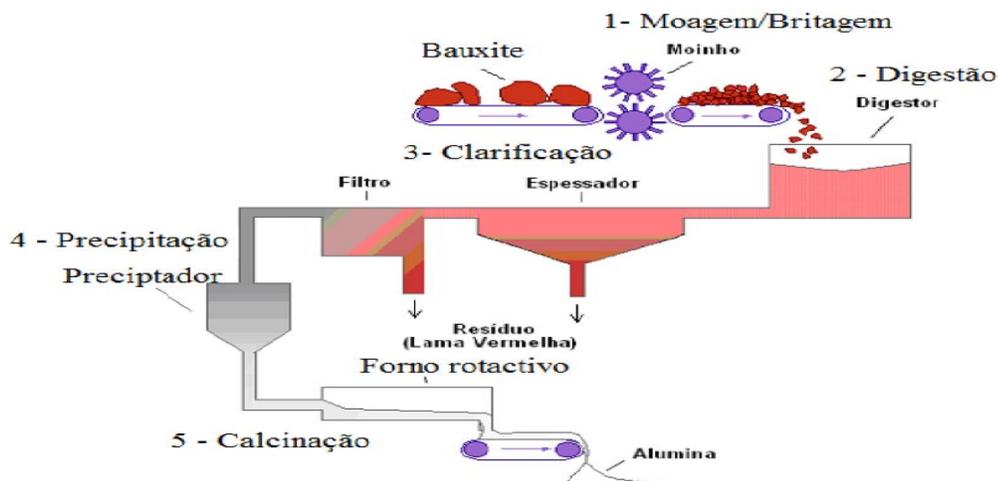
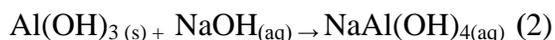
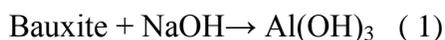


Figura 4. Fluxograma e esquema do processo de Bayer (adaptado WAO, citado por Chitaca 2012).

As etapas do processo são as seguintes:

1. Britagem/Moagem: consiste na redução controlada das dimensões das partículas de bauxite.
2. Digestão: é combinação do bauxite com soda cáustica em condições de alta pressão e temperatura (equação 1) resultando em uma solução de aluminato de sódio (equação 2) misturado com resíduos insolúveis de impurezas. Plantas modernas comumente operam em temperaturas entre 200 e 240°C e pressão em torno de 30 atm (WAO 2003, Filho 2007, citados por Chitaca, 2012).



3. Clarificação - é uma das etapas mais importantes do processo, nela ocorre a separação entre as fases sólidas (resíduo insolúvel) e líquida (licor). Normalmente as técnicas empregadas envolvem espessamento seguido de filtração. O espessamento é um processo de decantação, em que o resíduo proveniente da digestão é encaminhado para unidades denominadas de espessadores/lavadores. O objectivo destas unidades é adensar o resíduo, aumentando seu teor de sólidos, para recuperar a maior quantidade de NaOH possível e fornecer uma maior pressão para a filtragem. Nesta fase é comum a adição de polímeros (como hidroxamatos e poliacrilamida) para induzir a floculação das partículas nos espessadores ou até mesmo a utilização de processos de separação com membranas poliméricas (WAO 2003, Filho et al. 2007, citados por Chitaca, 2012).

4. Precipitação - onde a alumina é precipitado por um processo de cristalização (equação 3) da solução através de filtração e resfriamento,



A alumina cristalizada é encaminhada para calcinação e o licor residual contendo NaOH e alumina é reciclado para etapa de digestão.

5. Calcinação – é etapa final do processo, em que a alumina é lavada para remover qualquer resíduo do licor e posteriormente seca, a alumina é calcinada a aproximadamente 1000 °C (equação 4) para desidratar os cristais, formando cristais de alumina puros, de aspecto arenoso e branco (WAO 2003, Filho et al. 2007, citados por Chitaca, 2012).



2.3.2 Processo Hall Heroult

O alumínio é produzido pela redução electrolítica da alumina pelo processo de Hall-Heroult que consiste em uma electrólise ígnea de criolite fundida. O processo de Hall-Heroult é regido pela lei da electrólise de Faraday, pelo qual o alumínio é separado do oxigénio pela passagem da corrente eléctrica através do banho electrolítico contendo a alumina dissolvida. O processo de redução da alumina em alumínio realiza-se em grandes potes, isolados termicamente e geralmente chamadas de células electrolíticas (Do Prado 2008, Gusbert 2007 e Fotine 2000 Citados por Chitaca, 2012)

2.3.2.1 Tecnologias de Produção

São duas as tecnologias mais usadas nas células electrolíticas: as células “Soderberg” e as células de ânodos “pré-cozidos”, que se diferem basicamente pela concepção do ânodo.

As células Soderberg: usam ânodo único, fabricado a partir de pastas de pitch e coque de petróleo, o “cozimento” do material é feito na própria célula.

As **células de ânodos “pré-cozidos”** como mostra a figura 6, utilizam vários ânodos pré-formados, fabricados previamente em uma unidade fabril específica, os ânodos pré-cozidos têm que ser removidos a intervalos regulares, geralmente depois de aproximadamente 27 dias quando tiverem reagido cerca de um terço ou um quarto do seu tamanho original.

A tecnologia empregue para a fundição do alumínio na Mozal é a AP35 (ânodos pré-cozidos) da Aluminium Pechiney, uma indústria francesa reconhecida como uma das mais eficientes tecnologias de fundição de alumínio no mundo. Cada célula electrolítica suporta 20 ânodos pré-cozidos, isto significa que pelo menos um ânodo deve ser substituído por dia em cada célula. A vantagem das células com ânodos pré-cozidos é o consumo de carbono que chega a 400 kg/t Al contra 500 a 550 kg/t Al nos ânodos Soderberg (Do Prado, 2008 citado por Chitaca, 2012).

Processo de produção de alumínio na Mozal

O processo de produção de alumínio na Mozal inicia-se com a recepção da alumina já processada a partir da Austrália e submetida a uma electrólise, onde alumina é fluorinada no centro de tratamento de gases através de um processo de adsorção, e electrolisada num banho electrolítico na presença de fluoretos a 960 °C, com uma corrente directa de 360 kA.

Na célula electrolítica 20 ânodos são introduzidos no electrólito e o oxigénio da alumina é electricamente descarregado para o ânodo como um produto intermediário, contudo o oxigénio reage imediatamente com o carbono do ânodo e assim este é consumido gradualmente com a formação do dióxido de carbono.

O meio em que ocorre o processo é chamado de banho electrolítico, que é uma solução salina, contendo, na sua maioria, sal de criolite (Na_3AlF_6), fluoreto de cálcio (CaF_2) e fluoreto de alumínio (AlF_3). O banho electrolítico não é consumido durante o processo mas sofre algumas perdas devido a vaporização. Alumina fluorinada em pó (Al_2O_3) é adicionada periodicamente a esta solução enquanto o alumínio metálico decanta formando-se assim um sistema líquido bifásico, como mostra a figura 5, uma vez que o alumínio e banho são imiscíveis (Soares e Oliveira, 2010 citados por Chitaca, 2012).

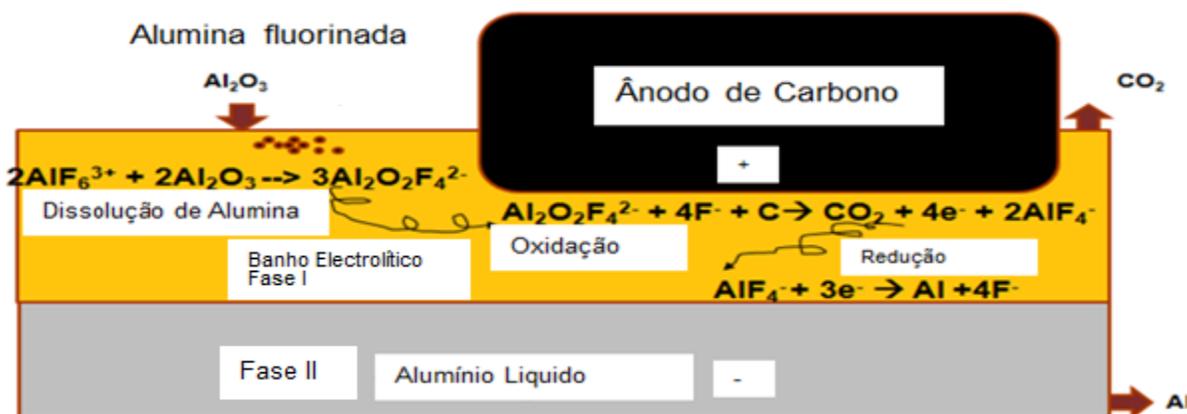
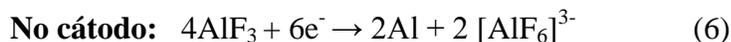
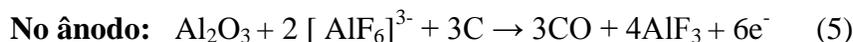


Figura 5. Sistema líquido bifásico formado pelo banho eletrolítico e alumina (Fonte Mozal).

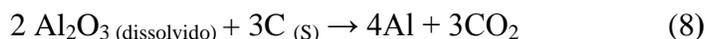
As reacções de electrólise podem ser resumidas da seguinte forma:



No ânodo também ocorre a reacção



A reacção Global pode ser representada pela equação



$\Delta G = 1980,92 \text{ kJ/mol}$, A energia livre de Gibbs na reacção acima foi calculada pela diferença das energias livres de Gibbs dos produtos e reagentes.

Célula electrolítica

Uma célula electrolítica é constituída por uma armação de aço, revestida com material refractário e uma cavidade revestida de blocos de carbono (cátodo), no qual constituem o reservatório do alumínio fundido e do banho electrolítico. A corrente eléctrica em forma de corrente contínua passa pelo banho electrolítico, entrando no pote através dos ânodos de carbono e conduzido para fora do pote, isto é, conduzido para outro pote através de barras de aço colectoras de corrente que estão fixas no cátodo no fundo do pote.

Cátodo

A parte inferior do corpo da célula electrolítica funciona como o cátodo do processo como demonstra a figura 6, além de ser o local onde ficam confinados o alumínio líquido produzido e o banho electrolítico, o cátodo é constituído por uma camada de carbono existente no fundo da célula na qual o alumínio fundido gradualmente é depositado. O cátodo consiste essencialmente de blocos de carbono pré-cozidos, feitos de antracite ou material semi-grafítico, ligados por barras de aço colectoras de corrente através de ferro fundido. Os tijolos refractários servem de isolamento entre a parte externa do cátodo feita de aço e os blocos de carbono. O isolamento térmico é cuidadosamente feito para dar um bom balanço de calor na célula para evitar um superaquecimento local e para obter um tempo de vida longo para o cátodo. O tempo de vida do cátodo varia entre 5 a 7 anos.

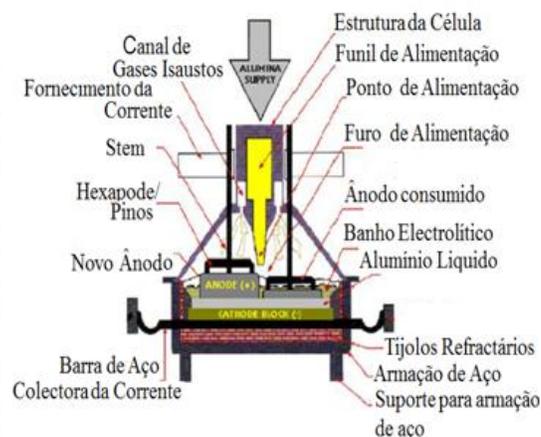


Figura 6. Célula electrolítica com ânodo pré-cozido (Fonte Mozal).

As células electrolíticas estão posicionadas em linhas longas, chamadas linhas de células ou linhas de potes "potline". As células são colocadas lado a lado de maneira a reduzir os efeitos magnéticos, são dispostas em série como demonstra a figura 7, onde a corrente contínua

proveniente da subestação entra dos ânodos e atravessa o banho electrolítico saindo do cátodo da célula para a célula seguinte.



Figura 7. Disposição das células electrolíticas conectadas em série - "Potline" (Fonte Mozal).

A alimentação nos potes por injeção da alumina é feita de forma contínua através de pontos de alimentação automáticos especiais. Esta é fornecida a partir de quatro funis e quatro alimentadores volumétricos acoplados aos funis em cada uma das células electrolíticas. Os alimentadores adicionam sucessivamente 1 kg de alumina em cada 15 segundos.

A corrente é constante sendo que as células possuem voltagens individuais na ordem de 4.0 V. Os ânodos estão imersos no pote, suspensos por meio de uma barra de distribuição da corrente chamado "Beam", como mostra a figura 6, onde a intensidade da corrente é igual por todos ânodos dependendo da idade do ânodo e da sua imersão ao banho. A capacidade de produção das células é de cerca de 3600 kg de alumínio líquido por dia, o alumínio líquido a alta temperatura é transportado em grandes tanques para a casa de moldes onde é transformada em lingotes.

2.3.2.2 Banho electrolítico

A criolite é o principal componente do banho, ela funde-se congruentemente a 1010°C como demonstra o diagrama da figura 8, e a adição de fluoreto de alumínio (AlF_3) na proporção correcta diminui a temperatura de fusão do banho. Fluoreto de cálcio (CaF_2) adicionada em proporção correcta também baixa a temperatura de fusão do banho. Quando fundida, a criolite, Na_3AlF_6 , dissolve a alumina e permite uma boa separação física das fases produzidas durante a electrólise (electrólito-alumínio).

A composição típica do banho electrolítico: criolite Na_3AlF_6 , $3\text{NaF}:1\text{AlF}_3$ (80%), excesso de AlF_3 11.5%, CaF_2 (5%), Al_2O_3 (2%), criolite ($\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$), $5\text{NaF}:3\text{AlF}_3$ (1.5%).

Em alguns casos, estão presentes no banho em menores proporções, os fluoretos de magnésio (MgF_2) e lítio (LiF), provenientes da adição de Li_2CO_3 e MgO ou $MgCO_3$, cujo objectivo é diminuir a temperatura de fusão do electrólito (Do Prado 2008, Gusbert 2007, Fotine 2000 citados por Chitaca, 2012).

A criolite é a única substância que pode dissolver a alumina, funde a uma temperatura aceitável $1010^\circ C$ ou $950-970^\circ C$ quando é adicionada alguns aditivos. Foi adoptada como solvente desta reacção devido a algumas das suas características especiais:

- É um dos poucos solventes para a alumina encontrados na natureza (a maioria das reservas ficam na Grenlândia);
- No seu estado líquido possui condutividade eléctrica aceitável;
- Possui temperatura de fusão aceitável ($\sim 960^\circ C$);
- Não é reactiva com o carbono ou alumínio, fazendo assim com que a reacção de electrólise de alumina gere o alumínio em alto rendimento;
- Possui baixa pressão de vapor.

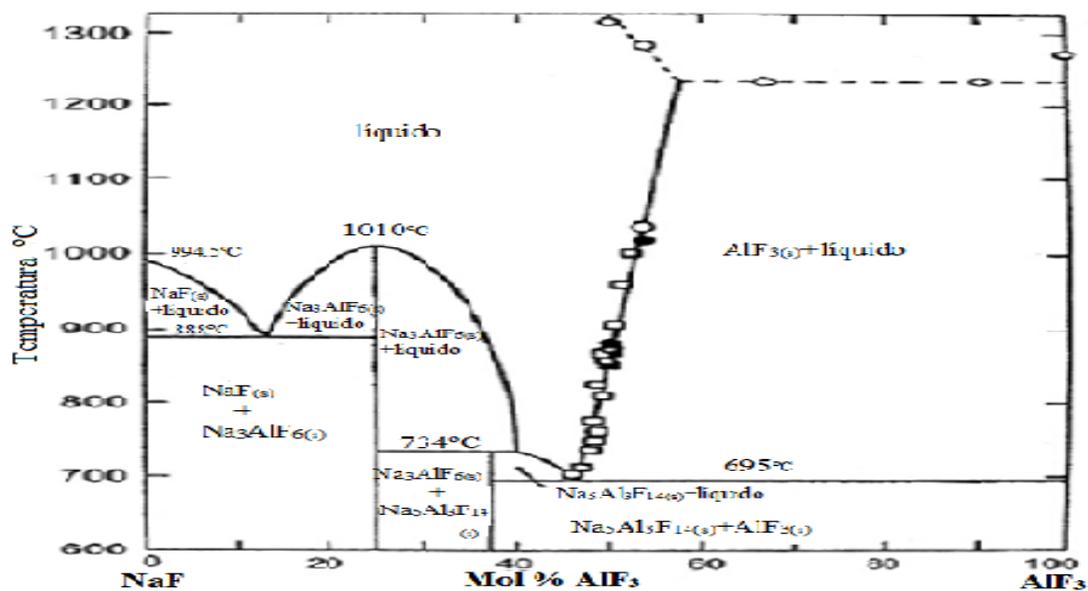


Figura 8. Diagrama de fases criolite/ fluoreto de alumínio (Do Prado 2008, citado por Chitaca, 2012)

Na Tabela 1 está apresentado o impacto dos aditivos no banho electrolítico.

Tabela 1. Impacto dos aditivos no banho electrolítico (Fonte Mozal).

Parâmetros físico químicos do banho	Adição de		
	Al ₂ O ₃	AlF ₃	CaF ₂
Temperatura líquida	↓	↓	↓
Densidade	↓	↓	↑
Viscosidade	↓	↓	↑
Resistividade	↑	↑	↗
Solubilidade de alumina	↓	↓	↓

2.4. Propriedades físicas e químicas do alumínio

O alumínio é um metal branco-prateado maleável, bom condutor de electricidade e com elevada condutividade térmica. Ele encontra-se disponível em barras, folhas, lâminas ou fios. O alumínio possui as seguintes características.

- ✓ Massa molecular: 26.98 u.m.a,
- ✓ Número atómico:13,
- ✓ Temperatura de fusão: 660 °C,
- ✓ Temperatura de ebulição: 1800 °C,
- ✓ Potencial eléctrico: -1.663 V.

A temperatura ambiente, o alumínio não se altera quimicamente devido a formação de uma película superficial de óxido com uma acção protectora muito forte. Com a formação desta película de óxido o alumínio pode actuar como um reflector de luz e resistir a corrosão. Ele não forma vapores mesmo a altas temperaturas, mas o pó de alumínio finamente dividido sofre facilmente ignição e pode causar explosões.

O alumínio é solúvel em ácido clorídrico diluído, em ácido sulfúrico e em solução de hidróxido de potássio ou de sódio com a libertação de hidrogénio. É parcialmente insolúvel em ácido

nítrico concentrado ou acético quando quente. O alumínio reduz os catiões de muitos metais pesados a metal (Glinka, 1984 citado por Bungallah, 2006).

2.5. Aplicação de alumínio

É muito usado na produção de ligas metálicas devido ao facto de este possuir um peso específico baixo. Por sua vez estas ligas são aplicadas no fabrico de aviões, automóveis e em vários ramos industriais. A sua elevada condutividade térmica faz com que este tenha uma grande aplicação nas linhas de transmissão de corrente. Na forma de metal puro, o alumínio emprega-se no fabrico de aparelhos, fios eléctricos e condensadores. Na metalurgia, o alumínio emprega-se na obtenção de cálcio, bário, lítio e outros metais pelo método de aluminotermia (Glinka, 1984 citado por Bungallah, 2006).

2.6. Processo de produção de ânodos de carbono

Os ânodos de carbono são produzidos no Departamento de Carbono e enviados para a redução. O Departamento de carbono subdivide-se em:

- Fábrica de pasta "Paste Plant";
- Fábrica de cozimento "Baking Furnace";
- Oficina de chumbamento "Rodding Shop";

O processo de produção de ânodos baseia-se na mistura de três componentes (ânodos reciclados denominado "*butts*", alcatrão de carvão "*pitch*" e o coque de petróleo), a compactação em vibrocompactadores e a formação dos ânodos nos moldes.

2.6.1 Fábrica de pasta "*Paste Plant*"

O coque de petróleo entra na fábrica da pasta, onde é seleccionado, classificado e misturado com os ânodos usados, triturados para a reciclagem. A mistura de coque entra na câmara de pré-aquecimento por via de um balde elevador, depois do qual é transferida para o misturador "*Buss Mixer*", onde é completamente misturado com alcatrão líquido para formar uma pasta.

A pasta entra no segundo misturador, o refrigerador "*Eirich Cooler*", onde a temperatura baixa e o processo de mistura continua. A pasta já pronta para ser moldada em ânodos em forma de blocos como demonstra a figura 9, com 1.55m x 0.655m x 0.62m., e um peso entre 900 kg a 930

kg. Este processo ocorre no vibro-compactador. A secção elevada do molde desce, exercendo grande pressão na mistura dentro do molde. Ao mesmo tempo o molde é vibrado para facilitar a distribuição equitativa das partículas de coque na mistura.



Figura 9. Imagem de ânodo. a) Bloco de carbono antes do chumbamento, b) bloco de carbono depois do chumbamento (Fonte Mozal).

No fim deste processo o molde e a base se separam, o ânodo é ejectado e conduzido através de um túnel de refrigeração onde é pulverizado com água designado “ânodo cru” ou ânodo verde”, e deve a seguir ser cozido para que adquira a resistência mecânica e melhora as propriedades eléctricas.

2.6.2 Fábrica de cozimento "*Baking Furnace*"

Os ânodos são colocados em posição vertical, como demonstra a figura 10 e dispostos em sete colunas de três ânodos cada num forno de queimador a gás. O cozimento dura aproximadamente 20 dias, gradualmente aquecendo os ânodos até a temperatura de 1100°C, arrefecendo-os depois lentamente e uniformemente. Os fumos do forno de cozimento são tratados no CTF para a remoção de poeiras e outras impurezas como os fluoretos por absorção na alumina e por condensação.

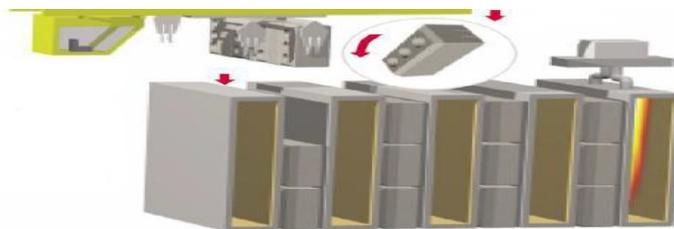


Figura 10. Esquema dos Fornos de cozimento dos ânodos (Fonte Mozal).

2.6.3 Oficina de chumbamento "rodding shop"

Os ânodos cozidos no forno de cozimento entram na oficina de chumbamento onde ocorre a ligação da haste ao ânodo denominado "Stem". O stem dos ânodos é um condutor eléctrico que é constituído por uma haste de alumínio fixa a um hexápode de ferro como mostra Figura 9 e 11, cada hexápode (6 pinos) é automaticamente alinhado com dois ânodos e baixado de modo que os pinos encaixem nos furos por cima dos ânodos, que depois são chumbados com ferro fundido líquido (figura 9-b),

Em cada haste são colocados dois blocos de carbono denominados "anode assembly" e são transportados para o Departamento de Redução por veículo especial designado APTV.

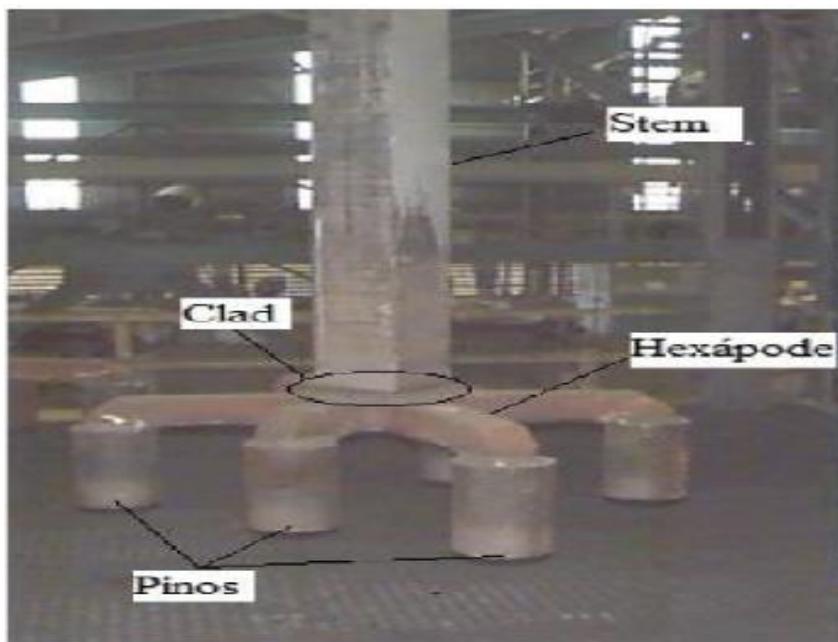


Figura 11. Pinos e stem de uma assembleia de ânodos (Fonte Mozal).

2.7. REACÇÕES DE OXIDAÇÃO PARASÍTICA DO ÂNODO DE CARBONO

Observações práticas dos ânodos removidos das células electrolíticas demonstram que existem duas zonas distintas onde o ânodo é oxidado de forma parasítica:

- ✓ Zona emergente acima do banho eletrolítico onde o ânodo é principalmente coberto. Esta zona é oxidada com o ar. Zona (I),
- ✓ Zona interfacial electrolítica onde o dióxido de carbono é formado. Esta zona é oxidada com dióxido de carbono zona (II), onde ocorre a reacção electroquímica principal de obtenção de alumínio gerando dióxido de carbono, zona (III) (Grjotheim, 2001).

2.7.1. Mecanismos do consumo do ânodo estão apresentados na figura 12.

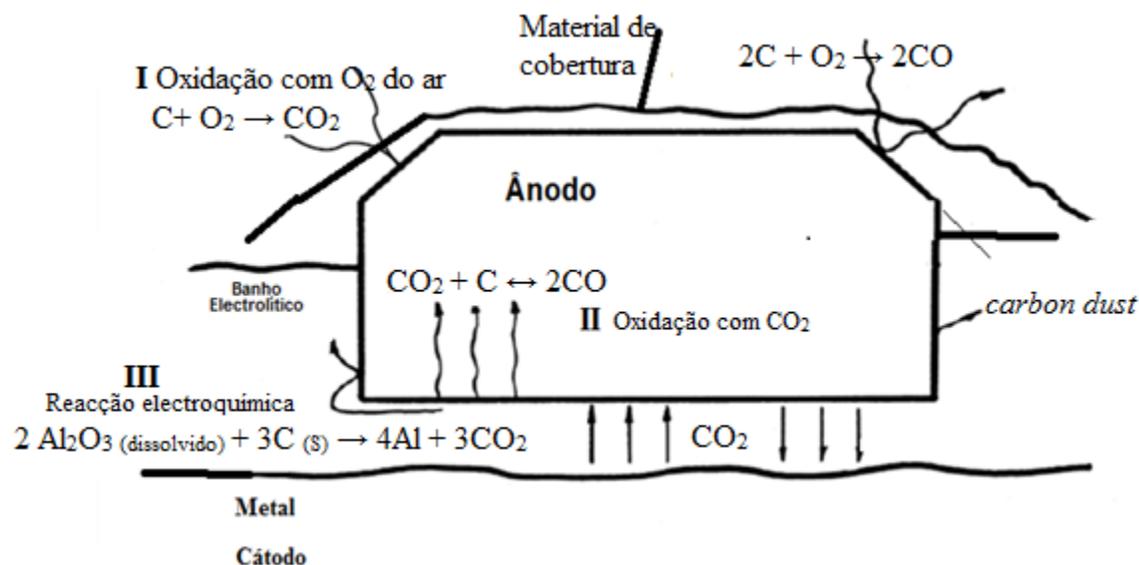


Figura 12. Esquema dos mecanismos do consumo do ânodo (Fonte Mozal).

2.7.1.1. Zona I. Oxidação do ânodo pelo ar

Existem duas reacções de oxidação termodinamicamente possíveis nesta zona como demonstra a figura 12, uma que dá origem ao monóxido de carbono e outra que dá origem ao dióxido de carbono, assumindo grafite como estado padrão do carbono, A variação de energia de Gibbs para a reacção da equação 9 (Grjotheim, 2001).



É dada pela equação seguinte $\Delta G^\circ = -394,438 - 0.00149T$ (kJ por mole de CO_2) (10)

A partir da equação 10, verifica-se que a reacção é fortemente favorecida e as forças que a conduzem são independentes da temperatura. A variação de energia de Gibbs para reacção:



É dada pela equação $\Delta G^\circ = -111.398 - 0.08763T$ (kJ por mole de CO) (12)

Comparando a variação de energia de Gibbs dada na (equação 10) com a dada na (equação 12) é visto que esta reacção dominaria termodinamicamente a formação do CO_2 quando a temperatura excedesse aproximadamente $727^\circ C$, mas a temperaturas baixas a formação do monóxido de carbono seria o produto favorecido (Grjotheim, 2001).

Tomando em excepção as células anormais ou qualidade do ânodo, a temperatura na superfície do topo do ânodo nunca excede $627^\circ C$ é geralmente abaixo de $427^\circ C$. Deste modo a oxidação do ânodo pelo oxigénio do ar é normalmente representada pela formação do dióxido de carbono, o nível desta reacção será dependente em ambos a qualidade do ânodo e acesso do ar (Grjotheim, 2001).

2.7.1.2. Zona II - Oxidação do ânodo pelo dióxido de carbono

Baseando se na análise dos poros na zona, que se estende imediatamente acima da separação electroquímica, verifica-se uma reacção secundária claramente importante no consumo do ânodo. Esta reacção dos poros pode ser vista a ocorrer devido a interacção entre o dióxido de carbono gerado electroquimicamente e o carbono do ânodo de acordo com a reacção da (equação 13) (Grjotheim, 2001).



A variação da energia de Gibbs, assumindo novamente que a fase do carbono em reacção, têm uma estrutura grafítica, é dada da seguinte equação:

$$\Delta G^\circ = 85.821 - 0.08688T \text{ (kJ por mole de CO)} \quad (14)$$

Assim que a temperatura na zona de reacção esta acima de $927^\circ C$, o equilíbrio desloca-se fortemente para a direita, favorecendo a formação do monóxido de carbono,

A importância desta reacção dependerá da facilidade com que o dióxido de carbono flui através dos poros do ânodo, a permeabilidade do ar é usado para medir a resistência ao fluxo enquanto a força que conduz a reacção é a pressão hidráulica gerada na imersão do ânodo no banho electrolítico, aumentando deste modo o consumo do carbono. A observação dos ânodos removidos demonstram que a reacção ocorre preferencialmente com pitch como demonstra a figura 13 deixando partículas de coque no banho electrolítico (Grjotheim, 2001).

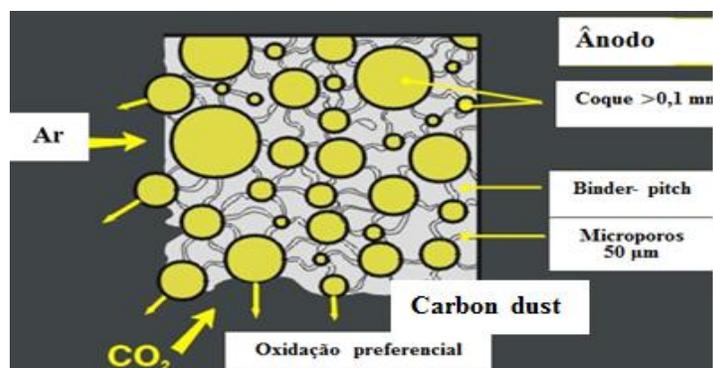
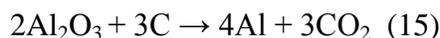


Figura 13. Esquema da oxidação preferencial do oxigênio do ar (Fonte Mozal)

2.8. Efeito anódico

O efeito anódico é causado pela baixa concentração de alumina no banho electrolítico. Devido a baixa concentração de alumina (insuficiência de alumina) no banho electrolítico, não existe quantidade suficiente de oxigênio libertado da alumina para sustentar a reacção electroquímica de acordo com a reacção da equação 15:



Como a corrente é continuamente fornecida ao pote, outras reacções electroquímicas começam a ocorrer na superfície de contacto entre o ânodo e banho electrolítico. Os compostos de flúor presentes no banho, combinam com ânodo de carbono para formar fluoretos de carbono como tetra fluoretos de carbono (equação 16), hexafluoretos de carbono (equação 17). Esses gases são conhecidos como gases de estufa, que são prejudiciais ao meio ambiente destruindo a camada de ozono (Mozal TRM000472, 2012).



Esses gases apresentam propriedades físicas diferentes das propriedades do dióxido de carbono, este forma pequenas bolhas que escapam por debaixo do ânodo como mostra a figura 14-a, os fluoretos de carbono tendem a coalescer formando uma camada de gases por baixo do ânodo em contacto com o banho que não escapa com facilidade como mostra a figura 14-b.

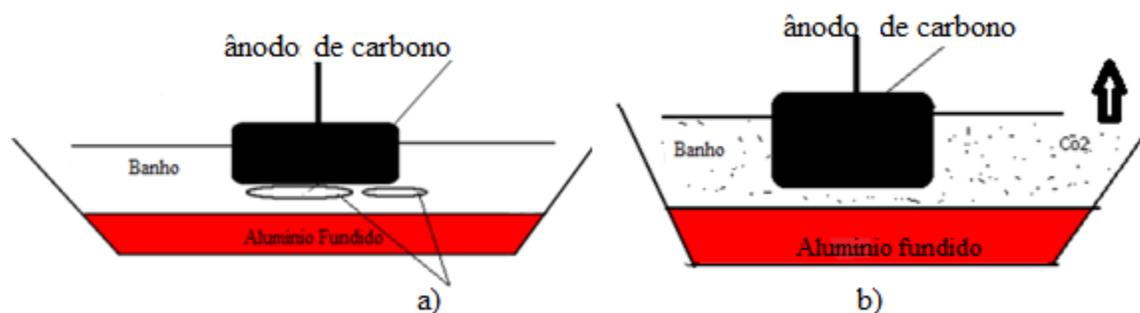


Figura 14. Esquema da formação dos gases do efeito anódico. a) Formação de bolhas de CF₄, C₂F₆. b) Libertação de CO₂ (Fonte Mozal).

Para uma boa operação o teor de alumina no banho deve estar mantido entre 1.5% a 2.5%. O impacto do efeito anódico no pote é o aumento da temperatura da célula assim que o calor for dissipado no banho. (Mozal TRM000472, 2012).

2.9. Parâmetros de qualidade dos ânodos

As propriedades físicas e químicas dos ânodos usados são densidade aparente, resistência eléctrica, módulo de elasticidade (dinâmica e estática), condutividade térmica, permeabilidade do ar, reactividade do ar, reactividade do dióxido de carbono, coeficiente de expansão térmica, força de flexão, impurezas (V, Ni, Fe, Al, Na, Ca, Pb). Os valores máximos e mínimos aceitáveis para cada parâmetro segundo as normas ISO estão representados na tabela B do ANEXO III.

2.9.1. Efeito catalítico de sódio e vanádio nas reacções parasíticas

Vanádio (V) e Sódio (Na) encontram-se como traços de impurezas organometálicos em petróleo bruto. Estes complexos organometálicos são solúveis no petróleo bruto e não podem ser separados. Durante o processo de refino se concentram em correntes residuais alimentados aos coqueificadores e estão intimamente ligados dentro da estrutura de carbono depois da coqueificação (Edwards, Sem data).

Vanádio, sódio e outras impurezas são indesejáveis por várias razões. O mais óbvio é a contaminação de metal que pode ser problemático para atender às especificações de metais primários. Vanádio é catalisador bem conhecido para a reacção do carbono com o oxigénio do ar a temperaturas elevadas. O sódio é o elemento químico com maior poder catalítico de todas as impurezas indesejáveis no ânodo sendo catalisador para oxidação do ânodo por dióxido de carbono (Lee, sem data).

Segundo Batista, um estudo foi realizado sobre a influência do nível de sódio na reactividade do ânodo com dióxido de carbono e oxigénio do ar, os resultados do estudo foram apresentados nos gráficos da figura 15.

2.9.1.1. Efeito catalítico do sódio

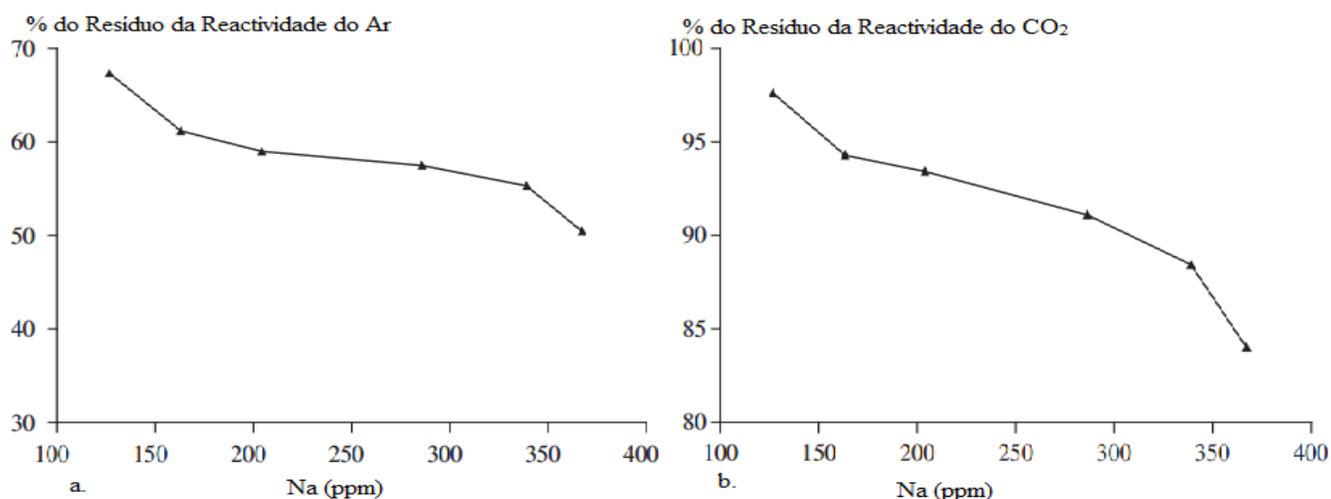


Figura 15. Gráfico do efeito catalítico do sódio sobre as reacções parasíticas (Batista, et al 2008).

Pelos gráficos da figura 15 pode se verificar que a percentagem do resíduo da reacção do ânodo com ar (figura 15-a) e com dióxido de carbono figura 15-b diminui quando o teor de sódio aumenta mas com maior efeito na reactividade com CO₂.

Capítulo III. TRABALHO DO CAMPO

O trabalho do campo baseou-se na:

- Descrição do local de estudo,
- Elaboração e realização dos ensaios tecnológicos.

3.1. Descrição local de estudo

A Mozal é constituída na sua maioria por quatro Departamentos: Porto da MOZAL: localizado no Porto de Maputo para recepção da matéria-prima e exportação do alumínio primário. Carbono: Departamento responsável pela produção dos ânodos de carbono. Redução: Departamento responsável pela produção do alumínio primário com teores de ferro abaixo de 800 ppm. Casa de moldes: Departamento responsável pela produção de lingotes de alumínio (solidificação do alumínio fundido proveniente da redução). O estudo foi realizado no departamento de redução Linha 2, (Mozal 2), Potroom C como demonstra a figura 16.



Figura 16. Departamento de Redução (Fonte Mozal).

Na Mozal, o departamento de redução é composto por duas linhas de produção, (figura 16), isto é, dois *Potlines*: *Potline I - Mozal 1* e *Potline II - Mozal 2*. Cada *Potline* divide-se em 2 *Potrooms* com 144 células electrolíticas. Em cada linha existem no total 288 células electrolíticas

ligadas em série com uma corrente de cerca de 360 kA (Linha 1 – *Potline I*) e cerca de 355.5 kA (Linha 2 – *Potline II*), no total existem 576 células electrolíticas divididas em 4 pot-rooms (A, B, C, D).

3.2. Troca de ânodos

A troca de ânodos é um processo no qual os ânodos gastos são trocados por ânodos novos. A vida útil dos ânodos é de cerca de 80 turnos de 8 horas, o que corresponde a aproximadamente 27 dias. Isto significa que quando um ânodo atinge a sua vida útil exige-se uma substituição, o pote é constituído por 20 ânodos. Em certos casos os ânodos são trocados sem que estes tenham atingido a sua vida útil, isto acontece em situações em que os ânodos estão rachados, possuem pinos deteriorados pelo ataque químico, provocado pelo banho, têm um rompimento da liga bimetálica "*clad*" e nos casos em que os ânodos estão deformados (Mozal BO-RA-0001, 2011).

O pote está dividido em quatro quadrantes onde os ânodos estão instalados de 1 a 20. Os ânodos não são trocados na ordem de 1 a 20, mais sim, estes são trocados obedecendo uma sequência específica para minimizar o arrefecimento do banho durante o processo (manter o equilíbrio térmico no pote). Os ânodos são trocados um de cada vez obedecendo a sequência abaixo:

1; 15; 9; 19; 5; 11; 7; 17; 2; 13; 10; 20; 3; 12; 8; 16; 6; 14; 4; 18

Quando um ânodo novo é introduzido na célula, coloca-se 15 milímetros acima em relação aos restantes ânodos como mostra a figura 17, devido as seguintes razões:

- ✓ Temperatura do ânodo – durante a configuração do ânodo verifica-se a existência de diferenças de temperatura do fundo até ao topo do novo bloco de carbono. Uma camada fina de banho solidificada é formada por baixo do ânodo e inibe o fluxo de corrente. Com o aumento da temperatura do ânodo, esta funde-se e permite o fluxo de corrente.
- ✓ Resistência do ânodo – o ânodo frio apresenta maior resistência à passagem da corrente em relação a um ânodo quente. Enquanto o novo ânodo aquece lentamente, a resistência à corrente diminui e aumenta o fluxo de corrente (Mozal BO-RA-0001, 2011).

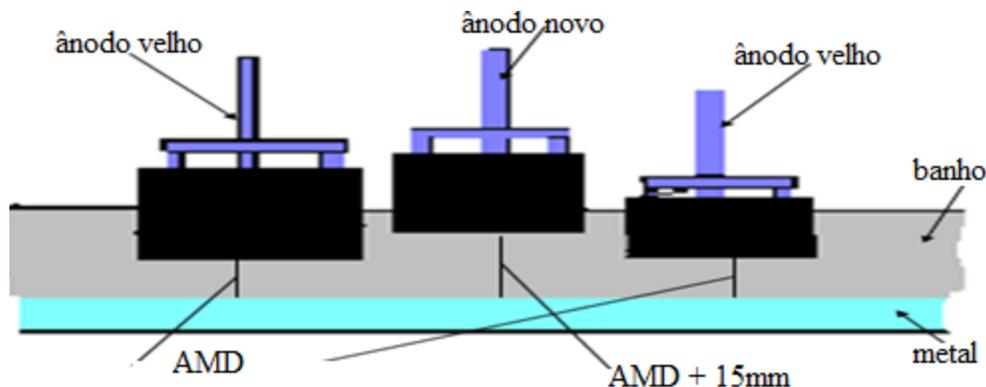


Figura 17. Disposição dos ânodos na célula electrolítica conforme o seu tempo de vida (Fonte Mozal).

Os balanços de calor no pote são afectados pela troca do ânodo como resultado do arrefecimento do banho quando é exposto ao ar e pela imersão dos ânodos a temperaturas baixas. Para aderir a este princípio o ânodo é trocado a cada 32 horas por pote.

A temperatura do ânodo aumenta gradualmente quando o ânodo é colocado no pote, um ânodo novo permanece no banho cerca de 24 horas para alcançar a temperatura do pote, a diminuição da resistência do ânodo resulta no aumento do fluxo da corrente como mostra o gráfico da figura 18 (Mozal BO-RA-0001, 2011).

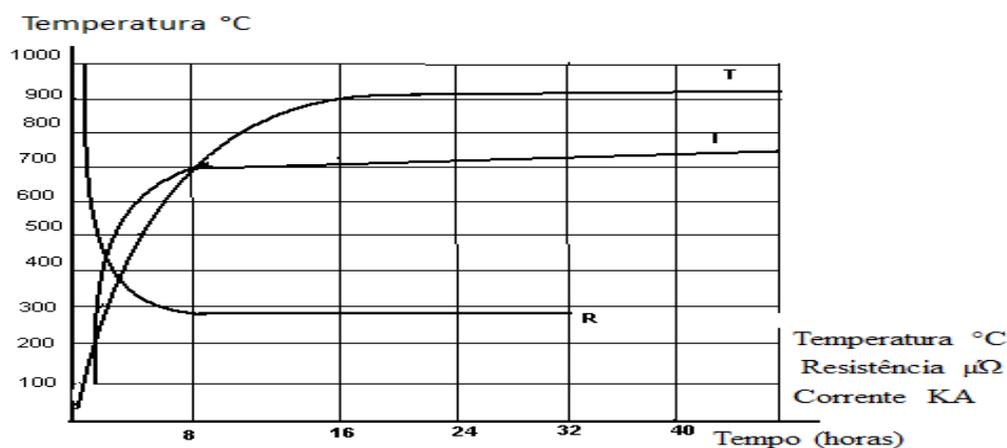


Figura 18. Gráfico da dependência entre temperatura, resistência e fluxo de corrente do ânodo em função do tempo (Mozal BO-RA-0001, 2011).

3.3. Cobertura de ânodos

Os ânodos são cobertos por uma mistura de banho sólido granulado e alumina como mostra a figura 19. A cobertura dos ânodos é feita com objectivos de:

1. Minimizar o consumo do carbono pela rápida oxidação dos ânodos;
2. Minimizar a emissão de gases e manter a temperatura do pote;
4. Proteger as tampas nas laterais do pote.

Em condições normais de operação, o material usado na cobertura dos ânodos é composto por alumina e banho sólido granulado, numa proporção de 40% de alumina e 60% do banho sólido granulado (Mozal B0-RA-002, 2008).

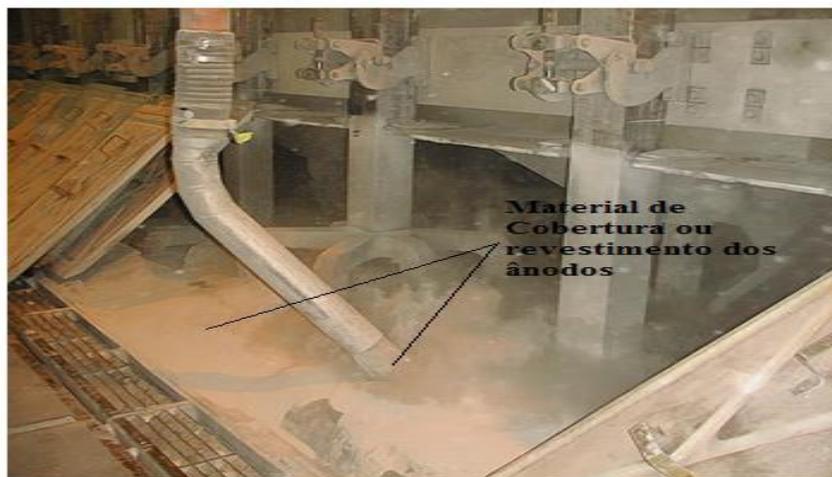


Figura 19. Material de cobertura a ser depositado na superfície do ânodo (Fonte Mozal).

A cobertura dos ânodos é feita em duas fases: a primeira fase é considerada após ter-se passado 4 horas depois de ter sido trocado o ânodo, pois supõem-se que 4 horas após ter sido trocado o ânodo, a crosta a volta do ânodo novo e acima da superfície do banho já se tenha formado, como mostra figura 20. Durante o processo de cobertura dos ânodos, também são cobertos os ânodos adjacentes ao novo ânodo introduzindo uma camada uniforme da mistura alumina e banho sólido granulado. A crosta formada à volta do novo ânodo é banho sólido, que se forma devido ao resfriamento da superfície exposta ao banho líquido (Mozal B0-RA-002, 2008).

Ao cobrir-se o ânodo onde a crosta não esteja formada, ou, apenas a crosta formada é fina, cuidados devem ser tomados para minimizar a quantidade de material de cobertura dos ânodos que se depositará no cátodo.



Crosta formada a volta do ânodo nove

Figura 20. Formação da incrustação em volta do ânodo 4 horas depois imerso no banho.

A segunda fase do processo de cobertura dos ânodos é feita 24 horas após a cobertura inicial. Este procedimento inclui a verificação e correcção da cobertura inicial. Esta operação é realizada para estabelecer uma boa cobertura para a vida do ânodo de modo a minimizar a queima do carbono (oxidação pelo oxigénio do ar), atingir a temperatura do banho electrolítico (o equilíbrio térmico do pote) (Mozal B0-RA-002, 2008).

Aspectos qualitativos do banho electrolítico no processo

Para que se possa garantir melhores condições de operação de produção do alumínio, alguns aspectos ou variáveis devem ser tomadas em conta e analisadas com cuidado, como:

- A altura do banho nas células electrolíticas,
- Temperatura do banho.

3.3.1. Altura do banho

- Baixo nível da solução electrolítica (altura do banho abaixo de 16 cm)

Conduzirá à fraca dissolução da alumina no banho e conseqüentemente existirá uma grande concentração da alumina no pote que não será dissolvido. A alumina não dissolvida depositar-se-á no cátodo culminando com a formação de lodo (lama), tornando o pote instável.

- Elevado nível da solução electrolítica (altura do banho muito acima de 16 cm)

Devido às propriedades corrosivas que a solução electrolítica possui, muito banho no pote permitirá que os pinos dos ânodos sejam atacados pelo electrólito (ataque químico), contaminando-se assim o alumínio fundido pelo excesso de ferro proveniente dos pinos dos ânodos como mostra a figura 22. (Mozal TRM000479, 2012).

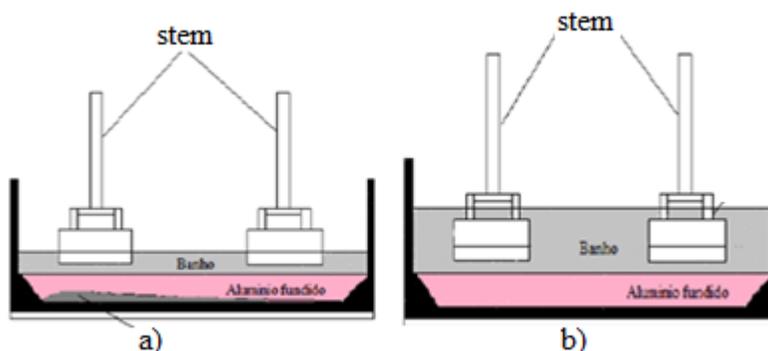


Figura 21. Formação de lama de alumina e ataque dos pinos devido ao baixo e alto nível do banho. a) Lama de alumina depositada na superfície do cátodo. b) Pinos dos ânodos atacados pelo banho.

3.3.2. Efeitos da variação na temperatura do banho

Temperatura do banho muito elevada:

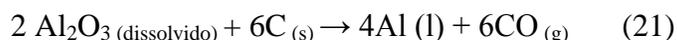
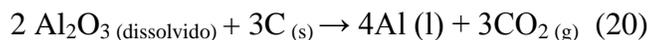
- ✓ Deteriora a camada protectora da superfície lateral do pote;

Temperatura do banho muito baixa:

- ✓ Favorece o aumento da camada protectora;
- ✓ Diminui a altura do banho devido à formação da camada protectora;
- ✓ Aumenta a possibilidade de permitir que haja fraca dissolução da alumina
- ✓ Surgimento do efeito anódico devido a fraca dissolução da alumina no pote (Mozal TRM000479, 2012).

3.4. Cálculo da quantidade de carbono teoricamente necessária para produzir uma tonelada de alumínio

Durante a electrólise, os ânodos são consumidos pela oxidação completa (equação 20) e incompleta (equação 21) do carbono.



Fazendo os cálculos estequiométricos para a reacção da equação (20) 4×26.97 kg de Al são produzidos a partir de 3×12 kg de carbono. Para produzir 1000 kg de alumínio, a quantidade de carbono necessária será:

$$\text{Quantidade de carbono} = (3 \times 12 \times 1000) / 4 \times 26.97 \text{ kg de C} = 333 \text{ kg de C}$$

Da equação da reacção (21) 4×26.97 kg de Al são produzidos a partir de 6×12 kg de carbono. Para produzir 1000 kg de alumínio, a quantidade de carbono necessária será:

$$\text{Quantidade de carbono} = (6 \times 12 \times 1000) / 4 \times 26.97 \text{ kg de C} = 667 \text{ kg de C}$$

No processo de produção de alumínio, são produzidos 75% de CO_2 e 25% de CO. Assim, considerando as reacções para produzir 1000 kg de alumínio a quantidade total de carbono consumido será:

$$\text{Quantidade de carbono consumido no processo será } (0.75 \times 333 + 0.25 \times 667) = 416.5 \text{ kg de carbono}$$

Teoricamente, para produzirem-se 1000 kg de alumínio são consumidos cerca de 416.5 kg de carbono.

DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS USADOS:

A determinação da quantidade de carbono consumido por reacções parasíticas foi baseada no cálculo do Net carbon durante 27 dias nos ânodos dos potes de teste e de referência.

3.5. Determinação da quantidade do carbono consumido por tonelada de alumínio "Net Carbon"

A quantidade do carbono consumido durante a reacção electroquímica é a diferença entre o peso do ânodo novo e o peso do ânodo gasto obtido através da pesagem dos "butts" como demonstra a figura 22.

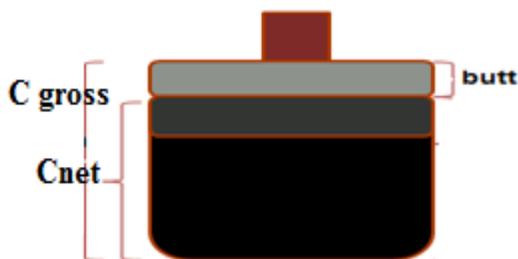


Figura 22. Esquema ilustrativa para o cálculo do net carbon.

$$C_{\text{net}} = C_{\text{gross}} - P.\text{Butt} \quad (22)$$

C_{net} = peso total do ânodo consumido,

C_{gross} = peso total do ânodo novo,

P. Butt = peso do ânodo gasto,

O "net carbon" é a razão entre a quantidade do carbono consumido (C_{net}) e a quantidade do metal produzido na célula electrolítica ou seja quantidade do carbono consumido por tonelada de alumínio.

$$\text{Net Carbon} = \frac{C_{\text{net}}}{m(t)\text{Al}}, \quad (23)$$

$m(t)\text{Al}$ - massa do alumínio produzido.

3.6. Determinação do grau de reactividade do ânodo com dióxido de carbono

É uma análise feita para verificar o grau de reactividade do ânodo com dióxido de carbono gerado na reacção electroquímica.

Princípio de funcionamento da técnica

O instrumento de reactividade do CO₂ consiste em 3 fornos, e duas amostras podem serem carregados em cada forno de uma só vez. A amostra é colocada no forno onde faz-se passar uma corrente de CO₂, a uma temperatura de 960°C, durante 7 horas, o corpo residual chamado resíduo de reactividade, é pesado e os resultados são calculados em percentagem de perda.

3.7. Determinação do grau de reactividade do ânodo com ar

Esta análise tem como propósito verificar o grau de reactividade do ânodo quando exposto ao ar durante a operação na célula electrolítica.

Princípio de funcionamento da técnica

O instrumento de reactividade do ânodo com oxigénio consiste em 3 fornos e três amostras podem serem carregadas de uma só vez. Uma amostra de peso conhecido, é colocada num forno aquecido a 550°C, no fluxo de ar seco, a amostra é então atacado pelo oxigénio do ar (oxidação), durante o ciclo de temperatura, o que diminui a partir de 550°C a 400°C, durante um período de 10 horas. Durante o teste, a amostra é agitada periodicamente (uma vez por minuto) e é recolhida em uma bandeja depois da reacção. No final do teste, a parte restante da amostra é colocado no aparelho (*tumbling apparatus*), para separar a parte compacta, das partículas nela aglomeradas resultados da queima. O corpo residual chamado resíduo de reactividade, é pesado, os cálculos são feitos em seguida para encontrar os valores específicos que são dados como percentagens de perda.

3.8. Determinação do sódio e vanádio

A análise de impurezas no ânodo cozido pode ser feita utilizando vários métodos de entre eles: espectroscopia de emissão óptica (OES), espectrometria de fluorescência de raios-X, espectroscopia de absorção atómica. Neste trabalho o método escolhido foi a fluorescência de

raios-X por ser largamente usado na fábrica, não destrutiva, rápido e de fácil uso para análise de amostras de natureza diversa e não necessitar de dissolver a amostra.

Princípio de funcionamento de espectrometria de fluorescência de raios-X

A técnica analítica usada na determinação do sódio e vanádio nas amostras de ânodo de carbono foi a fluorescência de raios-X. Esta técnica baseia-se no facto de os raios-X emitidos por um elemento excitado, terem um comprimento de onda característico desse elemento e uma intensidade proporcional ao número de átomos excitados. Nesta técnica a amostra é colocada numa câmara, onde o átomo na amostra é excitado pelos raios-X, deslocando um electrão, que é substituído por outro de orbital exterior. Quando o electrão retorna ao nível inferior ou estado normal, liberta energia secundária ou radiação fluorescente (fluorescência) (Skoog 1998, citado por Macuacua, 2000).

A energia libertada é proporcional ao número de átomos excitados. Estes por sua vez estão relacionados com a concentração do elemento na amostra, formando assim a base de medição da fluorescência dos raios-x. Existe relação entre o número de átomos e a concentração da fluorescência, que pode ser mostrada pela equação:

$$P_x = P_b \times W_x \quad (24)$$

P_x – é a quantidade relativa da linha medida em termos de número de contagens por período fixo.

W_x – é a fracção mássica do elemento na amostra.

P_s – intensidade relativa da linha que pode ser medida sob as mesmas condições de contagem se W_x for igual a uma unidade. (Skoog 1998, citado por Macuacua, 2000).

Capítulo IV. EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS USADOS PARA ENSAIOS TECNOLÓGICOS

4.1. PROCEDIMENTO GERAL DOS ENSAIOS TECNOLÓGICOS

1. Amostragem

Com o objectivo de avaliar o impacto das reacções de oxidação parasítica no consumo do ânodo de carbono, melhorando as práticas de cobertura dos ânodos foram seleccionados células electrolíticas para o estudo em condições ideais de cobertura (potes de teste C080 e C081 onde os cuidados foram feitos 5 dias por semana) contra as condições de coberturas convencionais (pote de referência C079 onde os cuidados foram feitos um dia por semana).

As razões da escolha desses potes foram:

- por serem células electrolíticas relativamente com menos de 1 ano de vida,
- tinham metal líquido com altos teores de ferro o que não é normal para um pote novo,
- por serem potes vizinhos facilitam o transporte dos ânodos gastos removidos sem interferirem em outras operações da linha de produção.

As células electrolíticas usadas neste estudo são da linha 2 (Mozal 2) potroom C, os ânodos nas células electrolíticas em operação, foram identificadas através de fitas de identificação usadas na fábrica, de modo a evitar possíveis interferências durante o experimento por outros trabalhos operacionais, realizados na linha de potes.

2. Determinação do grau de reactividade dos ânodos

O grau de reactividade do ânodo com oxigénio do ar e com dióxido de carbono é dado pelo peso do resíduo em percentagem, que resta quando o ânodo é submetido a reacção com esses gases nas mesmas condições de operação de uma célula electrolítica. É uma análise que tem como propósito verificar a qualidade do ânodo antes de ser submetida a electrólise. Para efeito foram analisados os ânodos usados no estudo de modo a verificar se o consumo do ânodo em excesso é devido qualidade operacional ou devido a qualidade do ânodo de carbono.

3. Troca de ânodos gastos (*butts*)

Trocou-se todos os 20 ânodos pré-existentes nas células electrolíticas de teste (C080, C081), em ânodos novos de pesos conhecidos, grau de reactividade com ar e CO₂, teor de impurezas determinadas.

4. Melhoramento da cobertura dos ânodos

Cobriu-se os ânodos e controlou-se a sua integridade durante 27 dias nos potes de teste de modo a evitar a exposição do ânodo ao ar e no pote de referência para avaliar os efeitos da deficiência de cobertura. Assim, para os potes de teste a cobertura foi controlada e cuidada 5 dias por semana para garantir maior protecção dos ânodos, em relação ao pote de referência com cuidados de 1 dia por semana conforme o plano normal das operações.

5. Medição dos parâmetros de controlo

Os parâmetros de controlo: temperatura do banho, teor de ferro, altura do banho foi medida em 3 períodos diferentes, 27 dias antes, durante e depois do melhoramento da cobertura, de modo a avaliar o comportamento dos potes em estudo e o desempenho da cobertura melhorada.

6. Armazenamento e limpeza dos ânodos

Os ânodos gastos removidos das células electrolíticas foram armazenados durante 24 horas para o arrefecimento e posterior limpeza.

7. Pesagem e medições geométricas

Foram pesados 7 assembleias de ânodos o que corresponde a 14 blocos de carbono por cada célula electrolítica, usando uma balança com capacidade máxima de 5000kg e mediu-se a espessura dos ânodos gastos por bloco, considerando a média por assembleia.

8. Análise e tratamento dos resultados

- Cálculos da quantidade de carbono consumido por reacções parasíticas,
- Representação gráfica dos resultados de todos os parâmetros estudados,
- Discussão e interpretação dos resultados.

4.2. EQUIPAMENTOS USADOS NA:

Troca e cobertura dos ânodos

Os equipamentos usados na troca e cobertura de ânodos são.

- Paleta: onde coloca-se os ânodos novos e gastos durante a operação de troca de ânodos.
- "Anode Gauging": usa-se para extrair a referência do ânodo removido do pote,
- "Scraper": usa-se para espalhar o material no topo do ânodo de modo que tenha o mesmo nível,
- PTA "Pot Tending Assembly": é uma máquina composta de muitas ferramentas como ilustra a figura 23, usada para realização de operações de produção tais como troca de ânodos, cobertura dos ânodos, ajuste dos ânodos no pote, constituída por:
 - Cabine do PTA: onde são monitorados todas operações feitas pelo PTA mediante um operador (figura 23-a).
 - PTA- crust breaker: usa-se para quebrar o material de cobertura do ânodo gasto e da crosta no banho.
 - PTA "Crust Grab": usa-se para limpar a cavidade por onde é removido o ânodo gasto.
 - PTA "Bath Pipe": usa-se para cobrir os ânodos.

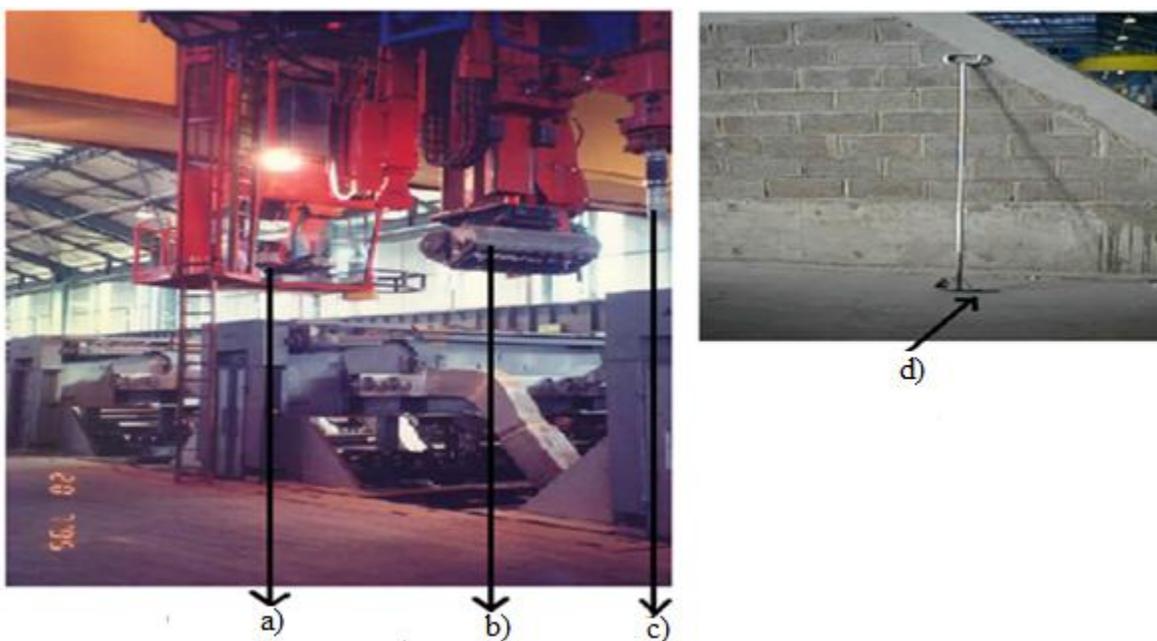


Figura 23. PTA "Pot tending assembly" a) Cabine do PTA. b) PTA Crustgrab. c) Tubo de cobertura. d) Scraper (Fonte Mozal).

Medição da temperatura do banho:

- Portable Measurement Logger - PML (figura 24-b),
- Varetas de medição da temperatura do banho (termopares) (figura 24-a).

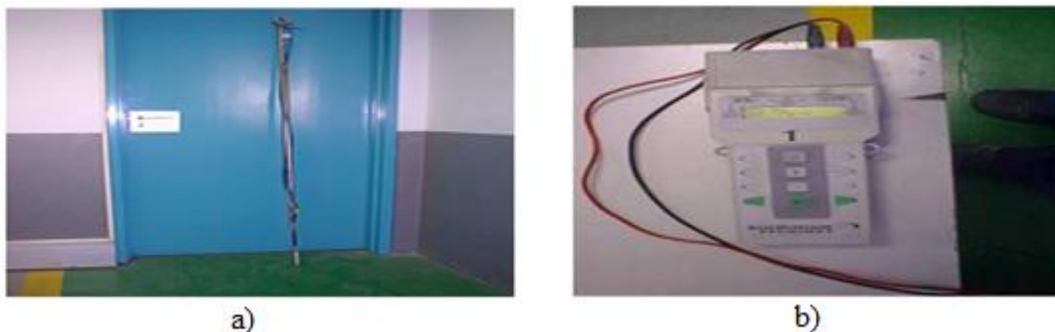


Figura 24. Equipamentos usados na medição da temperatura do banho (Fonte Mozal).

Medição da altura do banho:

- Régua de medição da altura do banho (figura 25-a),
- Vara de medição (figura 25-b).

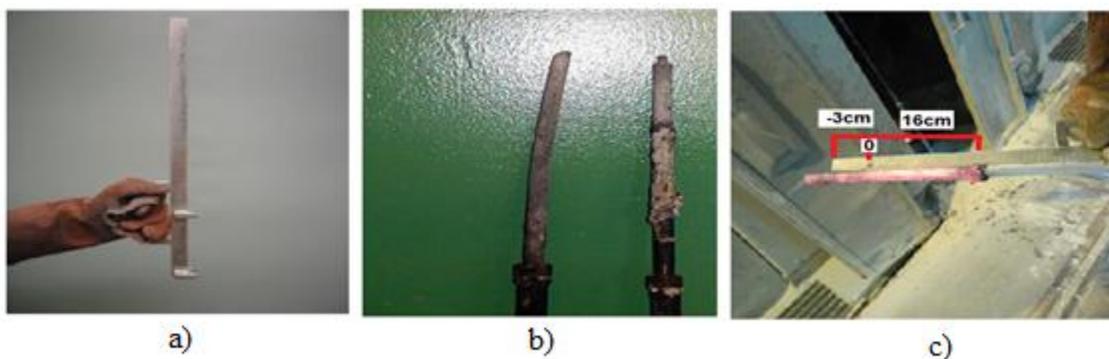


Figura 25. Equipamentos usados na medição da altura do banho (Fonte Mozal).

Medição da espessura:

Na figura 26 estão apresentados os equipamentos usados para medir a espessura do ânodo:

- ✓ Régua (figura 26-a), medidor de espessura (figura 26-b).



Figura 26. Equipamentos usados na medição da espessura.

4.3. PROCEDIMENTOS PARA ENSAIOS TECNOLÓGICOS

A troca de ânodos foi feita da seguinte forma:

- ✓ Colocou-se uma paleta de ânodos novos em frente de cada pote,
- ✓ Fez-se a requisição da troca do ânodo no computador "*potmicro*" de cada pote,
- ✓ Abriu-se 3 tampas "*hoods*" do pote no ânodo por se trocar,
- ✓ Quebrou-se a crosta em volta do ânodo gasto, usando a ferramenta do PTA, "*crustbreaker*" (figura 27-1),
- ✓ Removeu-se o ânodo gasto (figura 27-2), usando o PTA e colocou-se no "ânodo gauging" para extrair o nível em que se encontrava o ânodo gasto no pote,
- ✓ Limpou-se a cavidade por onde o ânodo gasto estava imerso, usando a ferramenta do PTA- furador de crosta (figura 27-3),
- ✓ Colocou-se o ânodo novo, onde foi pré-aquecido durante 15 segundos na superfície do banho (figura 27-4), (o ânodo é sempre colocado 15 mm acima em relação aos outros ânodos existente no pote),
- ✓ Fechou-se as tampas dos potes e 4 horas depois o ânodo é coberto pela mistura de alumina e banho sólido.

Na figura 27, estão ilustradas as principais etapas de troca dos ânodos nas células electrolíticas.



Figura 27. Processo de troca de ânodos e limpeza da cavidade (Fonte Mozal).

A cobertura de ânodos foi feita do seguinte modo:

- ✓ Abriu-se 3 tampas do pote no ânodo por cobrir, sendo duas tampas dos ânodos adjacentes,
- ✓ Fez- se a requisição da cobertura do ânodo no computador "*potmicro*" instalado por cada pote,

- ✓ 4 Horas depois de o ânodo ser trocado verificou-se a existência da crosta em volta do ânodo para evitar que o material drene para o banho durante a cobertura,
- ✓ Com a crosta formada cobriu-se o ânodo usando o tubo do material de cobertura PTA bath pipe, drenando o material até a extremidade do 3º pino da assembleia minimizando a introdução do material no banho pelo canal central do pote como mostra a figura 30-a,
- ✓ 24 Horas depois drenou-se material suficiente para cobrir o canal central entre o ânodo novo e adjacente, para garantir que nenhum ânodo não esteja exposto ao ar,
- ✓ Espalhou-se o material no novo ânodo e no adjacente usando *scraper*, para garantir que material esteja no nível aceitável (o espaço livre entre o nível do material e hexápode deve ser de 12 cm, para evitar a cobertura excessiva do ânodo, como demonstra a figura 28-b.

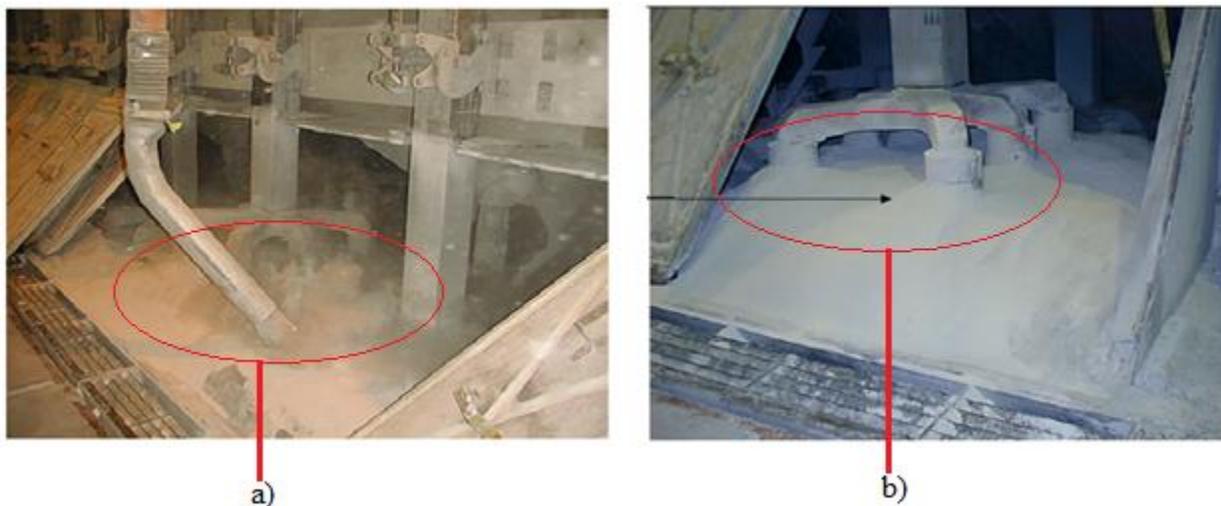


Figura 28. Cobertura do ânodo. a) *PTA Bath pipe* drenando o material sobre o ânodo. b) Ânodo com boa cobertura 24 horas depois de ser trocado.

Medições geométricas

Mediu-se a espessura dos ânodos gastos usando um medidor de espessura (figura 26-b), a medida da espessura foi extraída na base de uma régua de 50 cm (figura 26-a).

A medição da altura do banho foi feita da seguinte forma:

- Abriu-se a porta da superestrutura por onde é feita a sucção do metal e banho,
- Verificou-se a formação da crosta na cavidade de sucção. Se a crosta tiver sido formada, quebra-se usando um atizador,
- Levou-se a vara de medição do banho (figura 25-b) no gancho no lado esquerdo e dentro do pote.
- Posicionou-se a vara verticalmente no gancho de medição, para que a ponta vara esteja imersa no banho e esperou-se 10 a 15 segundos,
- Tirou-se a vara do pote com cuidado e mediu-se a altura do banho com a ajuda da régua de medição (figura 25-a). A figura 25-c demonstra a medição da altura do banho (neste caso, a altura do banho foi igual a 16 cm).

A temperatura do banho mediu-se do seguinte modo:

- Levaram-se 3 varetas de temperatura (figura 24-a) (Termopares),
- Fez-se a calibração das varetas, a calibração é feita medindo-se a temperatura do banho no mesmo pote, usando-se as três varetas,
- Após a medição das temperaturas, registaram-se as temperaturas e compararam-se. Foram usadas as varetas que apresentaram um valor da temperatura próxima ao valor da temperatura óptima do banho (963°C),
- Colocou-se a vareta já calibrada no banho conectado ao PML (figura 24-b), e extraiu-se o valor médio da temperatura.

A limpeza dos ânodos gastos foi feita da seguinte ordem:

O propósito da limpeza dos *butts* como ilustra a figura 29, foi de remover completamente o material de cobertura para permitir o carbono ser reciclado sem qualquer material de banho e para permitir que o banho seja reciclado sem qualquer carbono. O ânodo gasto passou através de quatro estações de limpeza, isto é:

- i. **Pré-limpeza:** onde quebrou-se as pontes do banho entre os pinos e hexápodes, esta operação tinha o propósito de recuperar a quantidade máxima do banho e evitar o banho de entrar no fluxo de carbono (figura 29-c)

ii. **Limpeza**-removeu-se os pedaços quebrados de banho, raspando e escovando a superfície superior dos ânodos gastos (figura 29-d).

iii. **Limpeza-manual**: realizou-se para controlar o grau de limpeza após a ruptura do banho. Os ânodos foram inspeccionados depois de passarem das operações de ruptura e de limpeza, a inspecção foi visual e contínua, removendo o excesso de partículas grandes (figura 29-e).

iv. **Jateamento "Shot Blasting"**

Removeu-se qualquer banho remanescente dos resíduos anódicos depois de ter sido processado pelas máquinas de limpeza usando máquina de jateamento. Esta etapa tinha como principal função retirar o banho restante por meio de jateamento de esferas de aço directamente no ânodo gasto (figura 29 h).

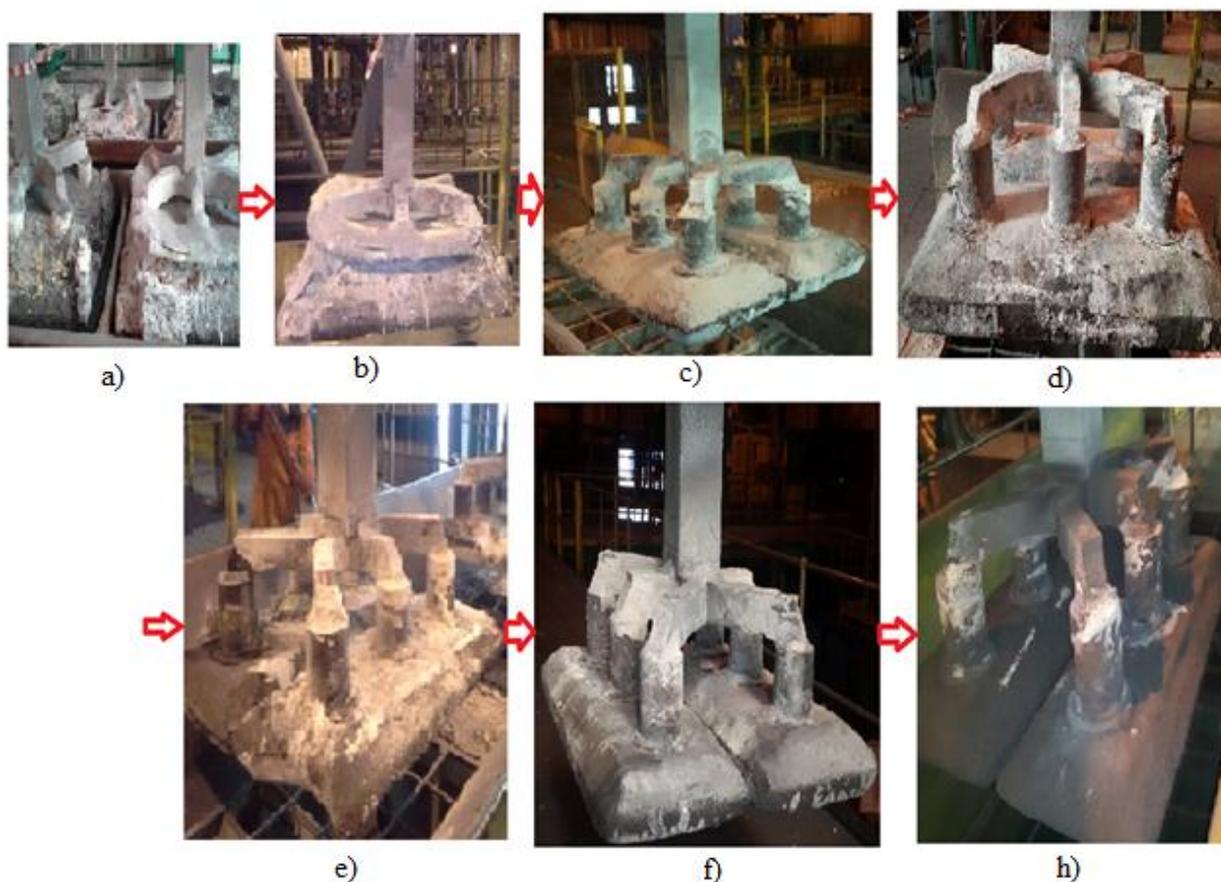


Figura 29. Sequência da limpeza dos ânodos gastos. a) Ânodos armazenados para o arrefecimento. b) Ânodo gasto antes da limpeza. c-h) Processo de limpeza.

4.4. Procedimentos seguidos na determinação de impurezas e grau de reactividade dos ânodos

As amostras de ânodos de carbono referentes aos ânodos usados nos ensaios tecnológicos, fornecidas pelo Departamento de Carbono, foram tratadas e analisadas pelo método de fluorescência de raios-X, para determinação de sódio, e vanádio. As amostras de alumínio metálico para análise de ferro nos potes de testes foram recolhidas no primeiro turno de cada dia, durante os três períodos referenciados (27 dias antes, durante e depois) e analisados pelo método de espectroscopia de emissão óptica. As leituras foram feitas no computador ligado as máquinas de análise na base de um programa (ALPYS).

Determinação do grau de reactividade do ânodo com CO₂

1. Pesou-se 260 g de amostra de ânodo,
2. Lavou-se a amostra com água, para eliminar poeiras,
3. Secou-se a amostra a 120°C±5°C durante 3 horas e pesou-se novamente, sendo este o peso inicial da amostra (M₀), em seguida arrefeceu-se a uma temperatura ambiente,
4. Aqueceu-se o forno até uma temperatura de 960°C, e introduziu-se a amostra,
5. 7 horas depois, retirou-se a amostra do forno, deixou-se esfriar a temperatura ambiente,
6. Em seguida colocou-se na máquina de limpeza, que funciona na base de esferas de aço, durante 20 min onde todas as partículas fracamente ligadas resultados da queima selectiva da matriz ligante são eliminadas, e pesou-se o resíduo restante após a limpeza (M₁).

Os dados obtidos são introduzidos no sistema do computador e este fornece os resultados na forma de percentagens de perda. A preparação da amostra para a determinação do grau de reactividade do ânodo com ar, foi feita seguindo o mesmo procedimento descrito para reactividade do ânodo com CO₂, a diferença é da temperatura e do tempo de reacção. Para o cálculo das percentagens de perda usam-se as seguintes equações:

$$R.R_{CO_2} = \frac{\text{Peso do Residuo}(M_1)}{\text{Peso da amostra}(M_0)} \times 100\% \quad (25)$$

$$R.R_{Ar} = \frac{\text{Peso do Residuo}(M_1)}{\text{Peso da amostra}(M_0)} \times 100\% \quad (26)$$

Na figura 1 e 2 do ANEXO III, estão apresentados os esquemas e equipamentos usados nas análises.

Determinação de sódio e vanádio

1. Pesou-se 250 g da amostra de ânodo de carbono,
2. Moeu-se num moinho de bolas na forma de pó,
3. Tomou-se 100 g da amostra e moeu-se novamente para obter uma granulometria inferior a 850 μm ,
4. Tomou-se 8.8 g de amostra moída e misturou-se com 2.2 g de microwax,

Microwax é uma cera branca que serve de aglomerante com finalidade de ajudar a compactação da amostra. Não ocorre nenhuma reacção entre este e a amostra, simplesmente faz com que a amostra se torne mais consistente.

5. Homogeneizou-se a mistura na turbula,
6. Transferiu-se a mistura para uma cápsula de alumínio onde foi prensada para formar um molde que finalmente analisou-se usando o método de fluorescência de raios-X. Depois da análise, os resultados foram printados automaticamente.

Capítulo V. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Impacto da deficiência de cobertura no consumo do ânodo.

Com a finalidade de minimizar a exposição do ânodo a oxidação pelo oxigênio do ar através da cobertura dos ânodos, usando uma mistura de alumina e banho sólido diferentes características dos ânodos gastos foram observadas, em relação a integridade da cobertura nos potes de teste e de referência durante 27 dias depois do melhoramento da cobertura, comparando as condições ideais de cobertura dos ânodos nos potes de teste (C080 e C081 com cuidados de 5 dias por semana) contra as condições de coberturas convencionais no pote de referência (C079 com cuidados de 1 dia por semana).

5.1.1. Integridade da cobertura dos ânodos na célula eletrolítica

Da inspeção visual da cobertura dos ânodos feita na célula de referência (C079), onde os cuidados do pote são feitos conforme o cronograma normal das operações (uma vez por semana), verificou-se que a integridade da cobertura não é adequada como ilustra a figura 30, em que a oxidação dos ânodos pelo ar é visível (surgimento de chama ao redor do ânodo devido a oxidação do carbono, resultado da deficiência de cobertura) o que significa que o consumo do ânodo é acelerado.



Figura 30. Integridade da cobertura dos ânodos no pote de referência (C079). a) Imagem frontal dos ânodos dentro do pote. b) Imagem lateral dos ânodos dentro pote.

Da inspeção visual de cobertura, feita nas células de teste (C080,C081), onde os cuidados foram feitos 5 dias por semana, verificou-se que a integridade da cobertura é muito adequada, em que a exposição do ânodo é invisível como ilustra a figura 31, sendo deste modo o consumo do ânodo pouco acelerado.



Figura 31. Integridade da cobertura dos ânodos nos potes de teste. a) Imagem do pote C080. b) Imagem do pote C081.

5.1.2. Características físicas dos ânodos gastos removidos da célula electrolítica

A partir dos ânodos gastos removidos das células electrolíticas, diferentes casos resultantes da cobertura foram observados nos ânodos de teste e de referência.

No caso da cobertura em excesso, quando o material for drenado em maiores quantidades na superfície do ânodo (figura 32-a) isto causa superaquecimento dos pinos e dos hexápodes do ânodo pois não existe dissipação do calor durante a passagem da corrente, causando rachas, exposição dos pinos devido a quebra dos blocos de carbono (figura 32-b). Este caso é característico dos ânodos do pote referência C079.

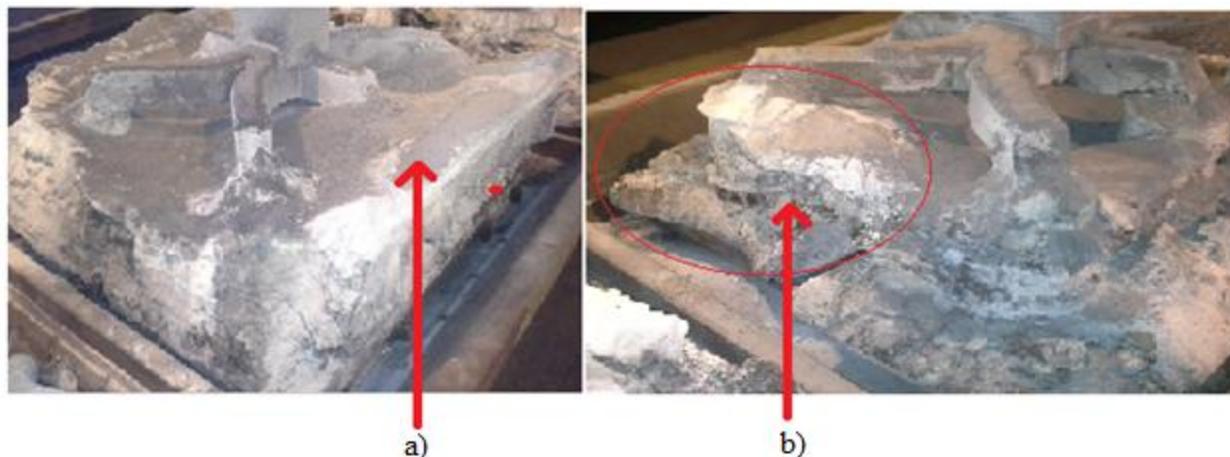


Figura 32. Efeito do excesso de cobertura dos ânodos. a) Imagem do ânodo com cobertura em excesso. b) Bloco de carbono quebrado em consequência da cobertura em excesso.

A maior causa do consumo parasítico de carbono é devido ao atraso de cobertura do ânodo 4 horas depois de ser introduzido no pote, isto origina grandes cavidades na superfície do ânodo (figura 33-b) aumentando a exposição dos pinos (figura 33-a). Este caso é característico dos ânodos do pote referência C079.

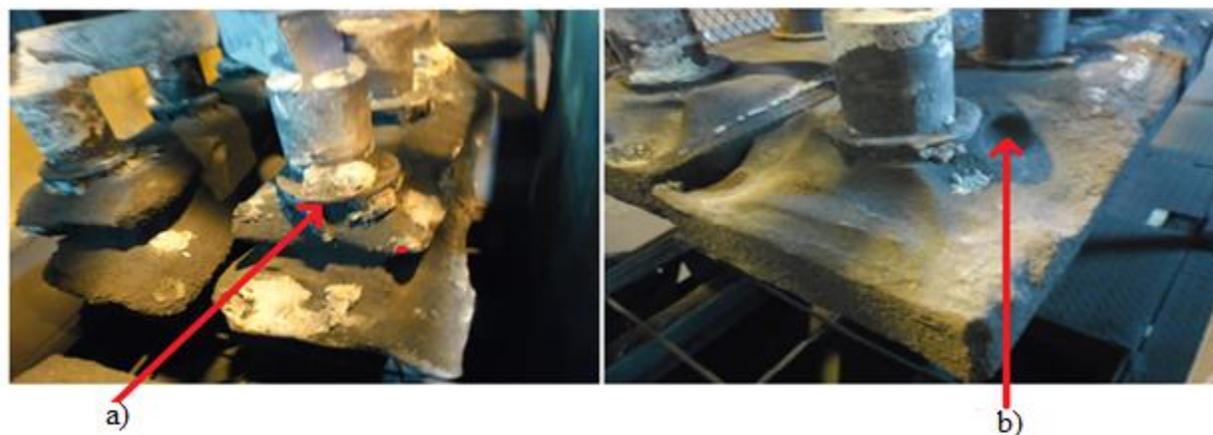


Figura 33. Impacto do atraso da cobertura dos ânodos. a) e b) ânodos oxidados.

A instabilidade da célula electrolítica, causada pela troca não adequada de ânodos, influencia na movimentação, reposição dos ânodos. Estes movimentos destroem a camada de material de cobertura ao redor dos ânodos imersos, expondo o ânodo a oxidação do ar. O ânodo exposto ao ar e devido aos movimentos para o ajuste dos ânodos, é mais consumido nos cantos, onde há maior possibilidade da destruição do material de cobertura (figura 34-a-b-c).

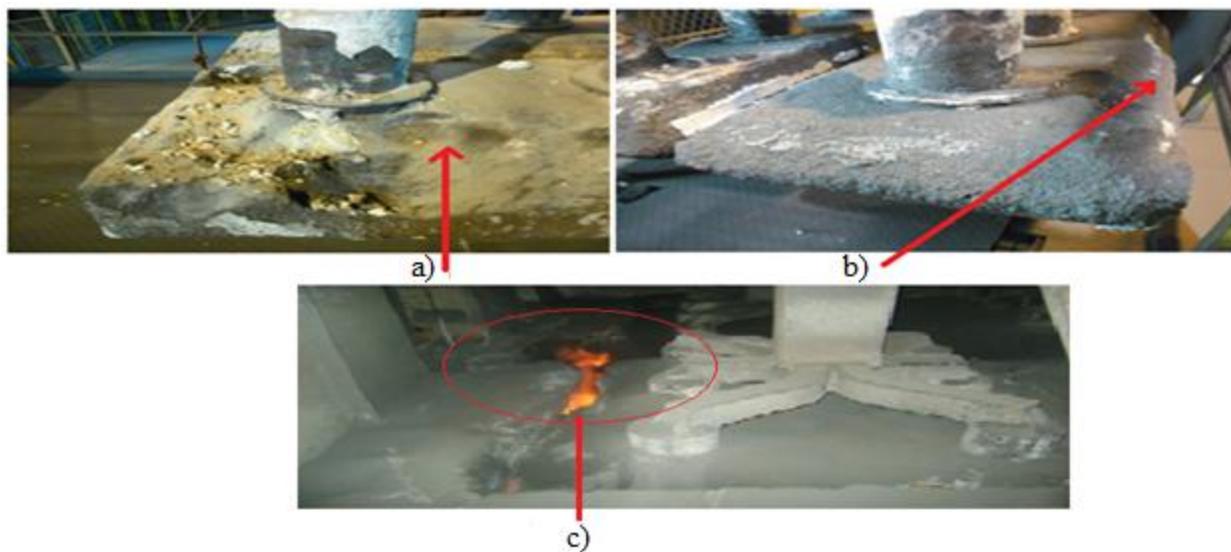


Figura 34. Impacto dos movimentos operacionais na cobertura dos ânodos e consequente oxidação por reações parasíticas. a),b),c) Ânodo oxidado com oxigênio devido aos movimentos.

Este caso é característico dos ânodos de referência C079.

Para avaliar o efeito da deficiência de cobertura dos ânodos em comparação com as condições melhoradas de cobertura, os potes de teste foram cobertos e monitorados de modo a evitar os casos referidos. No entanto, a cobertura é considerada adequada, quando a distância entre os hexápodes e a superfície do material for de 12 cm, como demonstra a figura 35-a. Isto permite a dissipação do calor quando ânodo alcançar a temperatura do banho, diminuindo a possibilidade de quebra de blocos e oxidação (figura 35-b). Este caso é característico dos ânodos dos potes de teste.



Figura 35. Ânodos com cobertura adequada (a) e ânodo gasto sem oxidação (b).

5.1.3. Resultados do estudo do efeito de cobertura dos ânodos nos parâmetros de controlo de processo.

Com o objectivo de avaliar a impacto da operação da troca e cobertura de ânodos na variação da altura do banho, temperatura do banho foram feitas as medições num período de 27 dias antes, durante e depois da troca de ânodos e melhoramento das práticas de cobertura nos potes de teste C080 e C081. A tabela com os resultados das medições dos parâmetros acima referidos está apresentada nas tabelas A, B, C, D, E, F) do ANEXO II- nos três períodos de estudo.

5.1.3.1. Altura do banho

Maior quantidade de banho no pote destroi a camada de proteção dado ao pote e aumenta a possibilidade de ataque dos pinos, menor quantidade de banho na célula electrolitica causa fraca dissolução da alumina que se deposita na superfície do cátodo, originando lama. Esta fraca dissolução conduz ao pote a uma instabilidade. Portanto, fez-se o controlo da altura do banho para verificar o desempenho da célula durante o experimento. Mediu-se a altura do banho e calculou-se a média dos valores de 27 dias, antes, durante, depois da operação de troca e cobertura dos ânodos por pote e representou-se graficamente os resultados na figura 36:

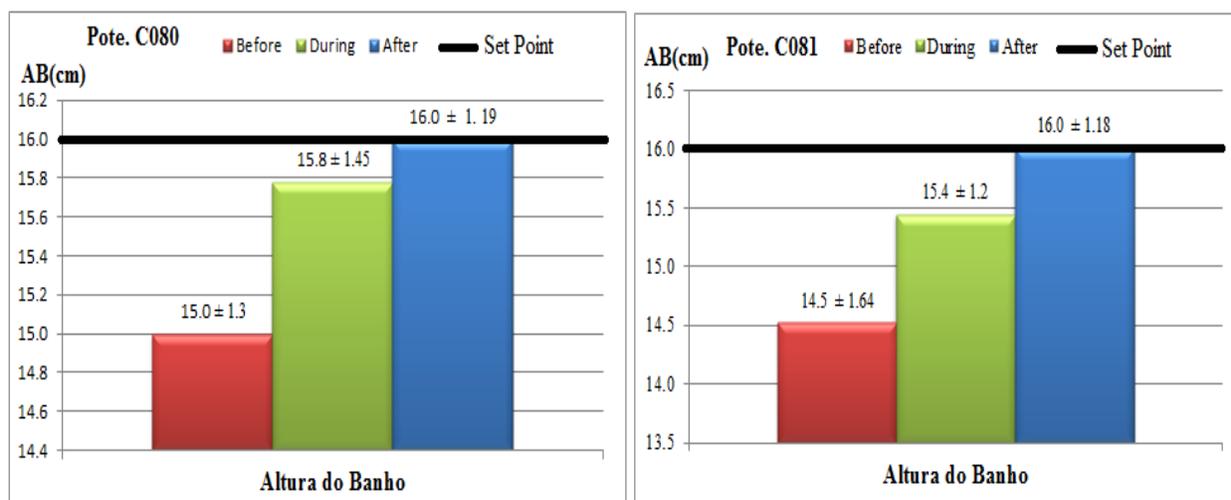


Figura 36. Gráfico de variação da altura do banho 27 dias antes, durante, e depois do melhoramento da cobertura nos potes de teste. A linha preta indica o limite aceitável para este parâmetro.

Do gráfico verifica-se que a altura do banho 27 dias, durante e depois do melhoramento em ambos os potes encontrava-se dentro de limite aceitável, Para a melhor operação da célula electrolítica o banho não pode ser superior a 16 cm porque ataca os pinos, ném inferior a 13 cm pois causa fraca dissolução da alumina.

5.1.4. Temperatura do banho

A variação da temperatura do banho é justificada pela troca de calor entre o meio mais quente (banho) e meio mais frio (ânodo novo) e a cobertura além de proteger o ânodo também serve para diminuir as perdas de calor. Na figura 37 é apresentado o gráfico comparativo da temperatura do banho por pote 27 dias antes, durante e depois da operação de troca e melhoramento da cobertura dos ânodos.

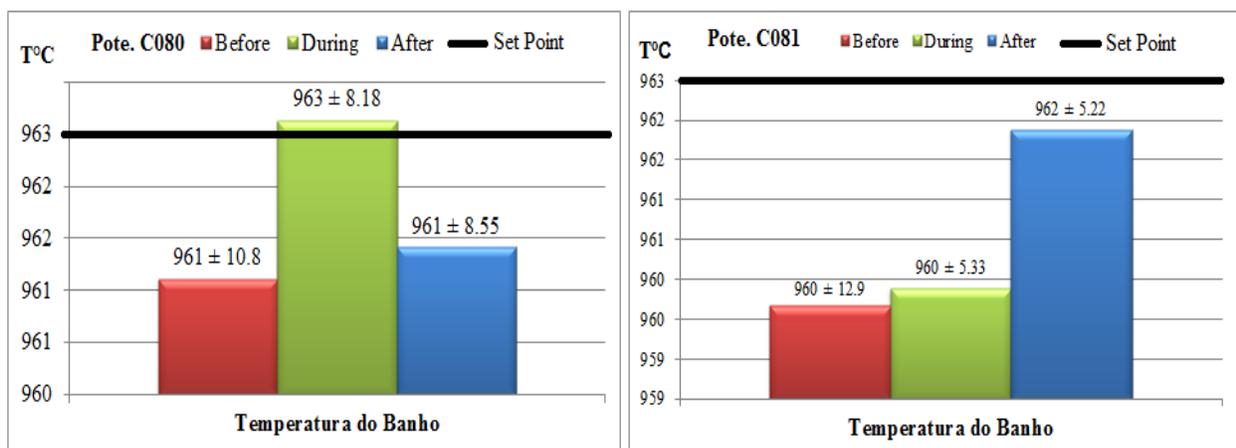


Figura 37. Gráfico que representa a variação da temperatura do banho 27 dias antes, durante, e depois do melhoramento da cobertura pote (C080, C081).

Para os três períodos a temperatura do banho nos dois potes (C80 e C081) é aceitável, pois uma célula electrolítica em operação é considerada fria, quando a temperatura estiver abaixo de 950 °C e quente, quando a temperatura variar muito acima de 963°C. Para melhor desempenho da célula electrolítica a tempertaura óptima é de 963°C.

5.1.5. Impacto da cobertura na contaminação do alumínio pelo ferro.

Um dos parâmetros mais críticos na qualidade do alumínio fundido é o teor de ferro. O limite máximo aceitável para o alumínio primário é de 800 ppm segundo os padrões de qualidade usados pela fábrica.

O propósito desta análise neste experimento é para verificar a variação do teor de ferro depois da melhoria da cobertura, uma vez que nessas células o teor de ferro encontra-se muito acima do limite padrão e sendo potes com menos de 1 ano de vida esperava-se que o teor de ferro estivesse abaixo do limite. Os dados colhidos das análises estão apresentados nas tabelas A, B, C, D, E, F do ANEXO II- Os resultados estão representados graficamente na figura 38:

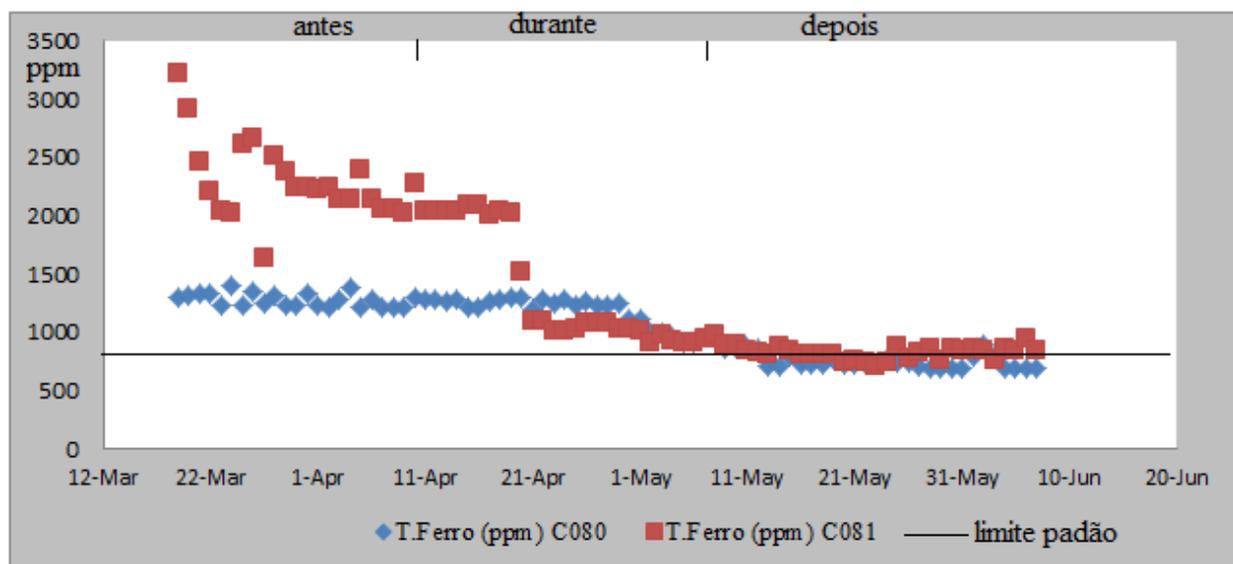


Figura 38. Gráfico de variação do teor de ferro durante o tempo.

Do gráfico observa-se que, do estudo realizado a quantidade do teor ferro tornou-se próximo do limite aceitável em comparação com os períodos antes da melhoria das práticas de cobertura. Isto é atribuído como resultado da maior integridade da cobertura dos ânodos nos potes de teste, devido a maior frequência dos cuidados á cobertura dos ânodos.

5.2. Impacto da oxidação do carbono pelo ar no peso dos ânodos gastos

Em condições de operação óptimas, um ânodo gasto, removido da célula electrolítica depois do seu tempo de vida, tem em média 190 - 200 kg de peso por bloco e 390 – 410 kg de peso por ânodo. Durante os ensaios tecnológicos foram pesados 7 assenbleias de ânodos gastos “butts” por cada pote, nas células de teste (C081, C080) e de referência (C079). Os dados obtidos das medições, estão apresentados na tabela A do ANEXO I. Os resultados dos pesos médios dos ânodos por pote, estão representados graficamente na figura 39:

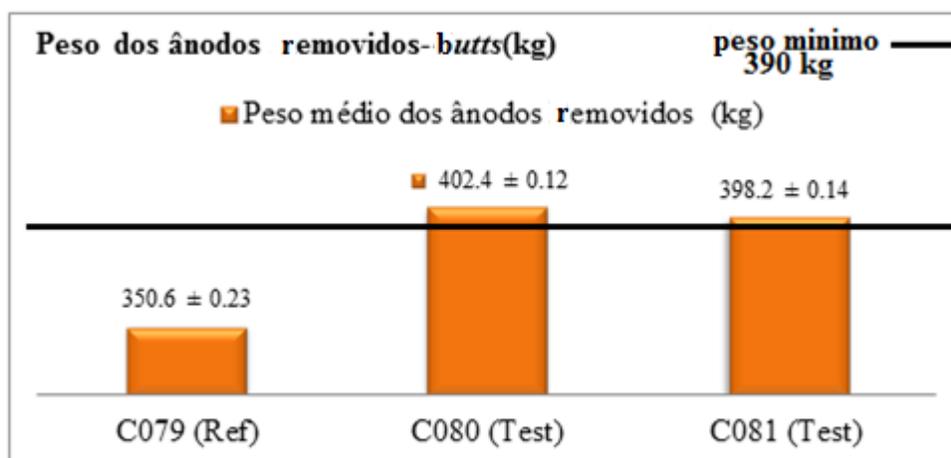


Figura 39. Gráfico do impacto da oxidação no peso dos ânodos gastos.

Pelo gráfico da figura 39, verifica-se que o peso médio dos ânodos gastos dos potes de teste, com cobertura adequada encontra-se dentro dos limites especificados relativamente ao pote de referência. Isto porque a oxidação pelo oxigénio do ar contribui na diminuição do peso do ânodo gasto.



Figura 40. Impacto da oxidação no peso do ânodo gasto: a) ânodo oxidado (pote de referência). b) Ânodo não oxidado (potes de teste).

5.3. Impacto da oxidação do carbono na espessura dos ânodos e "underpin"

A espessura mínima dos ânodos gastos com cobertura adequada, durante o seu tempo de vida na célula electrolítica é de 170 mm, quando este é inferior ao valor especificado, existe maior possibilidade de o banho tocar os pinos dos ânodos. Os dados obtidos das medições estão apresentados na tabela C do ANEXO I. Os resultados das medições estão apresentados graficamente na figura 41.

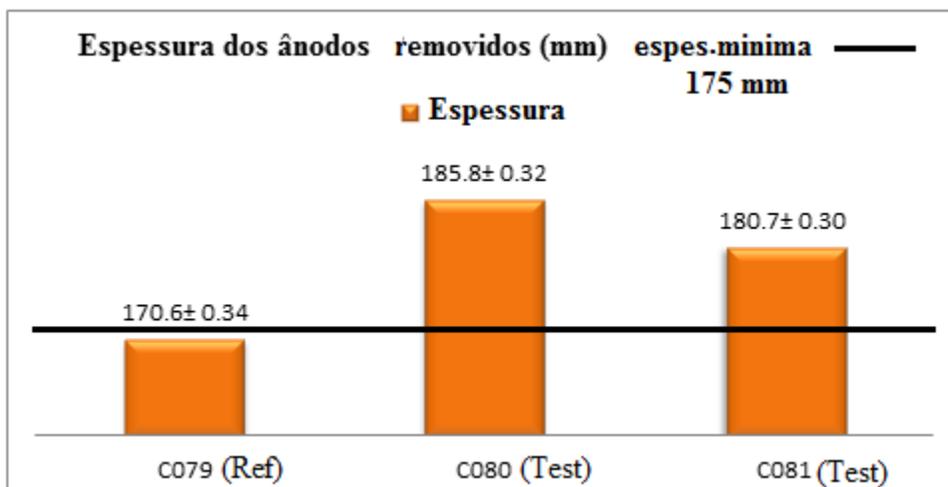


Figura 41. Gráfico do impacto da oxidação do carbono na espessura dos ânodos gastos.



Figura 42. Imagem do impacto da oxidação de carbono na espessura dos ânodos. a) Ânodo com espessura reduzida. b) Ânodo com espessura maior espessura de proteção dos pinos.

Pelo gráfico da figura 41 verifica-se que a espessura média dos ânodos removidos das células de teste encontra-se acima do valor mínimo aceite, em comparação com os ânodos removidos do

pote de referência. Isto significa que com cobertura adequada pode se obter ânodos com maior espessura de proteção (figura 42-b), contra o ataque dos pinos pelo banho electrolítico.

5.4. Impacto da oxidação no underpin

Underpin é a distância entre a superfície inferior de um ânodo gasto até a parte inferior dos pinos como demonstra a figura 43.



Figura 43. Imagem que ilustra o impacto da oxidação do ar no underpin.

Das observações feitas no local de estudo, constatou-se que quando o valor do underpin for menor que 55 mm (figura 43), existe maior possibilidade de os pinos tocarem o banho durante os seus últimos dias no pote e conseqüente contaminação do alumínio quando este não estiver bem coberto, pois aumenta a sua exposição ao banho electrolítico. Os dados obtidos dos cálculos estão apresentados na tabela C do ANEXO I. Os resultados foram representados graficamente na figura 44.

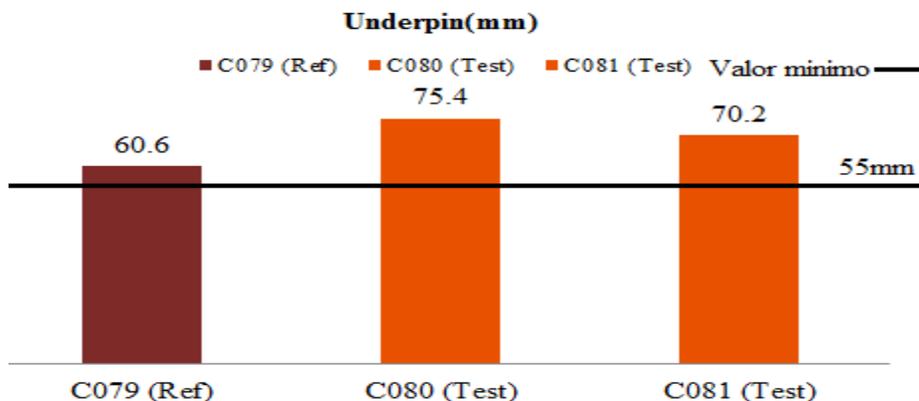


Figura 44. Gráfico do impacto da oxidação do ar no underpin dos ânodos removidos.

Pelo gráfico da figura 44 verifica-se que os potes de teste possuem maior valor de underpin em comparação com o pote de referência. Este gráfico demonstra a relação entre a cobertura adequada e a espessura dos ânodos gastos, pois ambos contribuem no valor de underpin.

5.5. Impacto da oxidação na quantidade de carbono consumido por tonelada de alumínio

(Net Carbon)

Através dos pesos obtidos dos ânodos gastos e dos ânodos novos, usando as equações 22 e 23, determinou-se a quantidade do carbono consumido por tonelada de alumínio e comparou-se com a quantidade de carbono teoricamente esperada para produzir uma tonelada de alumínio em condições óptimas de operação e eficiência da corrente. Os dados obtidos nos cálculos de net carbon estão apresentados na tabela D do ANEXO I. Os resultados dos cálculos estão apresentados graficamente na figura 45.

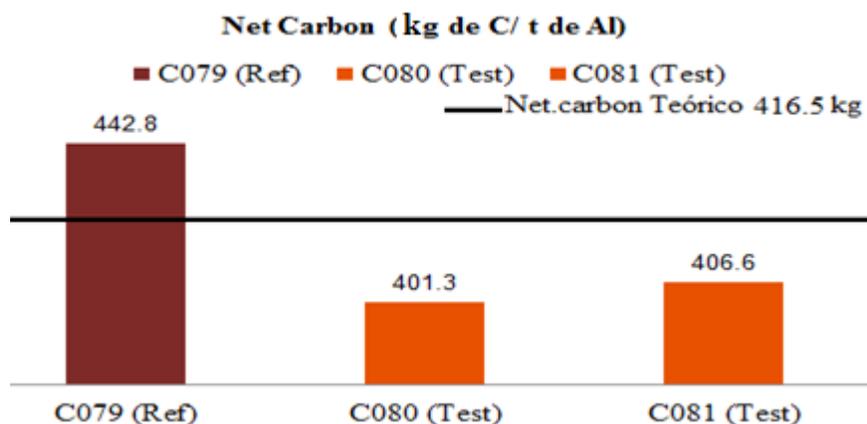


Figura 45. Gráfico da quantidade de carbono consumido por tonelada de alumínio em cada pote.

Pelo gráfico da figura 45 verifica-se que o carbono consumido para produzir uma tonelada de alumínio no pote de referência é superior ao carbono teoricamente, esperado em comparação com os potes de teste, com net carbon inferior ao teórico, comparando com os potes de teste cujo consumo encontra-se abaixo do limite teórico. Isto porque a oxidação do carbono por oxigênio do ar e dióxido carbono influencia na diminuição do carbono que participa na reacção electroquímica de obtenção de alumínio quando a cobertura não é adequada.

5.6. Quantidade de carbono consumido por oxidação do ar e dióxido de carbono

A cobertura do ânodo além de diminuir a exposição do ânodo ao ar e dos pinos no banho contribui também na diminuição da superfície da reacção do dióxido de carbono gerado electroquimicamente com o ânodo, pois quando este é oxidado pelo oxigénio do ar aumenta a porosidade do ânodo admitindo o dióxido de carbono fluir pelos poros do ânodo há uma temperatura e pressão do banho electrolítico favorável.

A partir dos resultados do net carbon e do peso dos ânodos gastos calculou-se a quantidade de carbono consumido pelas duas reacções parasíticas. Os dados dos cálculos estão apresentados na tabela D, E do ANEXO I. Os resultados são representados graficamente na figura 46:

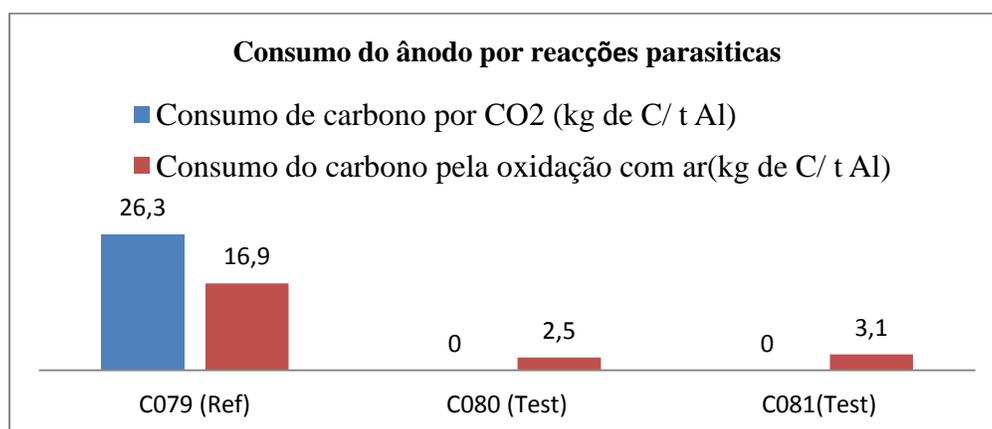


Figura 46. Gráfico do impacto das reacções parasíticas no consumo do ânodo.

5.7. Contribuição das reacções parasíticas no consumo total do ânodo de carbono

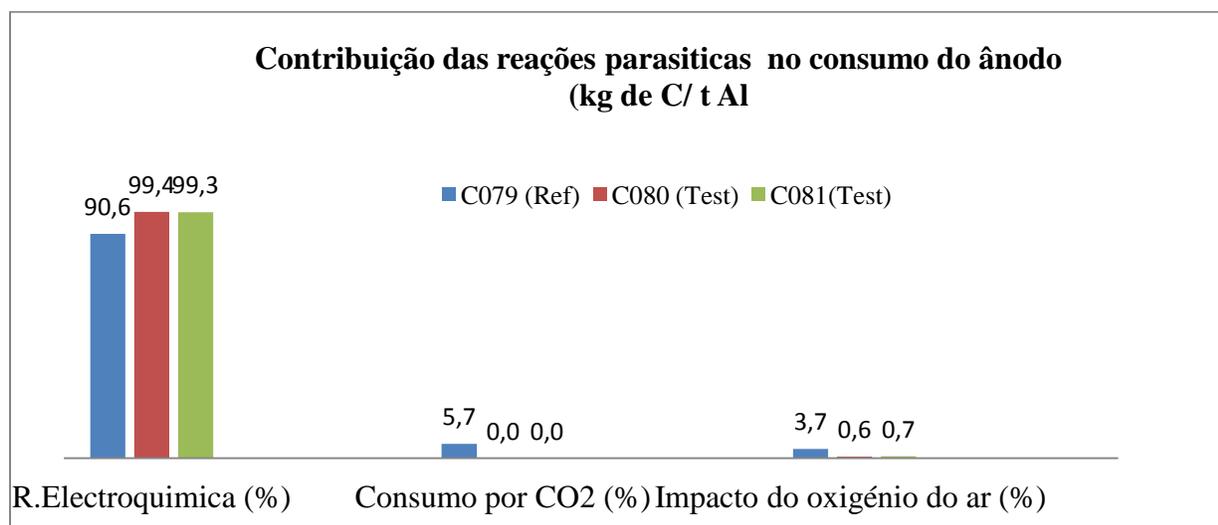


Figura 47. Gráfico da contribuição das reacções parasíticas no consumo total do ânodo.

Pelos gráficos das figuras 46 e 47 verifica-se que o impacto do CO₂ e do oxigénio do ar no consumo do ânodo é muito significativo para o pote de referência (barra azul), onde a cobertura não foi melhorada em comparação com os potes de cobertura adequada (barra verde e vermelha), onde quantidade de carbono consumido, é insignificante.

5.8. Determinação da reactividade do ânodo.

Os dados das análises da reactividade dos ânodos, feitas no local de estudo estão apresetados na tabela A do ANEXO III, estes dados correspondem ao valor médio das análises feitas para os ânodos produzidos no respectivo dia. Os resultados foram representados em gráficos (figura 48 para reactividade do ar) e comparados com os limites aceitáveis pela norma ISO apresentados na tabela B do ANEXO III.

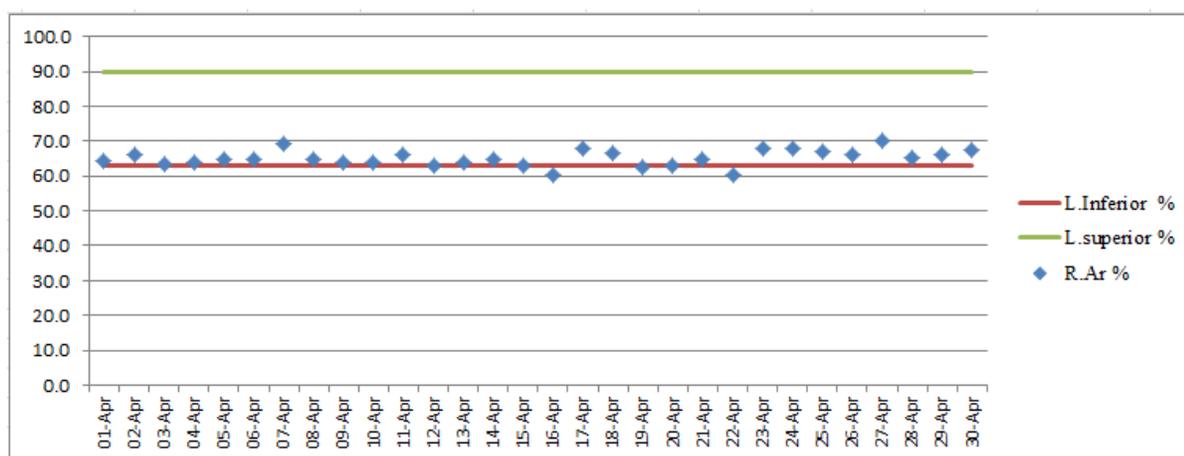


Figura 48. Gráfico do comportamento da reactividade do ânodo de carbono com oxigénio.

A partir do gráfico, verifica-se que os valores do grau de reactividade do ar com ânodo encontram-se dentro dos limites estabelecidos, pelos resultados percebe-se que a reactividade do ânodo com oxigénio do ar é aceitável, apesar de apresentar uma variação mais próxima ao limite inferior, isto pode ser relacionado ao efeito catalítico do vanádio, cujo seu teor varia mais próximo ao limite superior (Figura 49).

5.9. Determinação do teor de vanádio e sódio

O teor de vanádio e sódio foi determinado por espectrometria de fluorescência de Raios-X. Sendo o vanádio catalisador da reacção do ar com ânodo verificou-se o seu comportamento durante o tempo de estudo. Os resultados das análises estão apresentados na tabela A do ANEXO III, e representados graficamente na figura 49 para o teor de vanádio:

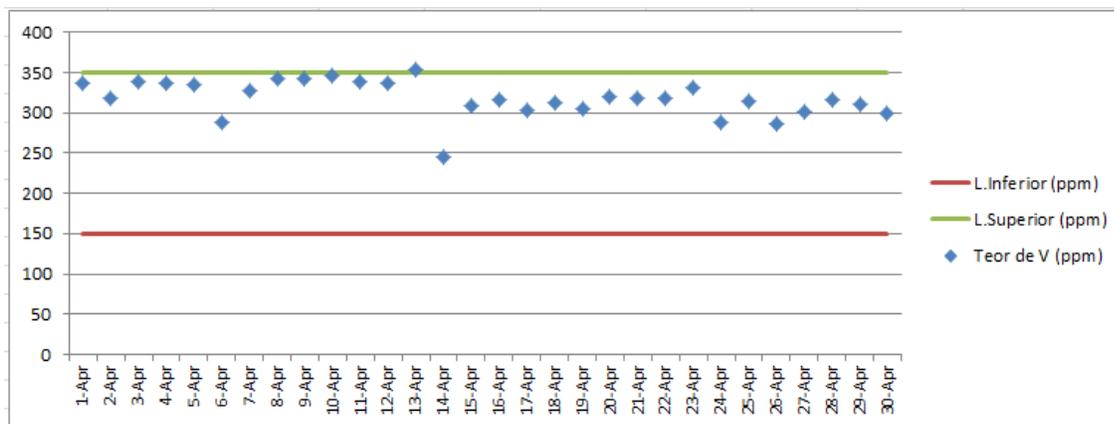


Figura 49. Gráfico do comportamento do teor de vanádio no ânodo de carbono.

A partir do gráfico da figura 49 verifica-se que o teor de vanádio encontra-se dentro dos limites estabelecidos com uma variação mais próxima ao seu limite máximo aceitável.

5.10. Determinação do grau de reactividade do ânodo com dióxido de carbono.

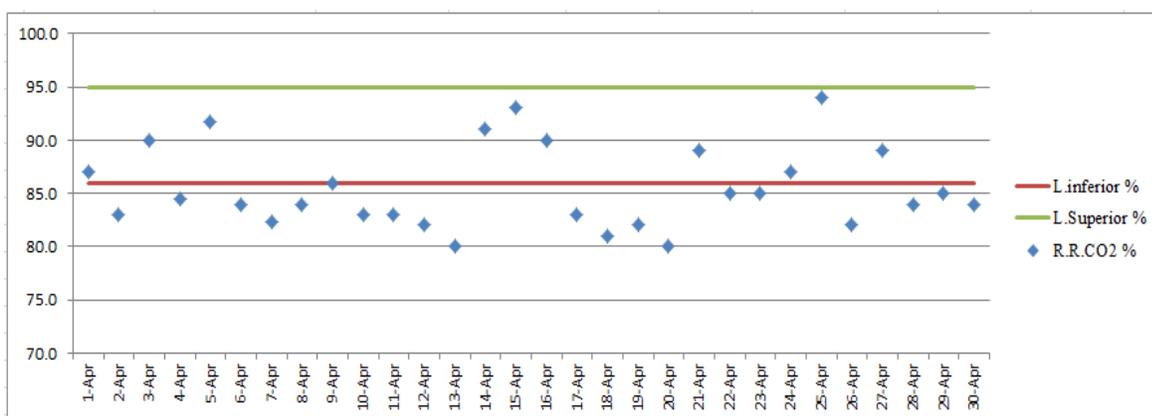


Figura 50. Gráfico do comportamento da reactividade do ânodo de carbono com dióxido de carbono.

Pelo gráfico figura 50, verifica-se que a maior parte dos valores do grau de reactividade do dióxido de carbono com ânodo encontram-se fora dos limites estabelecidos, com uma maior dispersão entorno do limite inferior, o que significa que há maior oxidação do ânodo. Isto pode ser relacionado com o efeito catalítico do sódio, em que o seu teor durante este período variava muito acima do limite superior como mostra o gráfico da figura 51.

5.11 Determinação do teor de sódio

O sódio tem maior acção catalítica na reacção do ânodo com CO_2 , para o efeito verificou-se o seu comportamento nos ânodos de estudo. Os resultados das análises estão representados graficamente na figura 51.

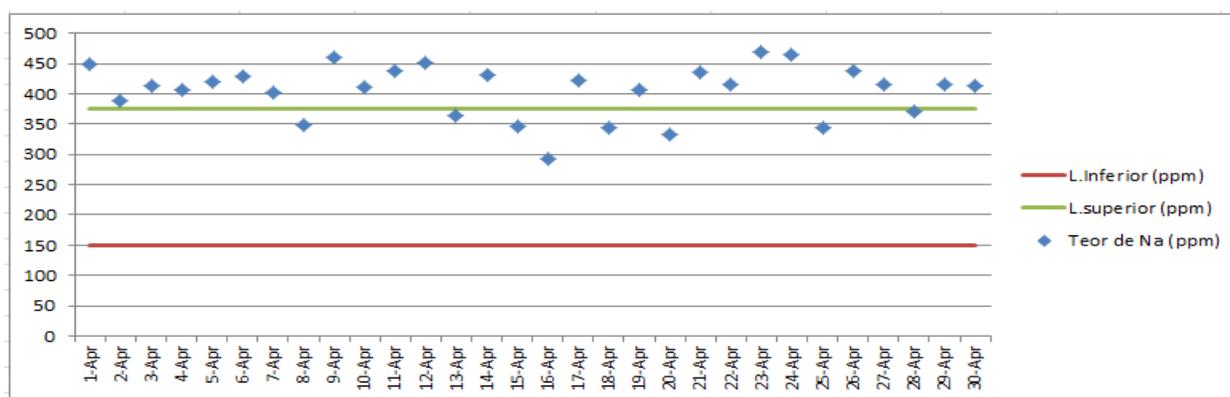


Figura 51. Gráfico do comportamento do teor de sódio no ânodo de carbono.

A partir do gráfico da figura 51 verifica-se que o teor sódio varia mais acima do seu limite superior. Na base dos resultados pode-se constatar que quando o teor de sódio é elevado, há maior possibilidade da oxidação do ânodo com dióxido de carbono.

Capítulo VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

No trabalho foi avaliado o impacto das reacções parasíticas no consumo de ânodo de carbono em condições de cobertura melhoradas, convencionais e constatou-se que:

A cobertura não adequada (deficiência) dos ânodos influencia na quantidade de carbono total consumido devido oxidação parasítica, e proporciona maior exposição dos pinos dos ânodos ao banho electrolítico.

Após 27 dias de execução consistente da melhoria das boas práticas de cobertura dos potes de teste, a condição de cobertura dos ânodos mostrou uma boa integridade até ao final do ciclo de vida do ânodo, em relação aos ânodos do pote de referência com cuidados feitos conforme o cronograma das operações. O teor de ferro mostrou uma melhoria sustentada para os potes de teste comparando com o período antes e depois do melhoramento das práticas de cobertura.

A quantidade de carbono consumido devido a oxidação com ar e dióxido de carbono é maior para os ânodos com deficiência de cobertura, com 3.7% (ânodos com deficiência de cobertura), 0.6-0.7% (ânodos com cobertura adequada) de carbono total consumido por tonelada de alumínio devido a oxidação com ar, 5.7% (ânodos com deficiência de cobertura) de carbono consumido devido a oxidação com dióxido de carbono por tonelada de alumínio, sendo o consumo por este insignificante para os ânodos com cobertura adequada.

Na base dos resultados do teste de reactividade do ânodo relacionando com o efeito catalítico do sódio e vanádio pode se constatar que quando o teor de sódio é elevado, há maior possibilidade da oxidação do ânodo com dióxido de carbono em comparação com o teor de vanádio, que influencia na oxidação com oxigénio do ar.

Do estudo conclui-se que a operação de cobertura dos ânodos, é o principal vector pelo qual o ânodo de carbono é consumido pelas reacções parasíticas, o melhoramento da qualidade das operações de cobertura dos ânodos pode diminuir o consumo excessivo de carbono, através dos resultados do obtidos do estudo, pode se constatar que, quando a cobertura é adequada, poupa-se uma quantidade considerável de carbono que é consumido em excesso, em condições de cobertura deficientes.

6.2 RECOMENDAÇÕES

- ✓ Recomenda-se o cumprimento adequado do plano de cobertura dos ânodos após a sua imersão (4 horas depois - primeira cobertura, 24 horas depois - segunda cobertura) na célula electrolítica, pois quando há atrasos na cobertura o ânodo é rapidamente consumido.
- ✓ Recomenda-se verificar a cobertura depois de movimentar os ânodos por razões de troca de ânodos não adequada, pois estes movimentos destroem o material de cobertura nos lados do ânodo quebrando a crosta do banho e permitindo a penetração do ar.
- ✓ Recomenda-se a realização de mais estudos aumentando o tamanho da amostra para obter maior reprodutibilidade dos resultados, sobre o impacto dessas reacções combinando vários procedimentos experimentais, como estudo da variação do tamanho poros do ânodo gasto, como medida directa da oxidação do ânodo com dióxido de carbono.
- ✓ Recomenda-se fazer estudo mais profundos de outros factores que contribuem no consumo dos ânodos, tais como polarização dos ânodos, e migração dos iões.

BIBLIOGRAFIA

- ✓ Batista, Jefferson dos santos; Silveira, Benedito Inacio. (2008). *Influence of the sodium content on the reactivity of carbon anodes*. Red area management. Alumínio do Norte do Brasil S.A, Alunorte. Faculty of chemical engineering. Federal university of Pará.
- ✓ Bungallah, Baltazar.B. (2006). *Determinação de ferro e sódio em amostras de alumina fluorinada por fluorescência de Raios-x*. Trabalho de Licenciatura. U.E.M. Departamento de Química. Maputo.
- ✓ Cowie, peter. (1988). Mozal News, 1st edition. Maputo,
- ✓ Cumbane, A.A. (2000). *Aplicação da espectroscopia de emissão óptica na determinação de impurezas no metal alumínio*. Trabalho de Licenciatura. U.E.M. Departamento de Química. Maputo.
- ✓ Chitaca, Feniase.E. (2012). *Desenvolvimento do método potenciométrico para determinação de fluoretos em amostras de banho electrolítico*. Trabalho de Licenciatura. U.E.M. Departamento de Química. Maputo.
- ✓ Edwards, Les.C. (sem ano). Responding to changes in coke quality. CII carbon LLC. 2627 chestnut. Ridge Rd. Kingwood. TX77339.
- ✓ Fotine, P.A. (2000). *Avaliação do limite de detecção do método de difracção de raios-X na determinação do trifluoreto de alumínio em amostras de uma solução electrolítica*. Trabalho de Licenciatura. U.E.M. Departamento de Química. Maputo.
- ✓ Glinka, N. (1984). Química geral. Vol 2. Editora Mir. Moscovo.
- ✓ Glinka, N. (1984). Química Geral. Vol 1. Editora Mir. Moscovo.
- ✓ Grjothein, k; Krohn, C; Malinovsky, M; Matisovsky, K. and Thonstad, j. (1982). *Aluminium electrolysis-Fundamentals of the Hall-Heroult process*. 2nd edition, Aluminium Verlag. Dusseldorf.
- ✓ Grjothein, K. and Welch, B.J. (1988). *Aluminium Smelter Technology - A Pure and applied approach*. 2nd edition. Aluminium Verlag. Dusseldorf
- ✓ Grjothein, Kai; Welch, Barryj j. (2001). *Aluminium smelter technology-theory and practice*. Centre for electrochemistry, mineral processing university of New South Wales. Sydeney Australia. Revision in progress.
- ✓ Grjothein, k; kvande, H. (1993). *Introduction to aluminium electrolysis*. 2nd edition. Aluminium Verlag. Germany

- ✓ Lee, Jun.M; Baker, James.j. (sem ano). *Characterization of green and calcined coke properties used for aluminium anode grade carbon.*
- ✓ Skoog, et al. (1998). *Princípios de Análise Instrumental*. 5ª edição. pp 26-39.
- ✓ Skoog, et al. (1995). *Fundamentos de Química Analítica*. 8ª edição Norte Americana. pp 554-558.
- ✓ Macuacua, A.E. (2000). *Estudo do desempenho do espectrofotômetro de fluorescência de raios-x na determinação de impurezas no coque*. Trabalho de Licenciatura. U.E.M. Departamento de Química. Maputo.
- ✓ Mozal Reduction Technical Training document, process specialist. (2012). *Measurements 4 shift Measurement's operators*, nr. TRM000479. Revision 2.
- ✓ Mozal reduction technical training document, process specialist. (2012). *Definition and Major Equilibrium* - TRM 100024, Revision 1.
- ✓ Mozal Reduction Technical Training document, process specialist. (2012). *Treatment of impossible Anode effects*. TRM000472. Revision 2.
- ✓ Mozal Reduction Technical Training document. (2012). process specialist, *Measurement for measurements operators*. TRM000474. Revision 2.
- ✓ Mozal BO-RA-0001. (2011). *Anode Change*. Revision 4.
- ✓ Mozal B0-RA-002 (2008). *Anode Covering*. Reduction production. Revision 4.
- ✓ Mozal B0-RA-002. *Impossible Anode effects*. Treatment Reduction Production. Revision 5.
- ✓ Mozal BO-RP-0030. *Thermal Regulation intervention*. (2010). Revision 3.
- ✓ Mozal (2011): Best Operations Procedure. *Bath temperatures measurement*. BO-RP-0041.
- ✓ Mozal (2011): Best Operations Procedure. *Bath and metal height measurements*. BO-RP-0024.

ANEXOS

ANEXO I

1. Tabela A - Resultados obtidos na pesagem dos ânodos gastos.

		C079 (Ref)			C080 (Test)			C081 (Test)		
Assbl.	Nº. do Bloco	Peso do ânodo novo kg	Peso do butt Kg	Carbono total consumido kg	Peso do ânodo novo kg	Peso do butt kg	Carbono total consumido kg	Peso do ânodo novo Kg	Peso do butt kg	Carbono total consumido kg
1	1	1926	350.1	1575.9	1925.4	400.0	1525.4	1926.0	396.7	1529.3
	2									
2	3	1926	356.2	1569.8	1926.3	399.5	1526.8	1926.0	398.6	1527.4
	4									
3	5	1925	344.1	1580.9	1924	398.7	1525.3	1926.0	395.6	1530.4
	6									
4	7	1924	353.2	1570.8	1925.2	404.5	1520.7	1925.4	398.5	1526.9
	8									
5	9	1926	357.1	1568.9	1924.4	395.9	1528.5	1925.3	395.4	1529.9
	10									
6	11	1926	345.2	1580.8	1926.3	400.5	1525.8	1924.6	396.5	1528.1
	12									
7	13	1925.1	355.1	1569.9	1926.2	403.5	1522.7	1925.6	395.6	1530
Média		1925.4	351.6	1573.9	1925.4	400.4	1525.0	1925.6	396.7	1528.9

*Um ânodo possui dois blocos de carbono (assembleia de ânodos), os pesos indicados na tabela correspondem a dois blocos de carbono.

2. Tabela B - Quantidade do metal produzido por pote.

Nr.Pote	Metal produzido (kg)	Metal produzido (kg)
	(Durante 27 dias)	(Por dia)
C079 (Ref)	71080	2632.6
C080 (Test)	76000	2814.8
C081 (Test)	75200	2785.2

3. Tabela C - Resultados obtidos na medição da espessura e cálculo do underpin

Peso dos ânodos gastos (kg)					Espessura (mm)			Underpin (mm)		
Ânodo	Nr. Bloco	C079	C080	C081	C079	C080	C081	C079	C080	C081
		(Ref)	(Test)	(Test)	(Ref)	(Test)	(Test)	(Ref)	(Test)	(Test)
1	1	350.1	400	396.7	174	175	184.5	59	60	69.5
	2									
2	3	356.2	399.5	398.6	176	203.5	189	61	88.5	74
	4									
3	5	344.1	398.7	395.6	175	165.5	171	60	66	56
	6									
4	7	353.2	404.5	398.5	185.5	197	201	70.5	82	86
	8									
5	9	357.1	395.9	395.4	162.5	200	186	47.5	85	71
	10									
6	11	345.2	400.5	396.5	167	168	167.5	52	70	68
	12									
7	13	355.1	403.5	395.6	189	191.5	166	74	76.5	67
Média		351.6	400.4	396.7	175.6	190.3	185.3	60.6	75.4	70.2

Fórmula usada para o cálculo do underpin:

Underpin = Espessura - 115mm

4. Tabela D- Resultados do cálculo do net carbon e quantidade carbono consumido por oxidação com dióxido de carbono.

	C079 (Ref)	C080 (Test)	C081 (Test)
Consumo médio por ânodo (kg)	1573.9	1525	1528.9
Consumo total por pote (kg)	31477.1	30500.6	30577.1
Duração do teste (dias)	27	27	27
Produção de alumínio por dia (kg)	2632.6	2814.8	2785.2
Net carbon (prático) (kg de C/ t de Al)	442.8	401.3	406.6
Net carbon (teórico) (kg de C/ t de Al)	416.5	416.5	416.5
Consumo de carbono por CO ₂ (kg de C/ t Al)	26.3	*	*

*O net carbon prático é inferior em relação ao net carbon teórico, isto significa que os potes de teste alcançaram a eficiência máxima em termos de carbono que participa na reacção electroquímica de obtenção de alumínio, daí que o consumo de carbono por CO₂ é insignificante.

5. Tabela E - Resultados do cálculo do net carbon e quantidade de carbono consumido por oxidação com oxigénio do ar.

	C079 (Ref)	C080 (Test)	C081 (Test)
Peso médio do butt (kg)	350.1	400.5	398.2
Peso esperado por butt (kg)	410	410	410
Duração do teste (dias)	27	27	27
Produção de alumínio por dia (kg)	2632.6	2814.8	2785.2
Consumo médio do ânodo (oxidação com ar) (kg)	59.9	9.5	11.8
Consumo do ânodo por pot (kg) (oxidação.ar)	1198	190	236
Consumo do ânodo kg/ t de Al (oxidação com ar) (kg)	16.9	2.5	3.1

Fórmulas usadas para o cálculo do net carbon:

a) Quantidade de carbono total consumido na célula electrolítica:

$$\text{Consumo Total por Pote} = 20 \text{ ânodos} \times \text{Consumo médio por ânodo}$$

b) Quantidade de carbono consumido por tonelada de alumínio.

$$\text{Net Carbon (Prático)} = \frac{\text{Consumo total por pote}}{(\text{kg de Al produzido por dia} \times 27 \text{ dias}) / 1000}$$

c) Quantidade de carbono consumido por oxidação com dióxido de carbono

$$\text{Consumo de carbono por CO}_2 = \text{Net Carbon prático} - \text{Net Carbon teórico}$$

ANEXO II

6. Tabela A - Resultados dos parâmetros de controlo do pote (C080) - 27 dias antes do melhoramento da cobertura.

Data	Alt.banho (cm)	Temperatura (°C)	Teor de Ferro (ppm)
19-Março	12.0	960.0	1200.0
20-Março	15.0	960.0	1320.0
21- Março	15.0	950.0	1332.0
22- Março	14.0	953.0	1225.0
23- Março	14.0	953.0	1225.0
24- Março	13.0	980.0	1296.0
25- Março	14.0	969.0	1226.0
26- Março	13.0	969.0	1246.0
27- Março	13.0	969.0	1246.0
28- Março	15.0	972.0	1208.0
29- Março	16.0	965.0	1223.0
30- Março	16.0	980.0	1224.0
31- Março	16.0	989.0	1224.0
1-Abril	18.0	963.0	1224.0
2- Abril	15.0	966.0	1207.0
3- Abril	15.0	953.0	1275.0
4- Abril	15.0	953.0	1275.0
5- Abril	14.0	972.0	1214.0
6- Abril	16.0	955.0	1275.0
7- Abril	15.0	956.0	1207.0
8- Abril	15.0	956.0	1207.0
9- Abril	17.0	949.0	1218.0
10- Abril	15.0	950.0	1299.0
11- Abril	16.0	945.0	1276.0
12- Abril	16.0	949.0	1276.0
13- Abril	16.0	956.0	1256.0
14- Abril	16.0	958.0	1281.0
Média	15	961	-----
D.Padrão	1.3	10.8	-----

7. Tabela B- Resultados dos parâmetros de controlo pote (C080) - 27 dias durante o melhoramento da cobertura.

Data	Altura Banho (cm)	Temperatura (°C)	Teor de Ferro (ppm)
15-Abril	17.0	960.0	1220.0
16-Abril	16.0	960.0	1220.0
17-Abril	15.0	955.0	1261.0
18-Abril	15.0	961.0	1280.0
19- Abril	16.0	971.0	1292.0
20- Abril	16.0	971.0	1292.0
21- Abril	15.0	974.0	1201.0
22- Abril	19.0	959.0	1274.0
23- Abril	14.0	967.0	1253.0
24- Abril	14.0	967.0	1273.0
25- Abril	19.0	958.0	1225.0
26- Abril	15.0	956.0	1264.0
27- Abril	17.0	959.0	1231.0
28- Abril	17.0	959.0	1231.0
29- Abril	16.0	957.0	1239.0
30- Abril	12.0	957.0	1104.0
1-Maio	15.0	959.0	1114.0
2- Maio	15.0	959.0	914.0
3- Maio	16.0	979.0	911.0
4- Maio	16.0	980.0	960.0
5- Maio	18.0	976.0	908.0
6- Maio	15.0	972.0	908.0
7- Maio	16.0	961.0	958.0
8- Maio	16.0	952.0	937.0
9- Maio	15.0	951.0	832.0
10- Maio	15.0	951.0	852.0
11- Maio	16.0	960.0	869.0
Média	15.8	963	-----
D.Padrão	1.452	8.18	-----

8. Tabela C - Resultados dos parâmetros de controlo do pote (C080) - 27 dias depois do melhoramento da cobertura.

Data	Altura do Banho (cm)	Temperatura (°C)	Teor de Ferro (ppm)
12- Maio	15.0	975.0	761.0
13- Maio	17.0	975.0	701.0
14- Maio	17.0	975.0	701.0
15- Maio	14.0	950.0	796.0
16- Maio	16.0	970.0	721.0
17- Maio	15.0	965.0	725.0
18- Maio	15.0	965.0	725.0
19- Maio	17.0	964.0	777.0
20- Maio	15.0	955.0	731.0
21- Maio	16.0	956.0	723.0
22- Maio	16.0	956.0	723.0
23- Maio	16.0	953.0	716.0
24- Maio	16.0	948.0	772.0
25- Maio	13.0	955.0	738.0
26- Maio	13.0	955.0	738.0
27- Maio	16.0	966.0	712.0
28- Maio	15.0	961.0	697.0
29- Maio	16.0	962.0	696.0
30- Maio	16.0	962.0	709.0
31- Maio	16.0	962.0	798.0
1-Junho	16.0	962.0	890.0
2- Junho	16.0	962.0	796.0
3- Junho	16.0	962.0	800.0
4- Junho	16.0	963.0	796.0
5- Junho	16.0	963.0	896.0
6- Junho	16.0	963.0	798.0
7- Junho	16.0	963.0	796.0
Média	16	961	-----
D.Padrão	1.19	8.55	-----

9. Tabela D - Resultados dos parâmetros de controlo do pote (C081) - 27 dias antes do melhoramento da cobertura.

Data	Altura do Banho (cm)	Temperatura (°C)	Teor de Ferro (ppm)
19-Março	15.0	960.0	3212.0
20- Março	18.0	971.0	2909.0
21- Março	16.0	977.0	2452.0
22- Março	14.0	985.0	2204.0
23- Março	15.0	984.0	2042.0
24- Março	15.0	980.0	2816.0
25- Março	16.0	971.0	2609.0
26-Mar	17.0	971.0	2663.0
27- Março	16.0	971.0	1626.0
28- Março	15.0	973.0	2514.0
29- Março	15.0	956.0	2372.0
30- Março	14.0	959.0	2243.0
31- Março	14.0	959.0	2243.0
1-Abril	14.0	940.0	2217.0
2- Abril	12.0	950.0	2249.0
3- Abril	11.0	949.0	2141.0
4- Abril	11.0	949.0	2141.0
5- Abril	15.0	954.0	2386.0
6- Abril	15.0	950.0	2145.0
7- Abril	13.0	951.0	2053.0
8- Abril	13.0	951.0	2053.0
9- Abril	16.0	947.0	2021.0
10- Abril	15.0	940.0	2273.0
11- Abril	13.0	954.0	2039.0
12- Abril	13.0	954.0	2039.0
13- Abril	15.0	960.0	2042.0
14- Abril	16.0	945.0	2043.0
Média	14.5	960	-----
D.Padrão	1.6	12.9	-----

10. Tabela E - Resultados dos parâmetros de controlo do pote (C081) - 27 dias durante o melhoramento da cobertura.

Data	Altura do Banho (cm)	Temperatura (°C)	Teor de Ferro (ppm)
15- Abril	14.0	951.0	2083.0
16- Abril	15.0	951.0	2083.0
17- Abril	15.0	948.0	2011.0
18- Abril	16.0	953.0	2046.0
19- Abril	14.0	961.0	2615.0
20- Abril	14.0	961.0	2015.0
21- Abril	14.0	962.0	1089.0
22- Abril	15.0	963.0	1099.0
23- Abril	15.0	960.0	1004.0
24- Abril	15.0	960.0	1004.0
25- Abril	17.0	964.0	1034.0
26- Abril	16.0	962.0	1070.0
27 Abril	16.0	952.0	1072.0
28- Abril	16.0	952.0	1072.0
29- Abril	17.0	963.0	1031.0
30- Abril	16.0	963.0	1025.0
1-Maio	15.0	961.0	1009.0
2- Maio	15.0	961.0	909.0
3- Maio	12.0	971.0	984.0
4- Maio	18.0	962.0	926.0
5 Maio	16.0	966.0	904.0
6- Maio	16.0	966.0	904.0
7- Maio	15.0	958.0	951.0
8- Maio	16.0	965.0	971.0
9- Maio	16.0	961.0	891.0
10- Maio	16.0	961.0	891.0
11- Maio	17.0	959.0	838.0
Média	15.4	960	-----
D.Padrão	1.2	5.33	-----

11. Tabela F- Resultados dos parâmetros de controlo do pote C081- 27 dias depois do melhoramento da cobertura.

Data	Altura do Banho (cm)	Temperatura (°C)	Teor de Ferro (ppm)
12 -Maio	16	961	819
13- Maio	16	961	837
14- Maio	16	961	737
15- Maio	16	956	837
16- Maio	15	965	738
17- Maio	15	962	736
18 -Maio	15	962	736
19- Maio	15	970	809
20- Maio	16	953	731
21- Maio	16	966	737
22- Maio	16	966	837
23- Maio	15	970	706
24- Maio	16	962	745
25- Maio	17	965	769
26- Maio	16	965	869
27- Maio	16	951	731
28- Maio	16	956	756
29- Maio	16	963	856
30- Maio	16	963	756
31- Maio	16	963	736
1-Junho	16	962	866
2- Junho	16	963	736
3- Junho	16	963	866
4- Junho	16	962	867
5 Junho	16	963	837
6- Junho	16	962	737
7- Junho	16	962	837
Média	16	962.1	-----
D.Padrão	1.18	1.22	-----

ANEXO III

12. Tabela A - Resultados da determinação de impurezas/reactividade do ânodo com CO₂ e O₂

Data	Na (ppm)	V(ppm)	R.R.CO₂ (%)	R.R.Ar (%)
1-Abril	450.0	337.0	87.0	64.3
2- Abril	388.0	318.0	83.0	66.3
3- Abril	414.5	339.5	90.0	63.5
4- Abril	406.0	337.5	84.5	64.0
5- Abril	421.3	334.5	91.7	64.8
6- Abril	430.0	299.0	84.0	65.0
7- Abril	401.3	327.0	82.3	69.2
8- Abril	348.0	341.7	84.0	64.6
9- Abril	459.5	342.0	86.0	63.9
10- Abril	412.0	346.0	83.0	64.0
11- Abril	438.0	338.0	83.0	66.2
12- Abril	452.0	337.0	82.0	63.0
13- Abril	364.0	353.0	80.0	64.0
14- Abril	432.0	245.0	91.0	65.0
15- Abril	346.0	309.0	93.0	63.0
16 Abril	393.5	316.0	90.0	60.2
17- Abril	422.3	303.7	83.0	68.0
18- Abril	345.0	313.0	81.0	66.5
19- Abril	406.0	304.5	82.0	62.4
20- Abril	332.0	320.0	80.0	63.0
21- Abril	435.0	318.0	89.0	65.0
22- Abril	415.0	317.5	85.0	60.5
23- Abril	469.0	332.0	85.0	68.0
24- Abril	465.0	288.0	87.0	68.0
25- Abril	345.0	315.0	94.0	67.0
26- Abril	438.0	286.0	82.0	66.0
27- Abril	415.0	302.0	89.0	70.0
28- Abril	371.5	316.0	84.0	65.1
29- Abril	415.0	310.0	85.0	66.3
30- Abril	413.0	300.0	84.0	67.3

13. Tabela B- Limites aceitáveis dos parâmetros de qualidade do ânodo segundo as normas ISO

Propriedades		Norma/método	Unidade	Intervalos
Densidade aparente		ISO 12985 - 1	g/cc	1.540 – 1.600
Resistência eléctrica		ISO 11713	$\mu\Omega\text{m}$	50 – 60
Força de flexão		ISO 12986-1	MPa	8 – 14
Força de compressão		ISO 18515	MPa	40 – 55
Módulos de elasticidade	Estático	ISO 18515	GPa	3.5 – 5.5
Coefficiente de expansão térmica		ISO 14420	10exp-6/K	3.5 – 4.5
Condutividade térmica		ISO 12987	W/mK	3 – 4.5
Permeabilidade do ar		ISO 15906	nPm	0.5 – 2.0
Reactividade do CO ₂	resíduo	ISO 12988 - 1	%	87 – 95
	poeiras	ISO 12988 - 1	%	6- 10
Reactividade do ar	resíduo	ISO 12989 - 1	%	65 – 90
	poeiras	ISO 12989 - 1	%	5- 10
Impurezas	V	ISO 12980	ppm	150- 350
	Ni	ISO 12980	ppm	40 – 200
	Fe	ISO 12980	ppm	100 – 800
	Al	ISO 12980	ppm	100 – 500
	Na	ISO 12980	ppm	150 – 375
	Mg	ISO 12980	ppm	10 – 50
	Pb	ISO 12980	ppm	10 – 50

(Fonte Mozal, Departamento de Carbono).

14. Esquema da determinação da reactividade do ânodo com dióxido de carbono e oxigénio.

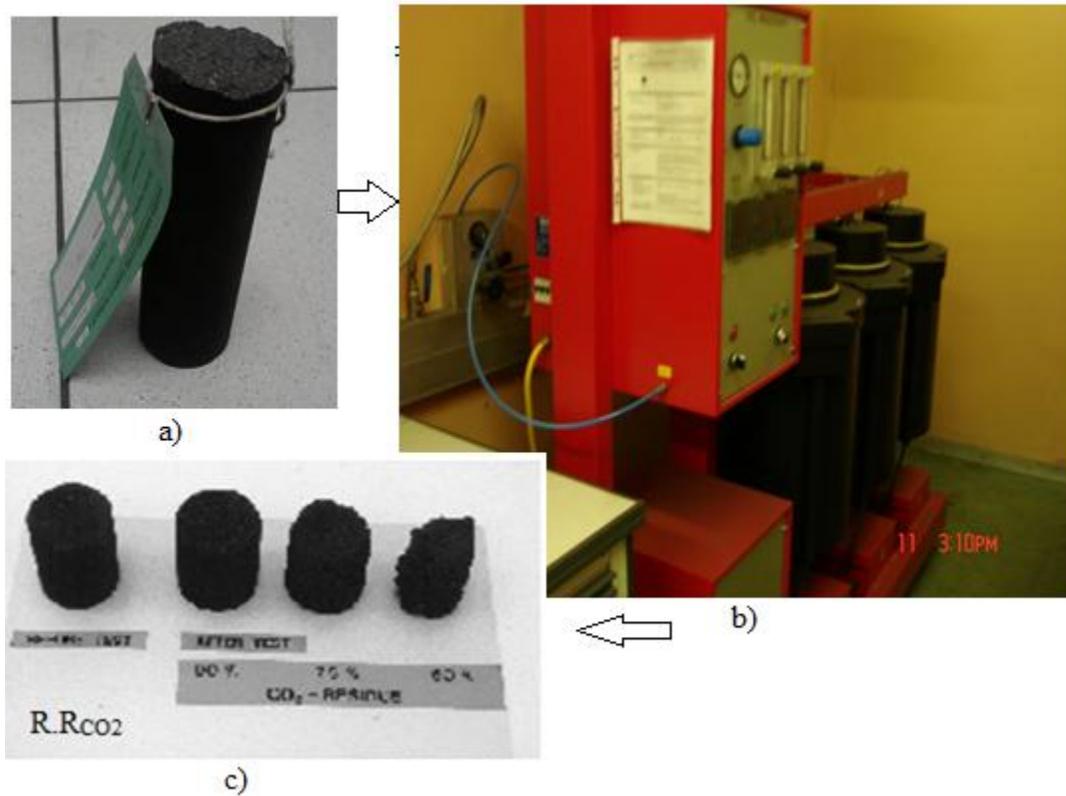


Figura 1. Esquema do teste de reactividade do ânodo com dióxido de carbono.

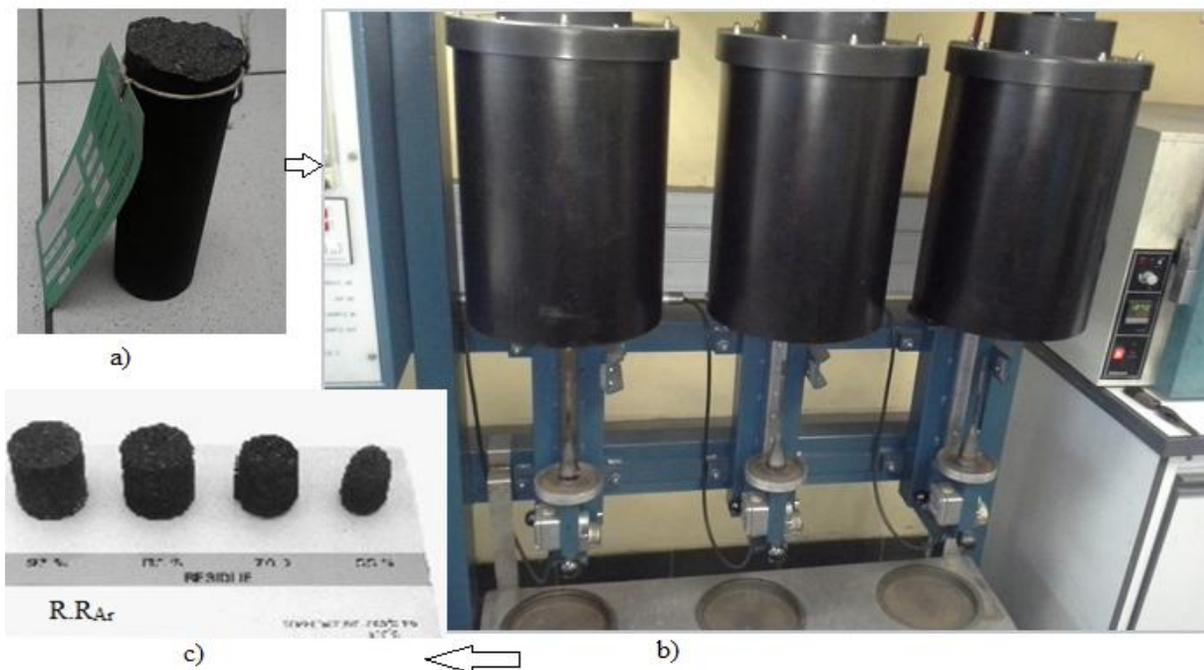
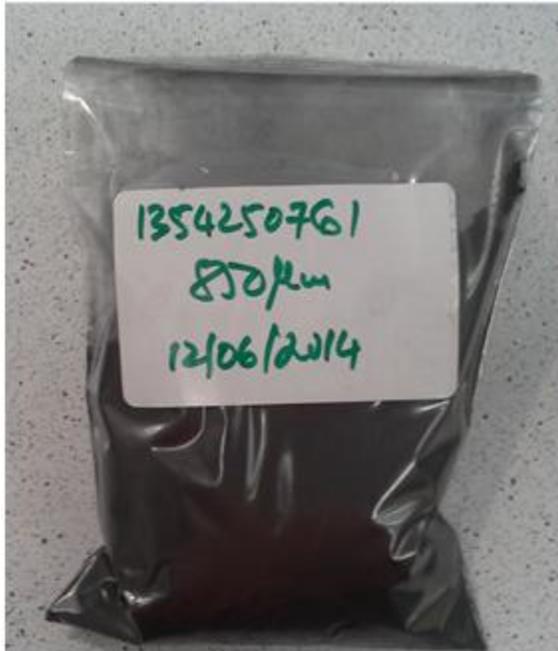


Figura 2. Esquema do teste de reactividade do ânodo com oxigénio do ar.



a) amostra de ânodo moído



b) amostra de alumínio

Figura 3. a) amostra de ânodo moído . b) amostra de alumínio para análise de impurezas(Fe).