

ANÁLISE DA REDUÇÃO ELETROLÍTICA E DE SUAS EMISSÕES POLUENTES EM UMA FÁBRICA DE ALUMÍNIO PRIMÁRIO NA CIDADE HISTÓRICA DE OURO PRETO/MG

Agmar José de Jesus Silva (Universidade Federal do Rio de Janeiro) E-mail: agmarster@gmail.com

Resumo: O presente trabalho é resultado de um projeto ambiental desenvolvido como requisito obrigatório da disciplina de Projetos Ambientais do curso de graduação em Química Industrial da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP/MG). O projeto consistiu em, primeiramente, realizar uma visita técnica supervisionada por técnicos especializados às instalações de uma indústria de produção de alumínio primário na cidade de Ouro Preto/MG, a Novelis do Brasil Ltda. Os objetivos foram conhecer e descrever o processo produtivo desta fábrica para, em seguida, utilizando dados coletados na visita e também outros disponibilizados pela empresa ao órgão ambiental estadual (FEAM), emitir uma opinião técnica e crítica sobre os possíveis impactos ambientais desta atividade industrial ao meio ambiente do município em questão. Para tanto, foram visitadas as principais unidades da fábrica, i.e., as unidades de beneficiamento da bauxita e produção de alumina calcinada (Al_2O_3), de redução eletrolítica da alumina, e os sistemas de controle/tratamento de efluentes gasosos e/ou particulados. O estudo realizado mostrou que a empresa produzia alumínio primário com qualidade, porém, com um elevado consumo de energia elétrica na redução, o que demandava produção própria de parte desta. A pasta *Soderberg* era utilizada como eletrodo de auto-cozimento (anodo), porém, o seu potencial poluidor levou a fábrica a ter que implementar um Sistema Completo de Gestão Ambiental (SGA), para atender às normas ISO 9002 e 14001. Entre as melhorias, a Novelis implantou um inovador sistema de lavagem a seco de gases e controle de particulados, chamado *Dry Scrubber*, o qual demonstrou uma eficiência de 96–99% no controle destas emissões nesta planta industrial.

Palavras-chave: Alumínio Primário, Redução Eletrolítica, Emissões Gasosas, *Dry Scrubber*, Ouro Preto/MG.

ANALYSIS OF THE ELECTROLYTIC REDUCTION AND OF ITS POLLUTANT EMISSIONS IN A PRIMARY ALUMINUM FACTORY IN THE HISTORICAL CITY OF OURO PRETO/MG

Abstract: This work is a result of an environmental project developed as a mandatory requirement of the Environmental Projects Course of the Industrial Chemistry undergraduate course of the Federal University of Ouro Preto (UFOP/MG). Firstly, the project consisted of a technical visit supervised by specialized technicians at the plant of a primary aluminum production industry in the city of Ouro Preto/MG, the Novelis do Brasil Ltda. The goals were to know and describe the production process of this factory and then, using data collected during the visit and others made available by the company to the state environmental agency (FEAM), to give a technical and critical opinion about of the possible environmental impacts of this industrial activity to the environment of the municipality in question. For this purpose, the main sectors of the plant were visited, i.e., the unit of bauxite processing and calcined aluminum production (Al_2O_3), the aluminum electrolyte reduction cells, and the gaseous and/or particulate matter control/treatment systems. The study shown that Novelis Company produced primary aluminum with good quality, but there was a high consumption of electricity in the reduction, which required own production of a part of its total energy necessary. The Soderberg paste was used as a self-cooking electrode (anode), but its potential pollutants have led the factory to implement a Complete Environmental Management System (EMS), aiming to accomplish with the ISO 9002 and 14001 standards. Among the improvements, the Novelis implemented an innovator gas dry washing and particulate control system, so called *Dry Scrubber*, which has demonstrated an efficiency of 96–99% in controlling emissions at this industrial plant.

Keywords: Primary Aluminum, Electrolytic Reduction, Gaseous Emissions, *Dry Scrubber*, Ouro Preto/MG.

1. Introdução

1.1. O alumínio no Brasil

Minas Gerais é um estado de destaque quando o assunto é produção mineral (ANM, 2018). Dentre o rol de minérios produzidos neste estado, o alumínio, desde muitas décadas, é um dos

importantes metais (não ferrosos) produzidos e comercializados nacional e internacionalmente (SAMPAIO *et al.*, 2008, ANM, 2018, ABAL, 2019a–d).

Embora o alumínio seja um metal produzido a pouco mais de 100 anos na indústria brasileira, ele ocupa atualmente uma posição de destaque entre os metais não ferrosos e compete, em muitas aplicações, com metais tradicionais como o ferro e até mesmo com o aço (ABAL, 2019b, CALIXTO *et al.*, 2019). A sua versatilidade do ponto de vista de aplicabilidade industrial decorre de suas características físico-químicas, com destaque para sua baixa massa específica (comparada com outros metais de grande consumo), sua resistência à corrosão e sua alta condutibilidade térmica e elétrica. Além das suas várias aplicações e boas propriedades físico-químicas e mecânicas (quando usado na forma de suas ligas), o alumínio metálico possui ainda a característica de ser 100% reciclável por um número ilimitado de vezes, sem perdas de suas propriedades iniciais (ABAL, 2019c, CALIXTO *et al.*, 2019).

O alumínio tem tamanha importância industrial que, no Brasil, além do estado de Minas Gerais, muitas outras empresas exploram o minério de alumínio em diferentes regiões do país, e.g., Alcoa (Poços de Caldas/MG, São Luís/MA e Juruti/PA), CBA–Votorantim (Alumínio/SP), Novelis do Brasil (Ouro Preto/MG, Aratu/BA e Pindamonhangaba/SP), Albras (Belém/PA), Valesul (Santa Cruz/RJ), Alunorte/Hydro (Barcarena/PA) e Alumar (São Luís/MA) (ANM, 2018). Este trabalho, por sua vez, foi desenvolvido com foco na Novelis do Brasil, situada na cidade histórica de Ouro Preto/MG.

1.2. Histórico da produção de alumínio em Ouro Preto/MG

A produção de alumínio em Ouro Preto é considerada uma das primeiras do país. Teve seu início com a indústria Elquisa (Eletro Química Brasileira S.A.), que foi inaugurada em 1928 (ABAL, 2019a). No entanto, a atividade desta empresa, que era centrada na produção e exportação de alumínio primário, apenas se consolidou de fato em 1938, funcionando até meados de 1945 (ABAL, 2019a), apesar das dificuldades de comercialização devido ao excesso de produção mundial de alumínio na época, impulsionada pela 2ª Guerra Mundial e seus desdobramentos.

Em junho de 1950, a ALCAN Alumínio do Brasil adquiriu as ações da Elquisa e iniciou um processo de produção de alumínio em maior escala industrial. A fábrica então conseguiu se desenvolver bem melhor nesse período, chegando a ser considerada uma das mais importantes indústrias desse metal no Brasil (Arquivo Público de Ouro Preto, 2019).

Em janeiro de 2005, a ALCAN realizou um processo de desmembramento de seus negócios em todo o mundo, resultando na criação da Novelis. Conseqüentemente, no Brasil a nova empresa ficou com o equivalente a 80% dos negócios da ALCAN, inclusive a produção de laminados de alumínio (DCI, 2019).

A Novelis do Brasil funcionou até o fim de 2014, quando então anunciou o encerramento de suas atividades em Ouro Preto/MG. Segundo o vice-presidente sênior da Época, Tadeu Nardocci, “a Novelis está construindo um futuro sustentável, transformando seu negócio em um modelo com alto conteúdo de material reciclado” (EXAME, 2019). Ele ainda completou sua justificativa mencionando que “questões estruturais que afetam toda a indústria de alumínio primário no Brasil, impactando o custo da operação e sua competitividade”.

Porém, no mesmo ano de 2014 a empresa indiana *Hindalco* (pertencente ao grupo *Aditya Birla*) comprou a Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG, a qual já era sua subsidiária desde 2007. Com investimentos da ordem R\$ 130 milhões na fábrica, as instalações foram renovadas a partir de 2014, com foco maior em hidratos e aluminas especiais (CIMM, 2019).

Embora a Novelis do Brasil tenha sido comprada em 2014, o presente trabalho teve sua parte experimental desenvolvida em 2009, ano em que foi realizada a visita técnica objeto deste estudo e coletados dados de monitoramento ambiental que a empresa enviava ao órgão ambiental estadual (FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente) (FEAM, 2019). Tais dados foram referentes ao intervalo de tempo de julho a novembro de 2008 (período de referência do trabalho, conforme detalhado mais adiante, no subitem 3.1).

1.3. Localização geográfica e apresentação da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG

O processo de fabricação do alumínio primário na fábrica da Novelis em Ouro Preto/MG, de 2005 até 2009, funcionou de forma integrada, processando desde a bauxita bruta até o seu produto final, o alumínio primário, seja na forma de placas (fabricadas no setor de laminação), tarugos (fabricados no setor de extrusão) ou lingotes (fabricados no setor de refusão, os quais tinham como destino uma futura refusão). O processo de obtenção do alumínio sempre foi feito por meio de redução eletrolítica da alumina.

Em Ouro Preto, a atividade de extração e beneficiamento da bauxita, no período de referência, estava desativada. Segundo a empresa, a desativação havia ocorrido em 2009 e teve como principal causa o aumento dos custos operacionais e a baixa escala de produção na unidade de Ouro Preto, fatos que somados tornaram a atividade economicamente inviável. Porém, ainda existia na fábrica a geração de energia elétrica (parte do consumo médio mensal, de 99.656 MWh, era produzido pela própria empresa em hidrelétricas construídas no município, e a outra parte era adquirida de concessionárias locais), a implementação de programas de qualidade e a produção de alumínio primário pela redução de alumina, que era comprada de outras regiões brasileiras, principalmente do consórcio Alumar (ALVES, 2011).

No período de referência do presente trabalho, a fábrica também produzia alumina hidratada (ou tri-hidróxido de alumínio, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_{(s)}$), alumina calcinada ($\text{Al}_2\text{O}_{3(s)}$), aluminas especiais, pasta *Soderberg* e revestimentos de carbono. A capacidade produtiva nominal da fábrica em 2010 era de 7.000 toneladas anuais de aluminas especiais, 140.000 toneladas anuais de pasta *Soderberg* e 75.000 toneladas anuais de alumínio (NOVELIS, 2010 *apud in* ALVES, 2011).

A unidade industrial da Novelis de Ouro Preto/MG ocupa uma área total de 186.000 m², sendo 63.069 m² de área construída (ALVES, 2011). Uma imagem de satélite da planta industrial da fábrica, obtida na data de referência, pode ser vista na Figura 01, com destaque para as unidades ativas de redução do alumínio na planta.

Segundo Alves (2011), a maior parte da água utilizada nesta indústria, em seu processo produtivo, era oriunda de captações em mananciais da região (córregos Barcelos e do Manso – captação média de 142.000 m³/mês). Uma outra parte, utilizada para consumo humano na fábrica, provinha de poço artesiano (captação média de 17.410 m³/mês).

Apesar da importância do alumínio no desenvolvimento tecnológico/industrial da humanidade, é também de pleno conhecimento pelos profissionais da área, que a produção desse metal tem um considerável potencial poluidor e degradador do meio ambiente. Isso porque em praticamente todas as etapas do seu processo produtivo ocorre geração de poluentes que, ao serem emitidos de forma descontrolada e não corretamente tratada, podem alterar de forma comprometedoramente a qualidade do meio ambiente (águas e atmosfera). Portanto, identificar tais poluentes e mapear suas possíveis consequências sobre o meio ambiente natural e à saúde humana é uma atividade fundamental tanto para avaliar riscos de doenças quanto para gerar dados que auxiliem estas empresas em suas tomadas de decisões com vistas à melhoria contínua da qualidade dos seus produtos e processos produtivos.



Figura 01 — Imagem de satélite da planta industrial da Novelis de Ouro Preto/MG, com destaque para as unidades ativas de redução de alumina, no período de referência (Fonte: Elaborado pelo Autor a partir do *Google Earth*, 2009).

Neste contexto, este trabalho teve como principais objetivos:

- Fazer uma descrição detalhada do processo produtivo da fábrica da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG, mostrando o fluxograma do processo de produção com a identificação dos pontos de efluentes gasosos e/ou materiais particulados;
- Propor um balanço de massa simplificado da unidade de redução eletrolítica do processo produtivo do alumínio primário;
- Descrever o programa de gerenciamento dos efluentes gasosos e/ou materiais particulados adotado pela empresa, discutindo os principais poluentes liberados e seu impacto ambiental, e avaliar se a legislação ambiental pertinente foi seguida ou não pela indústria (verificação de limites e padrões ambientais) no período em questão.

2. Processos de produção de alumínio primário

2.1. Processos Bayer e Hall-Héroult

Foi verificado *in locu* que o processo geral de obtenção de alumínio primário da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG segue a metodologia tradicional já consolidada industrialmente e bem descrita na literatura (GOMES *et al.*, 2017, ALVES, 2011 e SAMPAIO *et al.*, 2008), tal como mostrado no fluxograma da Figura 02. Apesar do processo geral ter muitas etapas, existem, de forma resumida, dois processos principais após a extração da rocha bauxita, os quais englobam a maioria das demais etapas intermediárias. O primeiro deles é o processo químico de obtenção da alumina (ou óxido de alumínio, Al_2O_3) a partir do refino da bauxita, denominado de processo *Bayer* (GOMES *et al.*, 2017 e SAMPAIO *et al.*, 2008). O outro processo é o da redução eletrolítica da alumina para obtenção do alumínio metálico (alumínio primário), denominado de processo *Hall-Héroult* (GOMES *et al.*, 2017 e SAMPAIO *et al.*, 2008). Embora esses dois processos sejam clássicos, foram justamente as particularidades

inerentes ao modo de como a Novelis os executava na sua planta industrial e seus possíveis impactos ao meio ambiente local que fomentaram as discussões apresentadas adiante, ao longo dos subitens 4.1 a 4.3 da seção de resultados e discussões.

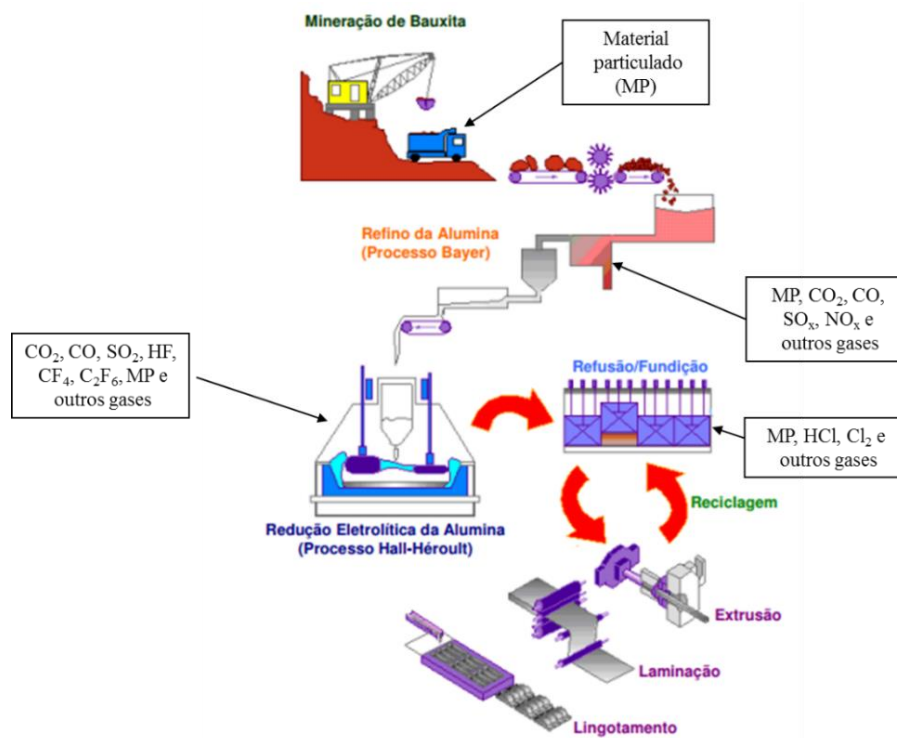


Figura 02 — Fluxograma do processo produtivo do alumínio primário da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG. (Fonte: Adaptado de IAI, 2009 *apud in* SILVA, 2010).

É importante enfatizar que em todas as etapas do processo produtivo há geração de resíduos (substâncias poluentes), conforme mostram as caixas de texto incluídas no fluxograma desta Figura 02. Estas substâncias podem alterar e afetar a qualidade do meio ambiente local. Entre estas substâncias se destacam os poluentes atmosféricos dos processos *Bayer* e *Hall-Héroult*, além da poeira gerada na extração da bauxita. Convém destacar também que, com relação ao controle ambiental, este trabalho teve seu foco na discussão das emissões gasosas e/ou de material particulado decorrentes da redução eletrolítica da alumina nas unidades 02 e 03 (Figura 01), ou seja, na geração de poluentes do processo *Hall-Héroult* destas unidades.

2.2. Anodo de pasta Soderberg

Na produção de alumínio por redução eletrolítica existem diferentes tipos de metodologias tecnológicas que podem ser utilizadas, a depender das características e objetivos da planta industrial considerada. Neste contexto, a redução eletrolítica pode ser feita em cubas eletrolíticas, utilizando anodo pré-cozido ou anodo de pasta *Soderberg* (SHREVE e BRINK Jr., 2012, ALVES, 2011, SILVA, 2010).

Os dois tipos de anodo são obtidos a partir de uma mistura de coque de petróleo calcinado e piche, como pode ser visto no fluxograma da Figura 03. A diferença básica é que o anodo pré-cozido é fabricado antes de ser introduzido no processo de redução da alumina, sendo cozido previamente com óleo pesado, e deve ser desmontado e substituído periodicamente (ALVES, 2011). O anodo de pasta *Soderberg*, por sua vez, é cozido na própria cuba eletrolítica, com o calor liberado no processo, sendo consumido continuamente. Portanto, deve ser periodicamente realimentado no sistema (SHREVE e BRINK Jr., 2012).

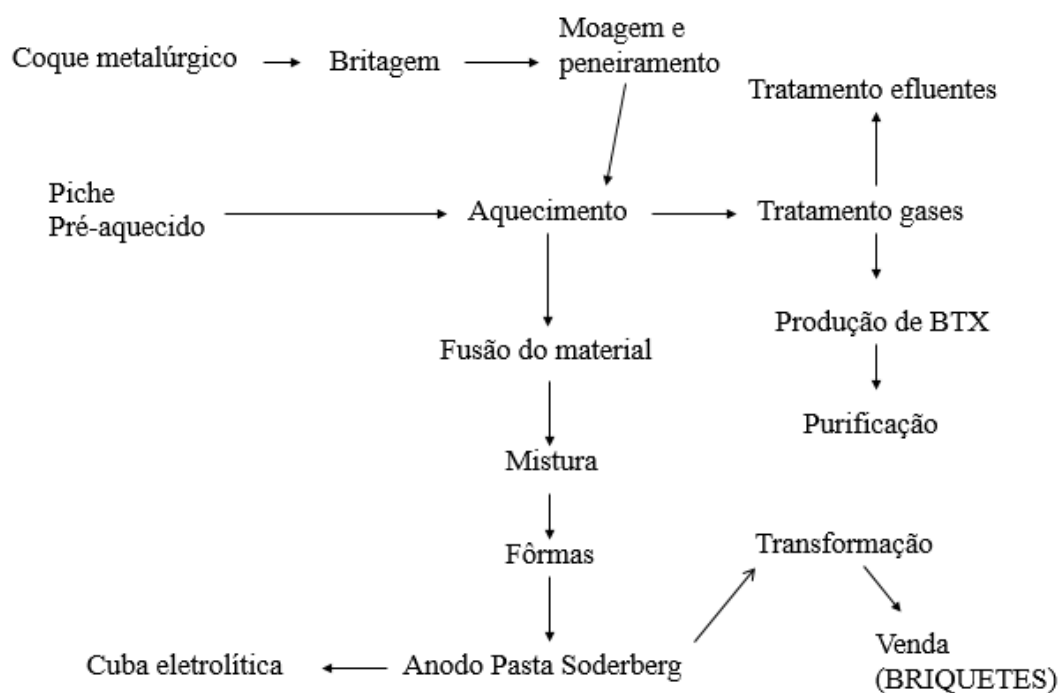


Figura 03 — Fluxograma simplificado do processo de fabricação do anodo de pasta *Soderberg*.
(Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020).

Na fabricação do anodo pré-cozido, o coque é britado para reduzir o tamanho dos grãos, peneirado e separado em quatro frações, denominadas de agregado seco, o qual, após ser pré-aquecido, é misturado com piche em misturadores contínuos para a formação da pasta anódica, em uma temperatura de cerca de 165 °C. Em seguida, cerca de uma tonelada (quantidade necessária para produzir um bloco do material) é pesada e compactada em um molde. Os blocos seguem para fornos de cozimento que utilizam óleo pesado BPF (baixo ponto de fluidez) para gerar o calor necessário ao processo e garantir a temperatura de cozimento em torno de 1.200 °C, durante cerca de quinze dias. Uma haste metálica, por onde a eletricidade é conduzida nas cubas eletrolíticas, é soldada no anodo. Estes anodos são consumidos no processo de redução eletrolítica a uma taxa de aproximadamente 420 kg de carbono/tonelada de alumínio produzido e, devido a isso, são substituídos a cada vinte e cinco dias (ALBRAS, 2010 *apud in* ALVES, 2011).

Na produção do anodo de pasta *Soderberg* (Figura 03), a qual é feita nas instalações da Novelis de Ouro de Ouro Preto/MG, o coque de petróleo calcinado é inicialmente triturado e, em seguida, peneirado. A fração de maior granulometria retorna ao triturador, e a porção mais fina é encaminhada ao moinho de bolas com o objetivo de se obter um material com granulometria mais fina. O coque é então dosado e misturado com piche líquido pré-aquecido, utilizando para tal um misturador de antracito e piche, sendo a mistura novamente aquecida para promover a fusão do material dentro do misturador, formando assim a pasta *Soderberg*, a qual tem a aparência física mostrada na Figura 04. A pasta é então encaminhada para as cubas eletrolíticas. A mistura de coque e piche aquecida também pode ser resfriada em água e transformada em briquetes (Figura 03), ou seja, pequenos pedaços sólidos do material, os quais podem ser armazenados ou transportados de uma unidade para outra para consumo da própria fábrica, ou ainda, comercializados para arrecadação de receita. Na cuba eletrolítica, a pasta *Soderberg* deve ser alimentada de tempos em tempos, em períodos de cerca de treze dias, à medida em que ela vai sendo consumida durante o processo de redução da alumina em alumínio metálico.



Figura 04 — Forma física do anodo de pasta *Soderberg* produzido pela Novelis de Ouro Preto/MG, no estágio adequado para alimentar as cubas eletrolíticas. (Fonte: Elaborada à partir do banco de dados coletados em visita técnica à Fábrica, 2020).

Pelo fato dos anodos serem fabricados com coque de petróleo e piche, que são matéria orgânica fóssil, durante o seu cozimento ocorre emissão de compostos orgânicos voláteis provenientes principalmente do piche, além da formação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's), como os BTX (benzeno, tolueno e xilenos) (SILVA, 2010), os quais precisam ser captados e devidamente tratados para serem eliminados, ou então reaproveitados (aqueles em que há interesse industrial, como os BTX) (Figura 03).

No tocante aos possíveis poluentes atmosféricos emitidos, como os HPA's, a diferença principal entre as duas tecnologias de anodo para a fabricação do alumínio é a forma como se dá tanto sua fabricação quanto a operação. No caso da utilização do anodo de pasta *Soderberg*, é difícil controlar as emissões, já que ele é cozido durante a eletrólise da alumina e deve ser repostado periodicamente, gerando gases e vapores orgânicos durante seu cozimento (ALVES, 2011, SILVA, 2010). Por outro lado, quando se utiliza o anodo pré-cozido, apesar de ser necessária sua substituição, também de forma periódica, não há liberação de quantidades significativas de poluentes durante o processo de eletrólise da alumina pelo motivo do material já estar previamente cozido.

Outro vantagem verificada do uso de anodos pré-cozidos é o fato de não haver a necessidade de abrir os fornos durante a operação dos mesmos, facilitando a captação e o tratamento dos efluentes atmosféricos formados. Uma terceira vantagem dos anodos pré-cozidos é a eficiência de aproveitamento energético superior, uma vez que o aquecimento resistivo é usado apenas para manter o banho em seu estado fundido, enquanto que para os anodos de pasta *Soderberg* o calor também é usado para o cozimento do anodo.

Por outro lado, a desvantagem da utilização de anodos pré-cozidos é que a planta de redução de alumínio deve estar localizada nas proximidades da unidade de fabricação de anodo, para facilitar no transporte dos blocos, ou então eles devem ser produzidos na mesma área industrial, que é o que acontece na maioria das vezes. Além disso, ao serem consumidos, os anodos pré-cozidos devem ser retirados para substituição, havendo interrupção da produção, enquanto que os anodos de pasta *Soderberg* operam continuamente.

Em síntese, embora o anodo de pasta *Soderberg* seja uma tecnologia mais antiga e que pode degradar mais intensamente o meio ambiente, além de possuir menor eficiência de processo, ainda assim ocupa espaço junto à tecnologia de anodos pré-cozidos no processo de redução de alumina. Conforme Alves, (2011), em média um terço da produção mundial de alumínio ainda se processa em plantas que utilizam a tecnologia *Soderberg*. Uma das justificativas é que a substituição das cubas eletrolíticas, em muitas fábricas, como é o caso da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG, pode não ser economicamente viável para a empresa.

3. Metodologia

3.1. Período de referência da pesquisa

A descrição detalhada do processo produtivo de alumínio primário feita neste artigo teve por base uma revisão inicial de dados da literatura e, principalmente, informações coletadas durante uma visita técnica de um grupo de alunos do curso de Química Industrial da UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) à planta industrial em questão, no semestre de 2009/2. A visita técnica foi realizada pausadamente e guiada por especialistas dos setores da fábrica, tendo sido realizada na data de 11/11/2009 (data de referência).

O trabalho foi complementado por uma análise de emissões gasosas e/ou de materiais particulados oriundas das células de redução eletrolítica da fábrica, e teve por base um conjunto de dados de monitoramento ambiental enviados pela direção desta indústria ao órgão de fiscalização ambiental do estado de Minas Gerais (a FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente), relativos ao período de julho a novembro de 2008 (período de referência).

3.2. Sistema de controle e monitoramento de emissões

No tangente ao controle de emissões gasosas e/ou de material particulado, foi feita uma descrição simplificada do programa de gerenciamento desses poluentes por parte da empresa. De forma resumida, foram acompanhadas as emissões gasosas das Unidades de Redução 02 e 03 (Figura 01), e foi dado ênfase à observação de fluoretos gasosos (FG), fluoretos particulados (FP), material particulado (MP) e materiais particulados totais (MTP) destas unidades.

A partir dos resultados obtidos foi feita uma análise crítica dos principais poluentes liberados no período de referência em questão, assim como do possível impacto ambiental ocasionado, levando em consideração se a legislação ambiental pertinente estava ou não sendo observada pela indústria (verificação de limites e padrões ambientais).

4. Resultados e discussão

4.1. Produção do alumínio primário na fábrica de Ouro Preto/MG

Como é de conhecimento na literatura, a maneira clássica de obtenção de alumínio primário ocorre por meio da redução química da alumina, e recebe o nome de processo *Hall-Héroult* (SHREVE e BRINK Jr., 2012). Esse processo, cujo fluxograma geral está apresentado na Figura 05, é o mesmo executado pela Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG desde o início de sua operação.

A base de funcionamento desse processo *Hall-Héroult* consiste na redução da alumina dentro de cubas eletrolíticas, estando ela dissolvida em um banho de criolita (fluoreto de sódio e alumínio – Na_3AlF_6) e de fluoretos de um ou mais metais mais eletropositivos que o alumínio, por exemplo, sódio, potássio ou cálcio. A reação de eletrólise que ocorre demanda uma elevada quantidade de energia elétrica, cerca de 15 MWh para produzir uma tonelada de alumínio (Tabela 01, subitem 4.2) (ABAL, 2010 *apud in* ALVES, 2011, MORAIS *et al.*, 2015).

O processo químico da redução eletrolítica se desenvolve em fornos especiais revestidos de carbono, chamados de cubas eletrolíticas (Figura 05), as quais operam na faixa de temperatura de 940 a 980 °C (SHREVE e BRINK Jr., 2012). Cada cuba possui dois componentes principais: o anodo (eletrodo positivo), disposto na parte superior, e o catodo ou cuba propriamente dita (eletrodo negativo, na parte inferior), onde ocorre a redução do metal, conforme mostrado na Figura 06a (SHREVE e BRINK Jr., 2012, GOMES *et al.*, 2017).

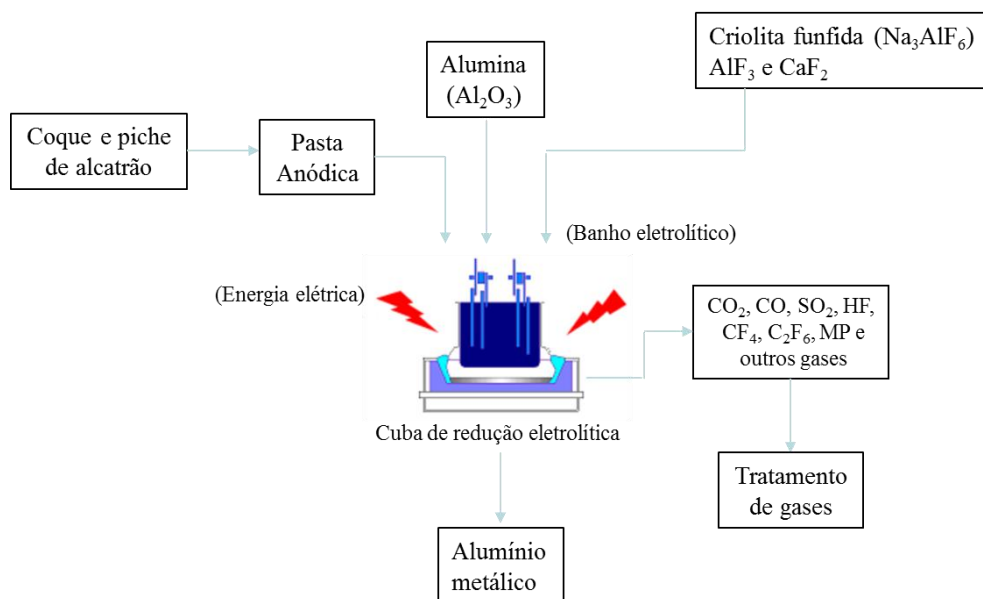
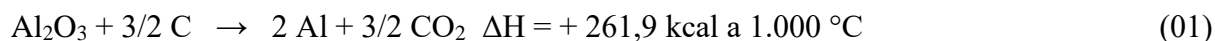


Figura 05 — Fluxograma do processo *Hall-Héroult*. (Fonte: Elaborado a partir de SILVA, 2010).

As cubas eletrolíticas são fabricadas em chapas de aço revestidas internamente com uma camada de material refratário e carbono (anodo), e contendo os eletrodos por dentro. O catodo geralmente é composto de cobre com altíssima pureza, e consiste no polo negativo da cuba eletrolítica (GOMES *et al.*, 2017). Situa-se na parte inferior desta para facilitar o processo. A Figura 06a mostra o esquema geral de uma cuba eletrolítica de anodo pré-cozido, onde se processa a eletrólise. Já a Figura 06b é uma fotografia real de uma das cubas eletrolíticas instaladas nas Unidades de Redução 02 e 03 da Fábrica da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG, a qual utiliza o anodo de pasta *Soderberg*, tal como relatado no subitem 2.2. A passagem da corrente elétrica do anodo para o catodo decompõe a alumina em alumínio e oxigênio. Este reage com o carbono do anodo formando $\text{CO}_{2(g)}$, e o metal se deposita no catodo, sob a forma líquida. Segundo Gomes *et al.*, (2017), cubas eletrolíticas como estas da Novelis têm uma vida útil média de cinco anos de funcionamento contínuo. A reação química de eletrólise que se processa é representada pela Equação (01), conforme (SHREVE e BRINK Jr., 2012):



A criolita é adicionada ao banho eletroquímico com o objetivo de abaixar o ponto de fusão da alumina de aproximadamente $2.000 \text{ }^\circ\text{C}$ para $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$, através da formação de uma mistura fundida da alumina com criolita ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_3\text{AlF}_6$). O alumínio formado permanece no estado líquido, pois seu ponto de fusão é inferior ao da mistura “criolita + alumina”, i.e., cerca de $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Assim, uma vez que a densidade do alumínio é maior que a da mistura, ele se acumulava no fundo do recipiente, de onde era coletado periodicamente por escoamento (uma vez ao dia), com rendimento médio de uma tonelada de alumínio líquido/cuba. Em seguida, o alumínio produzido era transferido em cadinhos até os chamados fornos de espera, de onde seguia para unidades de lingotamento, laminação ou refusão da fábrica.

Durante a operação da cuba formava-se uma crosta cristalizada sobre a superfície do banho fundido. Por cima desta crosta adicionava-se alumina calcinada, a qual já se encontrava pré-aquecida para expulsão da umidade. Essa crosta era então quebrada de tempos em tempos, sendo a alumina mecanicamente incorporada ao banho, visando manter a concentração de Al_2O_3 entre 2 a 6%, conforme relatado por SHREVE e BRINK Jr., (2012).

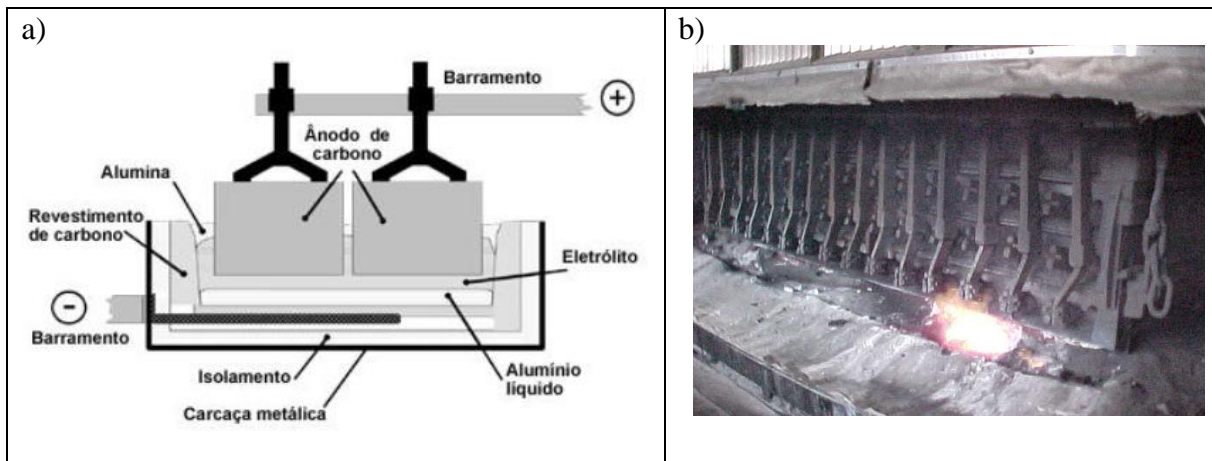


Figura 06 – Desenho esquemático de uma cuba eletrolítica de anodo pré-cozido (a), e exemplo de cuba real operada com anodo de pasta *Soderberg*, instalada nas Unidades de Redução 02 e 03 da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG (b). (Fonte: ABAL, 2019e, e banco de dados coletados em visita técnica à Fábrica, 2020).

Durante a visita pela fábrica observou-se que os fluoretos volatizados e o fluoreto de hidrogênio emitidos constituíam os principais poluentes gasosos emitidos. Sobre estes poluentes, foi feito, a seguir, no subitem 4.3, uma descrição detalhada de como eles eram tratados na Novelis de Ouro Preto/MG, de forma a adequar a indústria aos parâmetros e padrões das normas de emissões permitidas pela legislação, por exemplo a RESOLUÇÃO CONAMA N° 382/2006 (BRASIL, 2006).

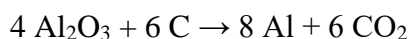
4.2. Balanço de massa simplificado

Os principais insumos para a produção de alumínio primário durante o processo de redução estão indicados na Tabela 01, sendo esta relação de insumos a mesma utilizada pela Novelis de Ouro Preto/MG. Para comparar e avaliar estes dados da literatura, foi proposto um balanço de massa teórico simplificado (quantidades de reagentes consumidos e produtos formados) na produção de uma tonelada de alumínio primário, e foi feita uma comparação destes resultados com os dados experimentais da situação prática.

Tabela 01 – Principais insumos necessários para a produção de uma tonelada de alumínio primário. (Fonte: ABAL, 2010 *apud in* ALVES, 2011).

Nome	Quantidade prática
Alumina	1.919 kg/ton
Energia elétrica	15 MWh/ton
Criolita	8 kg/ton
Fluoreto de alumínio	19,7 kg/ton
Fluoreto de cálcio	1 kg/ton
Anodo de pasta <i>Soderberg</i>	384 kg/ton

O balanço de massa proposto está apresentado a seguir, e teve como base de cálculo adotada 1000 kg de alumínio nos produtos. Pela reação de eletrólise, têm-se:



$$n (\text{mols, Al}) = 1000 \text{ kg Al} \times (1 \text{ mol Al}/27 \text{ kg Al}) = 37,04 \text{ kmol de Al.}$$

$$n (\text{mols}, \text{Al}_2\text{O}_3) = 37,04 \text{ kmol de Al} / 2 = 18,52 \text{ kmol Al}_2\text{O}_3.$$

Massa de Al_2O_3 consumida no processo:

$$\text{Massa (kg, Al}_2\text{O}_3) = 18,52 \text{ kmol Al} \times (102 \text{ g/mol de Al}) = 1.889,04 \text{ kg de Al}_2\text{O}_3/\text{ton de Al}.$$

Massa de anodo (carbono) consumida no processo:

$$\begin{array}{r} 2 \text{ mol de Al}_2\text{O}_3 \text{ -----} 3 \text{ mol de C} \\ 18,52 \text{ kmol de Al -----} \quad \quad \quad \times \\ x = 27,8 \text{ kmol de C} \end{array}$$

$$\text{Massa (anodo consumido)} = 27,8 \text{ kmol de anodo} \times (12 \text{ g/mol}) = 333,6 \text{ kg de anodo/ton de Al}.$$

Massa de CO_2 liberado na atmosfera:

$$n (\text{CO}_2) = n (\text{C}) \Rightarrow m (\text{CO}_2) = 27,8 \text{ kmol CO}_2 \times (44 \text{ g / 1 mol}) = 1.223,2 \text{ kg de CO}_2/\text{ton de Al}.$$

Pelos cálculos desenvolvidos observou-se que os valores encontrados tanto de massa de alumina quanto de anodo *Soderberg* consumidos no processo foram compatíveis como os valores tabelados pela literatura (Tabela 01). Observou-se adicionalmente que, em termos teóricos, o processo necessita de 1,89 kg de Al_2O_3 para fabricar 1,0 kg de alumínio metálico, enquanto a quantidade prática (vista na realidade) é de 1,91 kg de alumina para 1 kg de alumínio metálico (vide Tabela 01), se todas as condições descritas forem obedecidas e tomados os devidos cuidados com o banho eletrolítico durante a redução da alumina. Por último, nota-se também uma considerável emissão de gás carbônico para a atmosfera por tonelada de metal fabricado.

4.3. Tratamento das emissões gasosas

A Novelis, em cumprimento aos condicionantes ambientais das licenças de operação recebidas do Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais (COPAM), de acordo com sua política ambiental, no período de referência, realizou uma série de medidas em todas as unidades de sua planta industrial em Ouro Preto/MG, visando manter as emissões atmosféricas poluentes da Fábrica dentro dos limites legais.

Num mercado cada vez mais exigente e competitivo, ter a qualidade comprovada de produtos é fundamental para a sobrevivência de qualquer empresa. Neste contexto, a Novelis de Ouro Preto/MG, como uma empresa que sempre buscou a melhoria de sua performance e o desempenho de suas unidades, já possuía, no período de referência, certificação pela NBR ISO 9002 (ABNT, 1987), garantindo a qualidade nos produtos da refusão (placas, tarugos e lingotes), dos sistemas de aluminas especiais e dos processos de fabricação do anodo de pasta *Soderberg* e de revestimentos de carbono. Essa ISO integrava o Programa de Qualidade da empresa, iniciado em 1995, com a certificação das aluminas especiais, e consolidado em 1998, com a inclusão dos produtos da refusão.

Contudo, no afã de aprimorar ainda mais a qualidade de seus produtos e serviços, em 1997 a Fábrica de Ouro Preto/MG deu início ao processo de implementação do Sistema de Gestão Ambiental – (SGA) da companhia. A mesma já possuía, desde o início dos anos 1990, um grupo de ações e controles na área ambiental, mas que precisavam ser sistematizadas. Com o SGA, a Novelis implantou uma ação ambiental homogênea em todas as suas unidades no Brasil e no mundo, com práticas contábeis, jurídicas e administrativas uniformes, facilitando o seu gerenciamento e o aprimoramento contínuo. O SGA era um sistema de gestão baseado

no modelo NBR ISO 14001 (ABNT, 2015), a norma internacional de qualidade que trata da gestão ambiental. Sendo assim, a Fábrica se alinhava aos modernos métodos de gestão ambiental nesta área, mantendo-se em acordo com os padrões ISO de qualidade.

Para aprimorar ainda mais a sintonia entre seu desenvolvimento industrial e o meio ambiente, a Fábrica da Novelis de Ouro Preto/MG implementou, por volta dos anos 2000, uma série de equipamentos, com destaque para a instalação de um sistema de lavagem a seco de gases e controle de particulados denominado de *Dry Scrubber*, o qual pode ser visto na Figura 07. Totalmente criado e desenvolvido pela Novelis do Brasil, o *Dry Scrubber* reuniu modernas ferramentas de tecnologia de lavagem e purificação de gases visando construir um equipamento com alto poder de purificação das emissões oriundas das cubas eletrolíticas. O sistema demonstrou uma eficiência mínima de 96%, atingindo até 99% no controle das emissões da Fábrica (FEAM, 2009). Ademais, com esta tecnologia o consumo de matéria-prima também foi reduzido graças à reciclagem do material coletado diretamente das emissões das cubas de redução.

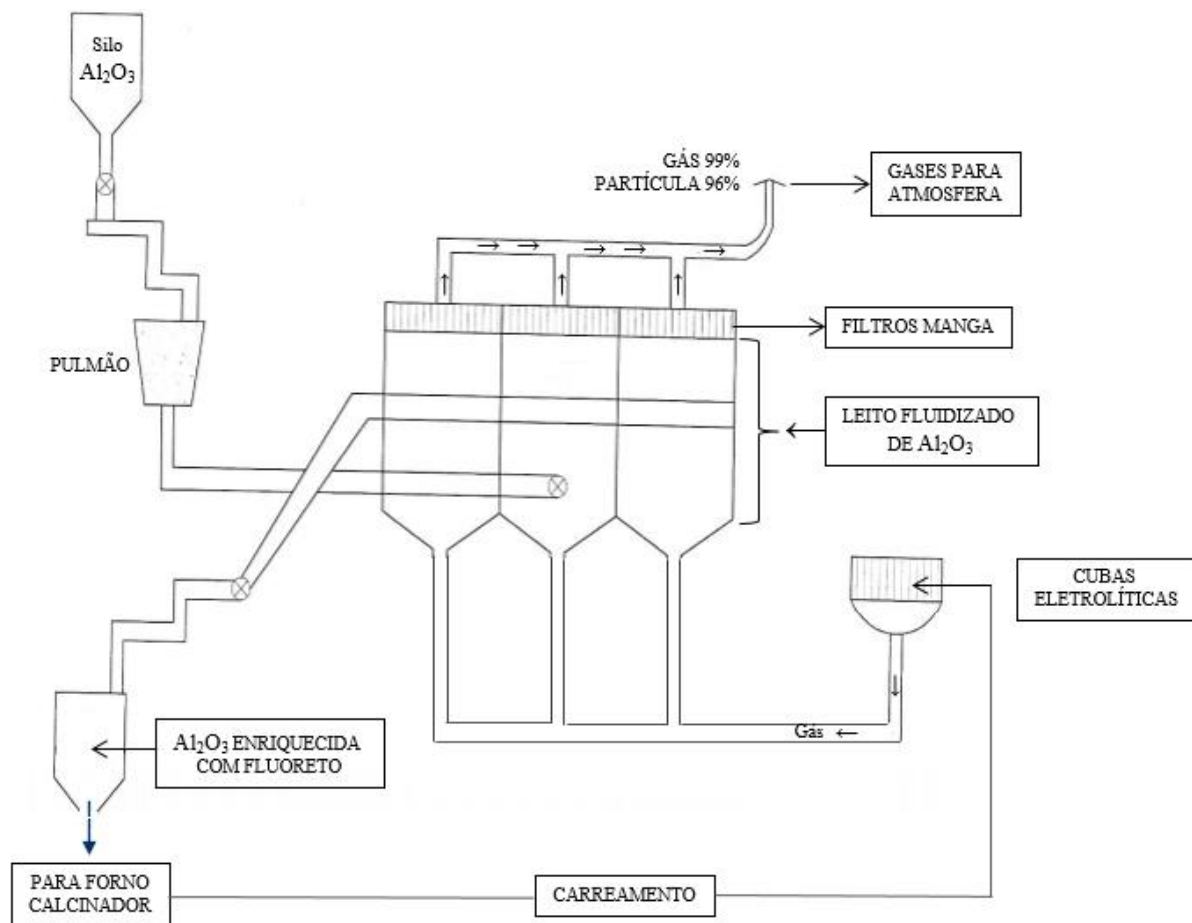


Figura 07 — Fluxograma do *Dry Scrubber* da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG. (Fonte: Adaptado e melhorado a partir de dados coletados em visita técnica à Fábrica, 2020).

A Figura 07 é uma representação esquemática de como funciona o sistema *Dry Scrubber* da Novelis de Ouro Preto/MG. Na prática, os gases poluentes que são emitidos pela cuba eletrolítica são: o Fluoreto Gasoso (FG), o Fluoreto Particulado (FP) e também Material Particulado (MP). Denomina-se Material Particulado Total (ou MPT) a soma das emissões de MP + FP. Todos estes poluentes seriam lançados para a atmosfera e são expressamente intoleráveis pela legislação (Norma CONAMA N° 382/2006) (BRASIL, 2006) e, por este

motivo, eram cuidadosamente tratados pela indústria antes de serem liberados. Para tanto, neste sistema inovador de tratamento de gases criado pela Novelis (*Dry Scrubber*), os poluentes gasosos emitidos pelas unidades de redução, logo após sua emissão, eram então canalizados via pressão negativa no interior do equipamento até um leito fluidizado que era alimentado com alumina pura provinda de um silo de estocagem. Esta alumina retinha e incorporava parte significativa de poluentes, principalmente fluoretos particulados, os quais retornavam então para um outro silo de Al_2O_3 enriquecida. Daí esse material seguia para nova calcinação em forno rotativo para, em seguida, ser reaproveitado para redução na cuba eletrolítica, em um processo de realimentação contínua altamente eficiente e ambientalmente correto.

Como visto, a grande vantagem do *Dry Scrubber* é reutilizar o fluoreto, o qual, na cuba eletrolítica, atua como agente fundente. Esse processo reduz significativamente a concentração de fluoretos que seguem do leito fluidizado para o sistema de filtros manga, ainda dentro do equipamento (Figura 07). Nos filtros manga, os gases contendo já uma baixa concentração de fluoretos totais são ainda filtrados, e somente então liberados para a atmosfera, em concentrações que deveriam obedecer satisfatoriamente a legislação ambiental, conforme apresentado a seguir, na discussão de dados coletados na FEAM acerca de monitoramentos deste órgão ambiental nas instalações industriais da Novelis.

Em Minas Gerais, a FEAM desenvolve programas/projetos voltados para o monitoramento do ar, solo, efluentes líquidos, emissões atmosféricas e resíduos sólidos, visando à melhoria da qualidade ambiental. A FEAM trabalha em parceria com o IEF (o Instituto Estadual de Florestas), o IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas), o COPAM (Conselho de Política Ambiental) e CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente).

O monitoramento, associado ao geoprocessamento é a ferramenta que a FEAM utiliza para verificar a situação do meio ambiente. A partir desse diagnóstico o órgão busca estabelecer metas para subsidiar o Governo na formulação de políticas públicas ambientais mais adequadas, bem como fazer com que os empreendedores cumpram a legislação.

A Tabela 02 apresenta os tipos de emissões gasosas e/ou de material particulado que eram geradas nas chaminés de toda a planta industrial da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG no período de referência. Como um dos objetivos deste trabalho foi acompanhar as emissões gasosas das Unidades de Redução 02 e 03, foi dado ênfase à observação de fluoretos gasosos (FG), fluoretos particulados (FP), materiais particulados (MP) e materiais particulados totais (MTP) destas unidades (Item 04/Chaminé do *Dry Scrubber*/Redução 03/Módulos 01 a 04, Item 07/Chaminé da Torre 01/Redução 02 e Item 09/Lanternins das Reduções 02 e 03), os quais aparecem em negrito, juntamente com os demais tipos de emissões gasosas e/ou de material particulado das demais unidades da indústria.

Na Tabela 03 estão apresentados os parâmetros de interesse desta pesquisa, selecionados dentre os vários existentes no monitoramento feito pela Novelis de Ouro Preto/MG. Esta tabela contém também a respectiva metodologia analítica para determinação e quantificação das emissões em questão, assim como os seus respectivos limites mínimos de detecção.

A Tabela 04 apresenta os resultados de monitoramentos dos parâmetros de interesse desta pesquisa. Os dados são referentes a campanha de amostragens e análise de Chaminés e Lanternins da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG, realizada entre os dias 01 de julho e 19 de novembro de 2008 (sendo equivalente ao terceiro trimestre de 2008). Tais dados foram enviados ao órgão de controle ambiental do Estado de Minas Gerais (FEAM) e acessados pelo autor na sede deste órgão, em Belo Horizonte/MG, mediante solicitação formal elaborada, contendo aval de um docente da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Tabela 02 — Tipos de emissões poluentes geradas nas chaminés de toda a unidade produtiva da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG. (Fonte: Adaptado de FEAM, 2009).

Item	Fonte	Parâmetros
01	Chaminé dos Misturadores	– Material Particulado (MP)
02	Chaminé do Filtro Gema 01	– Material Particulado (MP)
03	Chaminé do Secador de Coque	– Material Particulado (MP)
04	Chaminé do Dry Scrubber – Redução 03 – Módulos 01 a 04	– Material Particulado (MP) – Fluoreto Gasoso (FG) – Fluoreto Particulado (FP)
05	Chaminé do Forno C	– Material Particulado (MP) – Dióxido de Enxofre (SO ₂)
06	Chaminé do forno B	– Material Particulado (MP) – Dióxido de Enxofre (SO ₂)
07	Chaminé da Torre 01 – Redução 02	– Material Particulado (MP) – Fluoreto Gasoso (FG) – Fluoreto Particulado (FP)
08	Chaminé das Torres dos Fornos 02R e 03R – Refusão	– Material Particulado (MP) – Ácido Clorídrico (HCl) – Cloro Livre (Cl ₂) – Óxidos de Nitrogênio (NO _x)
09	Lanternins das Reduções 02 e 03	– Material Particulado Total (MPT) – Fluoreto Gasoso (FG) – Fluoreto Particulado (FP)

Tabela 03 — Relação de parâmetros e seus limites de detecções mínimos avaliados de acordo com métodos de amostragem da ABNT. (Fonte: Adaptado de FEAM, 2009).

Parâmetros	Metodologia	Limite de detecção (LD)
Fluoretos (FG e FP)	Método do eletrodo de íons específicos	0,10 mg/Nm ³
Material Particulado (MP)	Análise gravimétrica	1,0 mg/Nm ³

Tabela 04 — Médias dos resultados das amostragens dos parâmetros de emissões gasosas da Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG. (Fonte: Adaptado de FEAM, 2009).

Fonte	Parâmetro	Unidade	Média das amostragens
Chaminé do Dry Scrubber- Redução 03-Módulos 01 a 04	MP, FT	mg/Nm ³ (MP), kg/ton (FP e FG)	32,23; 0,50
Chaminé da Torre 01 – Redução 02	MP, FT	mg/Nm ³ (MP), kg/ton (FP e FG)	88,18; 4,2
Lanternins – Reduções 02 e 03	MPT, FG e FP	kg/ton (MPT, FG e FP)	6,0; 1,0 e 0,6

Conforme a DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM N° 11, de 16 de dezembro de 1986 (MINAS GERAIS, 1986), o limite máximo permitido para este tipo de indústria (eletrolítica de alumínio), para emissões de material particulado é MP = 150 mg/Nm³. A partir dos resultados da Tabela 04, pode ser observado que o teor de material particulado em nenhum momento excedeu o limite previsto pela lei.

Contudo, ficou claro também que o valor de emissão de material particulado na Chaminé da Torre 01 – Redução 02 (88,18 mg/Nm³), no período de referência, foi o maior observado, i.e., o mais próximo do limite máximo permitido. Tal resultado é indicativo de geração acentuada de poluente nesta unidade de redução, mesmo que não tenha atingindo o valor máximo permitido na legislação.

É possível notar, adicionalmente, que na Chaminé da Torre 01 – Redução 02, a quantidade de material particulado encontrado ($88,18 \text{ mg/Nm}^3$) é muito superior ao valor determinado para a Chaminé do *Dry Scrubber* da Redução 03 ($32,23 \text{ mg/Nm}^3$), o que deixou em evidência, de fato, a grande eficiência do equipamento *Dry Scrubber* criado pela Novelis e instalado na Redução 03.

No caso da emissão de material particulado nos Lanternins das salas de Redução 02 e 03, os resultados são expressos em kg/ton de alumínio, como mostrado na Tabela 04. Neste caso foi estabelecido pela fábrica e pelo órgão ambiental estadual um limite máximo de 4,9 kg/ton. Ou seja, o MPT encontrado no período de referência, de 6,0 kg/ton, foi ligeiramente superior ao estabelecido para esta emissão, com base no valor acordado pela fábrica com o órgão ambiental estadual.

Com relação aos fluoretos gasosos (FG) e fluoretos particulados (FP), o órgão ambiental estadual não estabeleceu limites de emissão para fluoreto total para essas fontes. Então foi checado que a RESOLUÇÃO CONAMA 382/2006 (BRASIL, 2006) estabeleceu como limite máximo de emissão 1,1 kg fluoreto total/ton de alumínio. Nesse caso, o fluoreto total (FT) é a soma dos resultados de fluoreto particulado e fluoreto gasoso, tanto no *Dry Scrubber* quanto na Chaminé da Torre 01 ou nos Lanternins. Logo, observou-se que este limite foi devidamente obedecido no *Dry Scrubber*, mas excedido nos Lanternins (FT = 1,6 kg/ton) e na Chaminé da Torre 01 (FT = 4,2 kg/ton).

Além das emissões gasosas e de material particulado discutidas, esperava-se encontrar nos relatórios de monitoramento, dados sobre a emissão de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's), uma vez que estes poluentes são característicos dos empreendimentos de fabricação de alumínio primário com a tecnologia em discussão. Contudo, constatou-se que o monitoramento da emissão desse tipo de compostos não era realizado pela empresa em questão. A ausência observada desse monitoramento talvez esteja associada à defasagens na própria política de gestão ambiental tanto em nível federal quanto estadual, por não terem estabelecido padrões e métodos para quantificação e controle da emissão de HPA's.

5. Conclusões

Os resultados deste trabalho foram relevantes no sentido de tornar disponíveis os dados de automonitoramento realizado pela empresa em questão, o que geralmente costuma constar nos processos de licenciamento ambiental deste tipo de empreendimento. Tal disponibilização deveria ocorrer dentro de um período e cronograma específicos, porém, verifica-se na prática que, apesar do caráter público destas informações, tais dados geralmente são de difícil acesso para a maioria da população.

Com relação aos dados analisados, verificou-se que instalação do *Dry Scrubber* na Redução 03 demonstrou um desempenho eficiente no controle das emissões de material particulado e fluoretos totais. Por outro lado, na Chaminé da Torre 01 – Redução 02 e Lanternins – Reduções 02 e 03, houve extrapolação, no período de referência, dos limites de fluoretos totais e de material particulado total (Lanternins).

De uma maneira geral, embora a Novelis do Brasil de Ouro Preto/MG tenha realizado iniciativas importantes no sentido de quantificar e controlar suas emissões poluentes, por exemplo, criando o seu Sistema de Gestão Ambiental – (SGA), e buscado se adequar às normas ISO de qualidade, os resultados apresentados e discutidos revelam que ainda precisavam ter sido feitas mais melhorias na área de controle ambiental do processo produtivo desta fábrica. Por exemplo, a simples verificação de resultados de análises de monitoramento periódicas para averiguar o cumprimento ou não de padrões estabelecidos em Lei não é o suficiente para evidenciar melhorias no controle ambiental da fábrica ao longo do tempo. São

necessárias iniciativas mais amplas, tais como pesquisas de campo em áreas urbanas e rurais do município, visando obter maiores subsídios na avaliação da degradação ambiental causada pela fábrica e o grau de impacto desta sobre a saúde da população local exposta a tais poluentes.

6. Referências

ABAL — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. *Alumínio – Cadeia Primária*. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>>. Acesso em 24 set. 2019e.

_____. *Alumínio – Características Químicas e Físicas*. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em 24 set. 2019d.

_____. *Alumínio: História na Indústria*. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/historia-da-industria-do-aluminio/historia-da-industria-no-brasil/>>. Acesso em 24 set. 2019a.

_____. *Aplicações do Alumínio – Outros Setores*. Disponível em: <<http://abal.org.br/aplicacoes/outros-setores/>>. Acesso em 24 set. 2019b.

_____. *Sustentabilidade – Reciclagem*. Disponível em: <<http://abal.org.br/sustentabilidade/reciclagem/>>. Acesso em 24 de set. 2019c.

ABNT — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Modelo de garantia da qualidade para produção, montagem e prestação de serviços*. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. (NBR ISO 9002).

_____. *Sistema de gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. (NBR ISO 14001).

ARQUIVO PÚBLICO MUNICIPAL DE OURO PRETO. *Produção de Alumínio: impactos os na História de Ouro Preto*.

Disponível em: <<http://arquivopublicoop.blogspot.com/2013/02/producao-de-aluminio-impactos-na.html>>. Acesso em 11 set. 2019.

ALVES, C.G.S.M. *Análise comparativa dos impactos ambientais e dos aspectos tecnológicos da produção de alumínio primário em Minas Gerais*. 2011. 254 p. Dissertação (mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

ANM — AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Série Estatísticas e Economia Mineral*. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf>. Acesso em 17 set. 2019.

BRASIL — CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). *Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006*. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Diário Oficial da União. Brasília, 2007.

CALIXTO, I.M.B., AUM, Y.K.P.G., CAVALCANTE, L.A. & SILVA, Y.M. *Verificação experimental de parâmetros térmicos em diferentes materiais*. Perspectivas Online: Exatas & Engenharias, v. 09, n. 24, p. 57–67, 2019.

CIMM — CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. *Hindalco Investe em Fábrica em MG Para Disputar Mercado de Químicos*. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/12000-hindalco-investe-em-fabrica-em-mg-para-disputar-mercado-de-quimicos>. Acesso em 11 set. 2019.

DCI — DIÁRIO COMÉRCIO, INDÚSTRIA E SERVIÇOS. *Alumínio - Alcan Desmembra Áreas e Cria Novelis*. Disponível em: <<https://www.dci.com.br/servicos/alcan-desmembra-areas-e-cria-novelis-1.46061>>. Acesso em 11 set. 2019.

EXAME — REVISTA EXAME. *Novelis Fecha Fábrica de Alumínio em MG até Fim do Ano*. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/negocios/novelis-fecha-fabrica-de-aluminio-em-mg-ate-fim-do-ano/>>. Acesso em 11 set. 2019.

FEAM — Fundação Estadual de Meio Ambiente. *Biblioteca Física do Banco de Arquivos do Acervo da FEAM*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2009.

FEAM — Fundação Estadual de Meio Ambiente. *Web site oficial*. Disponível em: <<http://www.feam.org.br>>. Acesso em 24 de set. 2019.

GOMES, M.P., OLALLA, M.B., SOUZA, T.M., VILLEGAS, T.A. & PINZÓN, F.M. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. In: *Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados - segmento do alumínio*. Brasília, DF, 2017. Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/documents/10584/105176754/PRODUTO+3_Vpublicacao.pdf/bf1ad31a-f7a9-4062-9e9a-0f1eb1dd9e1e>. Acesso em 12 set. 2019.

MINAS GERAIS – CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL (COPAM). *Deliberação Normativa COPAM nº 11, de 16 de dezembro de 1986*. Estabelece normas e padrões para emissões de poluentes na atmosfera e dá outras providências. Diário Executivo. Minas Gerais, 1987.

MORAIS, M.O., BREJÃO, A.S. & NETO, P.L.O.C. *A logística reversa aplicada na fundição de alumínio auxiliando na redução do consumo de energia e de bauxita*. Perspectivas Online: Exatas & Engenharias, v. 05, n. 12, p. 1–10, 2015.

NOVELIS – NOVELIS DO BRASIL DE OURO PRETO/MG LTDA. Disponível em: <<https://novelis.com/pt-br/22102-2/>>. Acesso em 24 de setembro de 2009.

SAMPAIO, J.A., ANDRADE, M.C. & DUTRA, A.J.B. *Bauxita*. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Comunicação Técnica Elaborada para o Livro Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações Parte 2 – Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações, cap. 14, 2008, p. 311 – 337.

SHREVE, R.N. & BRINK Jr., J.A. *Indústrias de processos químicos*. 4.ed., Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 2012.

SILVA, D.C.C. *Estudo sobre a vulnerabilidade sócio-ambiental no Município de Alumínio, São Paulo, a partir da poluição do ar*. 2010. 127 p. Dissertação (mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.