

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Pedro Hespanha Almeida

**PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA DE RECONCILIAÇÃO DE LAVRA PARA
FÁBRICAS DE CIMENTO PORTLAND**

Belo Horizonte
2022

Pedro Hespanha Almeida

**PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA DE RECONCILIAÇÃO DE LAVRA PARA
FÁBRICAS DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação de Mestrado Profissional apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Alizeibek Saleimen Nader

Belo Horizonte
2022

A447p

Almeida, Pedro Hespanha.

Proposição de metodologia de reconciliação de lavra para fábricas de cimento Portland [recurso eletrônico] / Pedro Hespanha Almeida. – 2022. 1 recurso online (162 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Alizeibeck Saleimen Nader.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 105-162.

Bibliografia: f. 99-104.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Calcário - Teses. 4. Cimento Portland - Teses. 5. Mineração - Teses.
I. Nader, Alizeibeck Saleimen. II. Universidade Federal de Minas Gerais.
Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

UF **m** G

***PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA DE RECONCILIAÇÃO DE LAVRA
PARA FÁBRICAS DE CIMENTO PORTLAND***

PEDRO HESPANHA ALMEIDA

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 27 de julho de 2022.

Por:



Prof. ALIZEIBEK SALEIMEN NADER (UFMG)

Orientador

Documento assinado digitalmente

gov.br

ROBERTO GALERY

Data: 26/07/2022 13:04:07-0300

Verifique em <https://verificador.it.br>

Prof. ROBERTO GALERY (UFMG)

Pedro Casagrande

Prof. PEDRO BENEDITO CASAGRANDE (UFMG)

AGRADECIMENTOS

Para mim, a oportunidade de continuar os estudos e ingressar num programa de Mestrado foi algo muito esperado e sonhado. Nessa caminhada, são muitos os agradecimentos que com satisfação deixo a seguir:

A Deus, pelo dom da vida, pela saúde, proteção e bênçãos que tem me agraciado em todo meu percurso, em cada momento, e em todos os lugares por onde caminho.

Ao meu pai, André, e a minha mãe, Josemary, que por meio do amor e da amizade, foram minhas bases e principais referências. Do autodidatismo do meu pai e da dedicação esforçada da minha mãe, vieram os valores que me ajudaram a fazer este trabalho.

À minha querida Rayza, que vibrou comigo em cada etapa, desde a aprovação para ingressar no Mestrado, até os dias finais da dissertação. Obrigado por me ajudar a pensar cientificamente, a escrever, a questionar e a encontrar o foco quando estive disperso (não foram poucas as vezes). Espero estar retribuindo em igual medida para a sua caminhada profissional.

Ao meu orientador, professor Beck Nader, por sua disposição em me orientar no Mestrado, por aceitar o desafio de fazê-lo à distância, por força da pandemia, e por tê-lo feito de forma sempre educada e construtiva, em favor do conhecimento e da nossa Escola de Engenharia da UFMG.

À InterCement Brasil, nas pessoas seus diretores e gerentes, que aprovaram a realização deste trabalho utilizando dados reais de suas fábricas de cimento. Coube a mim a honra de inaugurar este tipo de solicitação no setor de *Compliance* da empresa.

Ao geólogo Alexandre Vergani e ao engenheiro de minas Rodrigo Faria, da InterCement Brasil, ambos profissionais e gestores de grande competência. Agradeço muito por sempre me estimularem a fazer o Mestrado e por me propiciarem as condições de tempo para conseguir fazê-lo.

Aos meus colegas de equipe: Itamar Cezar, Joás Barroso, Laura Corrêa e Sílvio Ventzke, agradeço pela ajuda de fato prestada durante este trabalho nos últimos dois anos, e pela convivência e pelos ótimos projetos que desenvolvemos em equipe.

Agradeço aos meus colegas nas fábricas de Candiota/RS e Cajati/SP, que gentilmente colaboraram com este trabalho de uma forma ou de outra: Wellington Marques, Leonardo Megre, Diemison Peixoto, Josué Castro, Marcos Strelow e Leandro Passos.

Aos amigos e doutores em engenharia, Décio Freitas e Eduardo Alexandrina, que ajudaram muito, talvez mais do que imaginam, com seus valiosos pensamentos sobre a natureza da pesquisa científica e do desafio de escrever uma dissertação.

À minha irmã Carolina Hespânia, que por sua própria trajetória pessoal de conciliar trabalho e estudos, ambos com grande brilhantismo, sempre foi para mim um modelo a ser seguido.

Por fim, não poderia deixar de agradecer ao amigo, geólogo Nylton Müller, a quem tenho o privilégio de ter como mentor profissional. Agradeço imensamente a sua generosidade ao transmitir para mim parte de seus vastos conhecimentos, pela paciência que teve com um (então) jovem e inexperiente engenheiro, e pelas instigantes discussões técnicas, quase filosóficas, que foram muito importantes não só para este trabalho, como também para minha vida profissional e pessoal.

“Enquanto não alcançares a verdade, não poderás corrigi-la. Porém, se não a corrigires, não a alcançarás. Entretanto, não te resignes.”

(José Saramago)

RESUMO

Na cadeia de valor mineral, a matéria-prima de entrada é o minério extraído da jazida, o qual se busca conhecer e modelar através da pesquisa geológica. As incertezas quanto à quantidade e teor do minério obtido na lavra permanecem, por melhores que sejam os modelos criados para planejar as atividades. Os eventuais desvios na produção se propagam com consequências danosas para as demais atividades da cadeia e chegam ao produto, prejudicando o desempenho econômico e socioambiental das mineradoras. Uma das formas de se utilizar das informações geradas ao longo da cadeia para aferir e melhorar o modelo, é realizando a reconciliação de lavra. A reconciliação é um processo geometalúrgico no qual são reunidas comparadas as quantidades e teores fornecidos pelo modelo com os efetivamente obtidos na lavra e no processamento do minério, e por onde se avalia a qualidade do modelo e se pode detectar proativamente problemas como diluição e má amostragem ao longo da cadeia. Embora seja mais comum na mineração de metais, é possível e tem sido demonstrada a aplicação da reconciliação nos minerais industriais. O presente trabalho analisa a cadeia de valor mineral do cimento Portland: a mineração de calcário e argila e sua transformação em clínquer. São discutidas as semelhanças e as diferenças deste setor específico com as minerações de metais, e se propõe uma metodologia para se fazer reconciliação de lavra adaptada às suas particularidades. Em seguida são apresentados dois estudos de caso em fábricas de cimento em operação, como forma de testar a metodologia proposta e avaliar o potencial futuro de sua aplicação, bem como os benefícios gerados e sua abrangência. A integração das atividades primárias da cadeia de valor mineral é importante para se ter modelos preditivos da operação cada vez melhores. Mesmo que não se consiga eliminar em definitivo as incertezas geológicas, a reconciliação é um passo importante para esse fim.

PALAVRAS-CHAVE: calcário; reconciliação; cimento portland; geometalurgia.

ABSTRACT

Mined ores are the main raw material on the mining value chain and are studied and modelled through geological survey data. The uncertainties regarding ore tonnage and grade on short-term operation remain, no matter how good the geological models are. Deviations on production process can propagate with harmful consequences to subsequent activities on the value chain, reaching the final product, while harming the economic and socio-environmental performance of the mining companies. Performing the mine reconciliation is a way to use the data generated along the value chain to check the model and improve it. Mine reconciliation is a geometallurgical method of gathering data of production along the mining and plant process and comparing it at different points, to check the model, and can also be used to proactively detect problems like mining dilution or bad sampling practices. Although it is more common in metal mining, it is being shown that applications of mine reconciliation on industrial minerals sector are possible. This study intends to analyze the mining value chain of Portland cement: limestone and clay mining and its processing into clinker. The similarities and differences between this specific sector and metal mining are discussed, and an adapted methodology to reconcile mining operations on the cement industry is proposed. Afterwards, two case studies are carried out in operating cement plants, to test the proposed methodology and to evaluate the future potential of its practice, as well as the benefits generated and its scope of application. To have increasingly better predictive models, it is important to integrate the primary activities of the mining value chain. Even though geological uncertainties cannot be eliminated, the mine reconciliation is indeed an important step towards this end.

KEYWORDS: limestone; reconciliation; portland cement; geometallurgy.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. A cadeia de valor mineral. (adaptado de Nader, 2013). | 21 |
| Figura 2. Fluxograma de reconciliação proativa (adaptado de CHIEREGATI <i>et al.</i> 2019). | 24 |
| Figura 3. Representação dos tipos de diluição em um bloco de lavra (adaptado de Ebrahimi, 2013). | 26 |
| Figura 4. Fluxograma simplificado de produção de cimento Portland (adaptado de Intercement Brasil). .. | 29 |
| Figura 5. Princípio de funcionamento do PGNAA (adaptado de Thermo Fisher Scientific, 2019). | 34 |
| Figura 6. Espectro típico de radiação gama emitido por alguns elementos químicos (adaptado de Thermo Fisher Scientific, 2019). | 35 |
| Figura 7. Representação do PGNAA instalado sobre um transportador de correias (Thermo Fisher Scientific, 2019). | 36 |
| Figura 8. Uso do analisador PGNAA para dosar o empilhamento de matéria-prima e a formação das pilhas de pré-homogeneização (adaptado de BOND, 2011). | 37 |
| Figura 9. Uso do analisador PGNAA como <i>sorter</i> para separar o calcário em pilhas de diferentes composições químicas (adaptado de BOND, 2011). | 37 |
| Figura 10. Localização do município de Cajati (Google Earth). | 40 |
| Figura 11. Localização do município de Candiota (Google Earth). | 41 |
| Figura 12. Reconciliação ao longo da cadeia de valor mineral, com várias comparações possíveis (adaptado de HARGREAVES, 2014). | 43 |
| Figura 13. Processo de fabricação do cimento Portland dividido em 5 etapas principais (adaptado de VIANNA, 2018). | 46 |
| Figura 14. Delimitação das áreas de mineração e de processo químico numa fábrica de cimento típica (adaptado de VIANNA, 2018). | 48 |
| Figura 15. Reconciliação ao longo da cadeia de valor mineral do cimento. | 51 |
| Figura 16. Panorama da mina de argila em Cajati. | 52 |
| Figura 17. Panorama da fábrica de cimento de Cajati. | 53 |
| Figura 18. Esquema produtivo da fábrica de Cajati, com foco na mineração. | 54 |
| Figura 19. Fluxograma prático para reconciliação da produção de argila minerada em Cajati. | 56 |
| Figura 20. Pontos de coleta de dados na cadeia de valor mineral de Cajati. | 57 |
| Figura 21. Exemplo de frente de lavra da mina de mármore calcítico. | 60 |
| Figura 22. Analisador de calcário (PGNAA), da fabricante Thermo Fisher, em Candiota (foto). | 61 |
| Figura 23. Vista externa da localização do PGNAA, dentro da contenção metálica azul (foto). | 61 |
| Figura 24. Panorama da mina de calcário em Candiota. | 62 |
| Figura 25. Panorama da fábrica de cimento de Candiota. | 62 |
| Figura 26. Esquema produtivo da fábrica de Candiota, com foco na mineração. | 63 |
| Figura 27. Avaliação inicial da cadeia de valor da mineração em Candiota/RS com pontos onde se pode fazer reconciliação (adaptado de MORLEY, 2014). | 65 |
| Figura 28. Fluxograma prático para reconciliação da produção de calcário minerado em Candiota. | 66 |
| Figura 29. Pontos de coleta de dados na cadeia de valor mineral de Candiota. | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 30. Difratoograma de Raios-X da areia usada em Cajati (Relatório Minas Jr, 2022). | 71 |
| Figura 31. Difratoograma de Raios-X da carepa usada em Candiota (Relatório Minas Jr, 2022)..... | 72 |
| Figura 32. Vista em 3D da superfície topográfica, do modelo de blocos e locação da seção vertical..... | 74 |
| Figura 33. Seção vertical N-S do modelo de argila lavrada no semestre. Exagero vertical de 5x..... | 75 |
| Figura 34. Reconciliações realizadas seguindo o fluxograma estabelecido para Cajati. | 77 |
| Figura 35. Vista em 3D da superfície topográfica, do modelo de blocos e locação da seção vertical..... | 81 |
| Figura 36. Seção vertical N-S do modelo de calcário lavrado no semestre. Exagero vertical de 3x..... | 82 |
| Figura 37. Reconciliações realizadas seguindo o fluxograma estabelecido para Candiota. | 84 |
| Figura 38. Furos de desmonte com informação do “pó de rock” compilados ao longo de todo o período. | 86 |
| Figura 39. Exemplo de local lavrado na mina, marcado em amarelo, sem o registro das informações do desmonte..... | 87 |
| Figura 40. Modelo de blocos gerado com as informações dos furos de desmonte (<i>grade control</i>)..... | 88 |
| Figuras 41a e 41b. Modelo de blocos de longo prazo lavrado no período, (a) em toda a área e (b) locais onde também existe a informação dos furos de <i>grade control</i> (b). | 88 |
| Figuras 42a e 42b. Corte do modelo lavrado na região central da cava, na visão do modelo de longo prazo (a) e do modelo gerado com informações do desmonte ou <i>grade control</i> (b). | 89 |
| Figuras 43a e 43b. Corte do modelo lavrado na região sudoeste da cava, na visão do modelo de longo prazo (a) e do modelo gerado com informações do desmonte ou <i>grade control</i> (b). | 89 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Comparativo do teor médio da argila lavrada em um trimestre..... | 55 |
| Tabela 2. Comparativo de teor médio do calcário lavrado em um trimestre. | 65 |
| Tabela 3. Identificação por DRX das fases cristalinas da amostra de areia (Relatório Minas Jr, 2022)..... | 71 |
| Tabela 4. Teores obtidos por FRX na amostra de areia (Relatório Minas Jr, 2022)..... | 72 |
| Tabela 5. Identificação por DRX das fases cristalinas da amostra de carepa (Relatório Minas Jr, 2022).. | 73 |
| Tabela 6. Teores obtidos por FRX na amostra de carepa (Relatório Minas Jr, 2022). | 73 |
| Tabela 7. Massa e teores da argila lavrada em um semestre, pelo modelo de blocos..... | 75 |
| Tabela 8. Massa e teores da argila lavrada em um semestre, pelas análises da fábrica. | 75 |
| Tabela 9. Massa e teores da argila lavrada em um semestre, por retrocálculo da farinha. | 76 |
| Tabela 10. Resultados da reconciliação da produção de argila em Cajati, período de um semestre. | 77 |
| Tabela 11. Resultados mensais da reconciliação da produção de argila em Cajati (4 óxidos). | 80 |
| Tabela 12. Massa e teores do calcário lavrado no período, pelo modelo de blocos. | 80 |
| Tabela 13. Massa e teores do calcário lavrado no período, pelo analisador PGNAA da britagem..... | 83 |
| Tabela 14. Massa e teores do calcário lavrado no período, por retrocálculo da farinha. | 83 |
| Tabela 15. Resultados da reconciliação da produção de calcário em Candiota, período de 11 meses. | 84 |
| Tabela 16. Reconciliação do modelo de reserva com a informação dos furos de desmonte, nas áreas onde as duas informações estão disponíveis. | 90 |
| Tabela 17. Resultados mensais da reconciliação da produção de calcário em Candiota (4 óxidos)..... | 91 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CVM – Cadeia de valor mineral

DRX – Difractometria de Raios X

ERP – *enterprise resource planning*

FRX – Fluorescência de Raios X

FSC – Fator de saturação de cal

KFUI – *Kiln feed uniformity index*

KPI – *Key performance indicator*

LOI – *Loss on ignition*

LSF – *Lime saturation factor*

MA – Módulo de alumina

MCF – *Mine call factor*

MS – Módulo de sílica

P.F. – Perda ao fogo

PGNAA – *Prompt gamma neutron activation analysis*

ROM – *run-of-mine*

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 2. OBJETIVOS | 18 |
| 3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA | 19 |
| 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 4.1. Estrutura da revisão..... | 20 |
| 4.2. Cadeia de valor mineral e indicadores-chave de desempenho | 20 |
| 4.3. Reconciliação de lavra | 23 |
| 4.3.1. O fenômeno da diluição na lavra..... | 26 |
| 4.4. Produção de cimento Portland e o papel da mineração na cadeia de valor | 28 |
| 4.4.1. Analisadores de calcário do tipo PGNAA..... | 33 |
| 5. MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| 5.1. Metodologia da pesquisa em tópicos sequenciais | 38 |
| 5.2. Estudo de caso em fábricas de cimento em operação..... | 39 |
| 5.3. Dados a serem disponibilizados pela empresa | 41 |
| 6. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E PRÁTICO | 43 |
| 6.1. Escolha de um fluxograma-modelo para reconciliação..... | 43 |
| 6.2. Adaptação do fluxograma para o processo do cimento Portland | 45 |
| 6.3. Estudo de Caso 1: mineração de argila na fábrica em Cajati, SP..... | 52 |
| 6.3.1. Avaliação da cadeia de valor mineral..... | 52 |
| 6.3.2. Dados coletados para reconciliação de lavra..... | 56 |
| 6.3.3. Cálculos para reconciliação da argila..... | 58 |
| 6.4. Estudo de Caso 2: mineração de calcário na fábrica em Candiota, RS..... | 60 |
| 6.4.1. Avaliação da cadeia de valor mineral..... | 60 |
| 6.4.2. Dados coletados para reconciliação de lavra..... | 66 |
| 6.4.3. Cálculos para reconciliação do calcário | 68 |
| 7. RESULTADOS | 71 |
| 7.1. Análise mineralógica e química das amostras coletadas..... | 71 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7.2. | Reconciliação da produção de argila na fábrica de Cajati, SP | 74 |
| 7.2.1. | Base semestral..... | 74 |
| 7.2.2. | Base mensal..... | 79 |
| 7.3. | Reconciliação da produção de calcário na fábrica de Candiota, RS | 80 |
| 7.3.1. | Período completo..... | 80 |
| 7.3.2. | Caso especial - Reconciliação do modelo de longo prazo com os furos de desmonte | 86 |
| 7.3.3. | Reconciliação na base mensal | 91 |
| 7.4. | Avaliação dos resultados..... | 92 |
| 8. | CONCLUSÃO | 96 |
| 8.1. | Sugestões para trabalhos futuros | 98 |
| 9. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 99 |

ANEXO I – Relatório de análise da amostra de areia de Cajati

ANEXO II – Relatório de análise da amostra de carepa de Candiota

1. INTRODUÇÃO

A cadeia de valor de uma empresa é definida como a rede de atividades interdependentes, onde há a entrada de insumos ou serviços, e a saída na forma de produto ou serviço que é comercializado, gerando lucro para os envolvidos. Todas as atividades componentes de uma cadeia de valor são necessárias para a concretização do objetivo, e uma divisão pode ser feita entre as atividades principais (diretamente ligadas à produção) e as atividades auxiliares (compras, logística, vendas). A cadeia de valor de uma mina (CVM ou cadeia de valor mineral) diferencia-se de outras pelo fato de que o insumo de entrada é um minério, advindo da extração de uma mina, e sujeito a incertezas quanto à sua uniformidade e desempenho nas demais atividades da cadeia (NADER, 2013).

Entre as possibilidades de integração das atividades da cadeia de valor mineral, aparece a reconciliação de lavra, ou reconciliação mina-usina. Essa é uma atividade realizada na especialmente na mineração de metais, e faz parte do domínio da geometurgia. De maneira sucinta, trata-se de aplicação do princípio de conservação das massas: teoricamente não ocorre geração nem perda de metal em um processo de mineração e beneficiamento, logo ocorre que o conteúdo em metal do minério alimentado no processo (o ROM ou *run-of-mine*) é igual ao conteúdo em metal do produto da usina somado ao conteúdo de metal do rejeito. A checagem da veracidade dessa afirmação num processo mina-usina real é o que permite detectar eventuais falhas no planejamento e perdas no processo. (CHIEREGATI *et al.* 2019).

Através de uma reconciliação pode-se atestar a confiabilidade das previsões de produção feitas a partir dos modelos usados no planejamento de lavra. Bons resultados de reconciliação, baseados em metodologias confiáveis, servem para demonstrar a precisão e acurácia dos modelos de recursos e reservas, bem como dos dados da operação de lavra da mineradora. Por outro lado, resultados ruins de reconciliação indicam problemas em pelo menos uma das referidas fontes de dados, e permitem à empresa agir de forma proativa para localizar, definir e mitigar esses problemas. Como exemplo dos benefícios da prática sistemática da reconciliação, Câmara (2013) comenta que com os resultados da atividade podem-se identificar as lacunas no controle da operação, na amostragem de lavra, nas aferições das balanças de pesagens, e nas análises químicas

feitas a cada etapa, entre outros. El Hajj (2013) destaca ainda que a reconciliação funciona como um teste de qualidade do modelo utilizado para planejamento da operação, considerando as incertezas envolvidas nessa cadeia de valor. Logo, os controles envolvidos na atividade da reconciliação podem ser qualificados como indicadores-chave de desempenho dos processos e todos colaboram para a redução da incerteza geológica.

A metodologia da reconciliação de lavra, compreendendo as ferramentas, dados de entrada e dados de saída do cálculo, foi desenvolvida para minérios metálicos, porém está sendo progressivamente aplicada aos minerais industriais, categoria na qual se inclui o calcário para produção de cimento Portland. Na medida em que os depósitos de calcário e mármore calcítico mais ricos são exauridos e a exploração avança sobre os depósitos de menor teor e geologia mais complexa, aumenta o interesse em se aplicar conceitos elaborados da geometalurgia aos minerais industriais, buscando um melhor controle das operações quanto à qualidade do minério extraído e à uniformidade dos produtos (ELLEFMO, 2019).

O cimento Portland ou cimento cinza, é o aglomerante hidráulico mais consumido no mundo, essencial na composição do concreto e da argamassa, sendo, portanto, um material indispensável para a construção civil. O processo produtivo do cimento Portland, conforme descrito pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019) é uma atividade integrada de mineração - de calcário e argila, principalmente - e indústria química, pois envolve a transformação das matérias-primas em clínquer dentro dos fornos rotativos, e sua posterior moagem junto com aditivos para obtenção do cimento.

Na cadeia de valor do cimento, as fontes principais de matéria-prima são as rochas carbonáticas, e essas são obtidas nas minas de calcário ou mármore. Até 85% da massa total que alimenta o processo, iniciando pela moagem de cru, é composta por calcário. As minas em sua maioria são a céu aberto e são cativas, ou seja, pertencem às cimenteiras e exploram o minério exclusivamente para o abastecimento das fábricas.

O calcário é extraído de um depósito mineral, logo a cadeia de valor do cimento Portland é de fato uma cadeia de valor mineral e está sujeita a incertezas quanto às

propriedades físicas e composição química da matéria-prima. Evidentemente há outras variáveis, mas é correto afirmar que o ato de controlar a qualidade do calcário da mina colabora para controlar a qualidade do produto – o cimento. (MEZZA *et al.* 2020).

Considerando a reconciliação de lavra nas minas de calcário para cimento, pode ser feita a seguinte analogia: em lugar de teores de metal, reconcilia-se o cálcio (Ca) ao longo do processo de produção, dado que esse elemento não se perde no processo, apenas passa da forma de carbonato (nas matérias-primas) para óxido (no clínquer e no cimento). O mesmo raciocínio se aplica aos outros elementos das matérias-primas de correção, como a argila, pois também a sílica (Si), o ferro (Fe) e o alumínio (Al) se mantêm no processo.

Nesta dissertação de Mestrado, objetiva-se explorar as atividades primárias da cadeia de valor mineral do cimento Portland, para se desenvolver uma metodologia de reconciliação específica a essa cadeia, partindo de adaptações e simplificações da metodologia aplicada na cadeia de minérios metálicos. Serão utilizados como estudo de caso os dados reais de duas fábricas de cimento nas regiões sul e sudeste do Brasil, cada qual com suas particularidades em relação aos padrões típicos da indústria, sendo uma delas, inclusive, dotada de um analisador de calcário no britador, do tipo PGNAA (*prompt gamma neutron activation analysis*, ou analisadores de ativação neutrônica por gamas prontos). Em ambas as fábricas são gerados dados em cada atividade primária que compõe o processo, desde a mineração de calcário e argila, até a moagem de cru. Esses dados podem ser reunidos, organizados e empregados para fazer reconciliação e com isso auferir os benefícios da prática citados na literatura consultada.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral a proposição de uma metodologia para realizar reconciliação de lavra na cadeia de valor mineral do cimento Portland, envolvendo operações mineiras de calcário e argila.

Para concretização do objetivo geral, tem-se os objetivos específicos:

- Compreender a cadeia de valor mineral do cimento, estabelecendo um fluxograma-base de todas as suas atividades principais;
- Fazer estudos de caso em duas fábricas de cimento, Cajati (SP) e Candiota (RS), aplicando-se a metodologia proposta para reconciliar a produção de um determinado período;
- Utilizar a potencialidade do analisador de calcário do tipo PGNAA, presente em Candiota (RS), como ferramenta para a reconciliação, indo além de sua função atual de controle de qualidade da produção;
- Avaliar os resultados obtidos nos dois estudos de caso quanto à aplicabilidade e potencial de retorno da atividade de reconciliação na cadeia do cimento.

3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A capacidade de planejar e executar uma operação sem grandes desvios é fundamental para que uma cadeia de valor se possa dizer sustentável e cumpra com seus objetivos econômicos e socioambientais, tais como: a geração de lucro para os acionistas, geração de renda para a comunidade, e o cumprimento estrito da legislação de proteção ambiental. Quando se considera uma cadeia de valor mineral, como a mineração de calcário e produção de cimento Portland, há uma dificuldade adicional e inerente em se fazer planejamentos, devido às incertezas de natureza geológica do depósito mineral. As ações que visem integrar as atividades dessa cadeia e reduzir as incertezas dos modelos geológicos, contribuem decididamente para a melhoria do planejamento e trazem benefícios para os acionistas, comunidades e entes governamentais. O tema da pesquisa proposta nessa dissertação se justifica nessas bases, pois a reconciliação de lavra é uma forma de integrar as atividades primárias de uma mineração, contribuindo para operações mais robustas, com menos incertezas de origem geológica, e que gerem valor econômico e socioambiental conforme planejado.

A relevância do tema reside no fato de que há poucos trabalhos reportados de reconciliação em minas de calcário para cimento, portanto o tema do trabalho deverá ser inovador no meio acadêmico e apontar novos caminhos para controle e planejamento de lavra em fábricas de cimento. Também será possível mensurar se a aplicação da reconciliação, pelo seu potencial de retorno, se justifica em qualquer mineração de calcário para cimento, ou se é indicada para casos específicos e sob que circunstâncias, bem como se o investimento em tecnologias para automatizar ou facilitar esse processo tem potencial de retorno.

Adicionalmente o trabalho tem relevância para a empresa proprietária das fábricas estudadas, pelos benefícios que o processo de reconciliação pode trazer para o planejamento e operação de suas minas de calcário e argila, notadamente complexas para o padrão do setor. Dentre os benefícios, estão: maior previsibilidade dos teores do recurso mineral lavrado; redução de desvios na alimentação da fábrica de cimento; melhor previsibilidade dos gastos com matérias-primas corretivas; melhor controle da diluição do minério; e aumento da recuperação global da reserva no longo prazo.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Estrutura da revisão

Como etapa inicial da pesquisa, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática em periódicos da área, teses, dissertações e anais de congressos.

A revisão apresentada neste capítulo está estruturada da seguinte forma:

- Definição e entendimento da cadeia de valor mineral (CVM), suas particularidades em relação às outras cadeias de valor, e a importância dos indicadores-chave de desempenho;
- Reconciliação de lavra: o que é, para que serve e onde se encaixa na cadeia de valor mineral;
- Diluição de lavra: Definição do fenômeno; como se mede e se controla; quais os impactos que pode acarretar ao processo de reconciliação de lavra e para o aproveitamento da jazida mineral ao longo da vida útil;
- Produção de cimento Portland e mineração: revisão sobre a produção de cimento e suas principais matérias-primas, o calcário e a argila, ambas extraídas a partir de jazidas através da mineração. Uma investigação das particularidades dessas minerações quanto ao controle de qualidade e planejamento da lavra.
- Analisadores PGNAA: devido à presença deste equipamento em uma das minas do estudo de caso, foi feita uma revisão sobre seu funcionamento e histórico de aplicação na indústria de mineração e cimento.

4.2. Cadeia de valor mineral e indicadores-chave de desempenho

A cadeia de valor das empresas, de acordo com Nader (2013), é a rede de atividades interdependentes, com um início na forma de uma entrada de insumos e uma saída final na forma de um produto que é comercializado, gerando lucro para os envolvidos. Todas as atividades componentes de uma cadeia de valor são necessárias para a concretização do objetivo, e uma divisão pode ser feita entre as atividades primárias (diretamente

ligadas à produção) e as atividades auxiliares ou de suporte (compras, logística, recursos humanos, vendas).

Qualquer atividade empresarial pode ser decomposta em um fluxograma de sua cadeia de valor, de modo que esse conceito é muito útil e de aplicação global para estudar a produção de bens e serviços, o comércio, o transporte e a economia como um todo.

Quando se considera uma cadeia de valor mineral, por exemplo, uma mina de ouro e a usina de beneficiamento que a acompanha, a grande distinção é que se trata de uma atividade cujo insumo ou entrada é um minério, ou seja, matéria-prima de origem mineral, inorgânica, obtida a partir da extração de uma jazida. As cadeias de valor mineral se distinguem de outras cadeias pelo fato de que na extração e beneficiamento de minérios existem os fatores de incertezas geológicas quanto à quantidade, recuperação, gasto energético, nível freático, geotecnia e teor do insumo, dentre outras propriedades. Isto ocorre, pois depósitos minerais são formações heterogêneas e seu estudo é feito a partir de amostragens pontuais e interpolações estatísticas dos dados, persistindo incertezas no espaço entre amostras, mesmo que suavizadas por interpoladores matemáticos.

Em Nader (2013), encontra-se um fluxograma ilustrativo da cadeia de valor mineral, com as principais atividades ocorrendo em sucessão. Esse fluxograma, adaptado na Figura 1, pode ser usado para descrever as atividades de qualquer mineradora, com mínimas alterações:

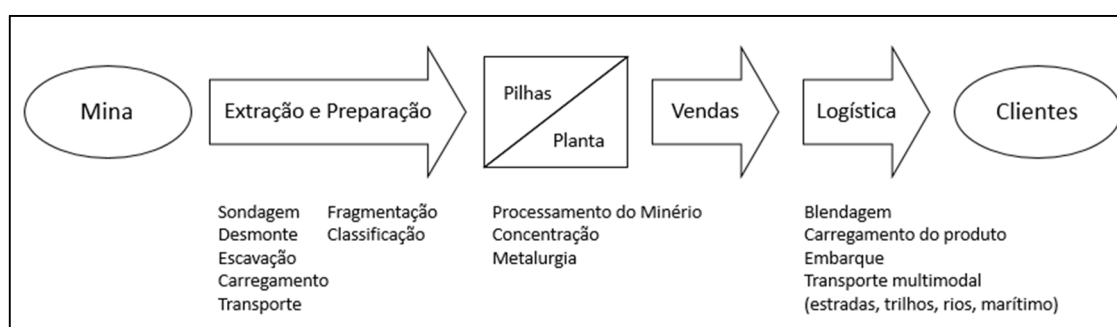


Figura 1. A cadeia de valor mineral. (adaptado de Nader, 2013).

Em Sachs (2009) se encontra o exemplo de duas cadeias de valor que se relacionam e por onde é demonstrada a particularidade da cadeia de valor mineral: a cadeia do minério de ferro e a cadeia da siderurgia. A indústria siderúrgica normalmente adquire das mineradoras o minério de ferro, insumo para produção do aço, em quantidades definidas e com teores mais ou menos constantes e de alta confiabilidade. Já as mineradoras de ferro, que executam a extração e beneficiamento do minério, tem que lidar com os desvios no processo cuja causa raiz são as incertezas geológicas, de modo a obter produtos vendáveis que atendam as demandas da indústria siderúrgica.

Em Sachs (2009) e em Nader, De Tomi e Passos (2012) se considera que o estado atual dos programas informáticos de controle empresarial (os ERP – *enterprise resource planning*) atende às demandas de gestão de compras, manutenção, estoques – atividades comuns da cadeia de valor mineral e outras cadeias – porém são insuficientes ou falham em atender a gestão das atividades primárias da mineração. Entra a questão de se definir e controlar os indicadores-chave de desempenho, ou como são comumente referidos, os KPI (*key performance indicators*) relativos às incertezas da mineração tais como: a massa, o teor, a densidade, a geotecnia, entre outras. A solução de tecnologia para integrar essas atividades num contínuo de informação ainda não está definida.

A incerteza geológica tende a diminuir à medida que se avança na operação e no conhecimento do depósito, em especial quando se aplicam as melhores práticas de controle e esforço para integração e análise sistemática dos dados gerados. No entanto, a incerteza nunca será totalmente eliminada visto que o conhecimento completo só é possível após a completa exaustão da reserva. Apesar dessa limitação definitiva, a definição e medição de KPIs permitirá aferir o grau de aderência dos modelos na prática. (NADER, DE TOMI e PASSOS, 2012).

Na maioria das operações de mineração os problemas como diluição e recuperação na lavra são críticos para a lucratividade da operação e a geração de valor no longo prazo, portanto o entendimento e o controle desses indicadores-chave da operação são essenciais na governança e na boa condução das operações. (MACFARLANE, 2015).

É importante considerar que a integração das atividades primárias, acumulando e utilizando todas as informações geradas pelo conjunto de mina e usina de beneficiamento, atende à demanda de se conhecer mais e de forma mais eficiente o depósito mineral (ELLEFMO *et al*, 2019). A atividade de reconciliação, que se descreve no item a seguir, é uma forma de integrar os dados reais da operação para se verificar a qualidade do modelo e melhorá-lo sempre que possível.

A definição dos dados a serem coletados e dos indicadores a serem controlados sistematicamente, é o primeiro passo para uma integração total. Depois, a aplicação de processos tecnológicos para automatizar essa integração poderá ser convenientemente avaliada, quanto aos investimentos necessários e os retornos e benefícios a serem auferidos. Nessa linha de pesquisa pode surgir uma plataforma ou solução tecnológica, mas antes será preciso pavimentar o caminho demonstrando na prática o quão danoso é perder o planejamento por causa de uma previsão errada fornecida pelo modelo utilizado. (NADER, DE TOMI e PASSOS, 2012)

Em resumo dos tópicos abordados, pode-se afirmar que uma cadeia de valor mineral onde o modelo geológico seja de boa qualidade (minimize as incertezas), onde o planejamento seja bom, e a operação ocorra com boa aderência ao planejado, é uma cadeia de valor que cumpre sua função econômica, cumpre sua licença ambiental de operação e gera benefícios socioambientais. Todo esforço técnico e gerencial deve ser feito, com método criterioso, para integrar as atividades da cadeia e quantificar os possíveis ganhos para a operação. Os ganhos não se restringem ao financeiro, mas também do tipo socioambiental – geração de empregos, ou impactos ambientais mais brandos do que os previstos.

4.3. Reconciliação de lavra

A reconciliação de lavra (ou integração mina-usina) é uma prática comum no planejamento de lavra, especialmente na cadeia de valor dos minérios metálicos. A prática consiste em comparar a massa e teor do minério efetivamente extraído da mina e tratado na usina com as previsões fornecidas pelo modelo de recursos e reservas usado no planejamento (MACFARLANE, 2015).

Num sentido mais amplo, realizam-se também comparações entre as etapas intermediárias dentro do processo global. O estudo da reconciliação é uma aplicação do princípio de conservação das massas: a quantidade de metal contida no produto da usina, somada ao metal contido no rejeito, deve ser igual ao metal contido no minério entrante no processo (*run-of-mine* ou ROM), pois não ocorre, ao menos em teoria, perda de metal em nenhuma etapa. (CHIEREGATI *et al.* 2019)

Entre os dados coletados e comparados na reconciliação mina-usina, estão incluídos: modelos de recursos e reservas, plano de lavra de curto prazo, levantamento topográfico da mina e das pilhas de estéril, dados de softwares de despacho de frota, dados de balanças de pesagem de minério, boletins diários de operação etc. (MORLEY, 2014).

A Figura 2 mostra como a reconciliação funciona através da comparação das entradas e saídas de cada atividade inserida na cadeia de valor de uma mineração genérica:

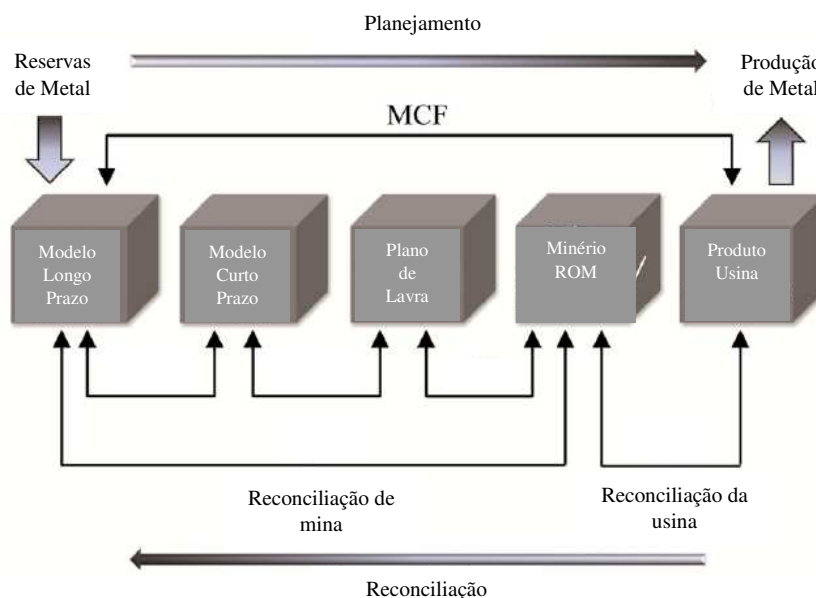


Figura 2. Fluxograma de reconciliação proativa (adaptado de CHIEREGATI *et al.* 2019).

A reconciliação tradicional, denominada por Chieregati *et al.* (2019) de “reconciliação reativa”, usa os dados das saídas do processo (massa, teor, recuperação, gasto energético, entre outros) para estabelecer, por retrocálculo, os dados do minério

lavrado que alimentou o processo. Essa informação é comparada com a estimativa do modelo de recurso da mina para detectar e corrigir as estimativas desse mesmo modelo. Ao comparativo do produto da usina com os blocos do modelo de recurso que geraram este produto, se dá o nome de *mine call factor* ou MCF, representado na Figura 2.

O trabalho de monitorar os dados e fazer o cálculo da reconciliação se insere numa prática de melhoria contínua na cadeia de valor, pois envolve o controle de todas as etapas do processo, além do trabalho multidisciplinar de geólogos, engenheiros e técnicos. Cada um dos dados coletados possui sua própria característica temporal, espacial e física. Os resultados obtidos na reconciliação são usados para ajustar ou refinar o modelo de recursos e reservas utilizado no planejamento de longo prazo da mina. Também servem para ajustar o modelo de curto prazo usado no planejamento da operação. Quando funciona corretamente, a reconciliação acaba por se tornar um ponto focal a partir de onde o desempenho de toda a cadeia é avaliado (HARGREAVES, 2014).

O conceito de reconciliação e a metodologia para desenvolvê-la vem da mineração de metais, inserido dentro das práticas hoje agrupadas e conhecidas como *Geometalurgia*, mas pode e está sendo progressivamente adotada para as operações de minerais industriais. A razão para tal, apontada em Ellefmo *et al.* (2019), está ligada ao esgotamento das reservas mais ricas, levando à necessidade de aumentar a sofisticação e controle das operações com os depósitos mais pobres e de geologia complexa para se ter resultados técnica e economicamente viáveis. Dentre os minerais industriais, se destacam o calcário para cimento e cal, o dolomito, o talco, o feldspato, e argilas de aplicação especial tais como a caulinita e a bentonita.

Considerando a importância de se compreender a cadeia de valor mineral e sua particular dificuldade no trato com a incerteza inerente das matérias-primas minerais, a reconciliação é uma “caixa de ferramentas” onde se inserem e se controlam diversos indicadores-chave da operação como a variação de teores, mudanças abruptas de geologia ou mineralogia não previstas no modelo. (MACFARLANE, 2015).

4.3.1. O fenômeno da diluição na lavra

A literatura consultada cita alguns motivos para uma baixa reconciliação. Entre as possibilidades, destaca-se a diluição do minério. Conforme Crawford (2004), o fenômeno da diluição é definido como o material estéril sendo incorporado ao *run-of-mine* no processo de extração do minério, prejudicando o teor médio de metal obtido na usina.

Em Câmara (2016) igualmente se comenta que a diluição é definida pela porção de estéril misturada ao minério no momento da lavra. A diluição ocorre já no planejamento de lavra, pois nem sempre o formato dos avanços projetados para desmonte segue o contato delineado no modelo entre minério e estéril. No momento da exploração, a diluição ocorre por limitação na seletividade do equipamento de lavra: equipamentos maiores não conseguem selecionar o material nas frentes menores. Ou seja, essa diluição que ocorre nos contatos externos do minério com o estéril, é função do método de lavra escolhido, do tamanho dos equipamentos utilizados, e do formato do contato geológico.

A Figura 3 representa graficamente a diluição em um bloco de lavra:

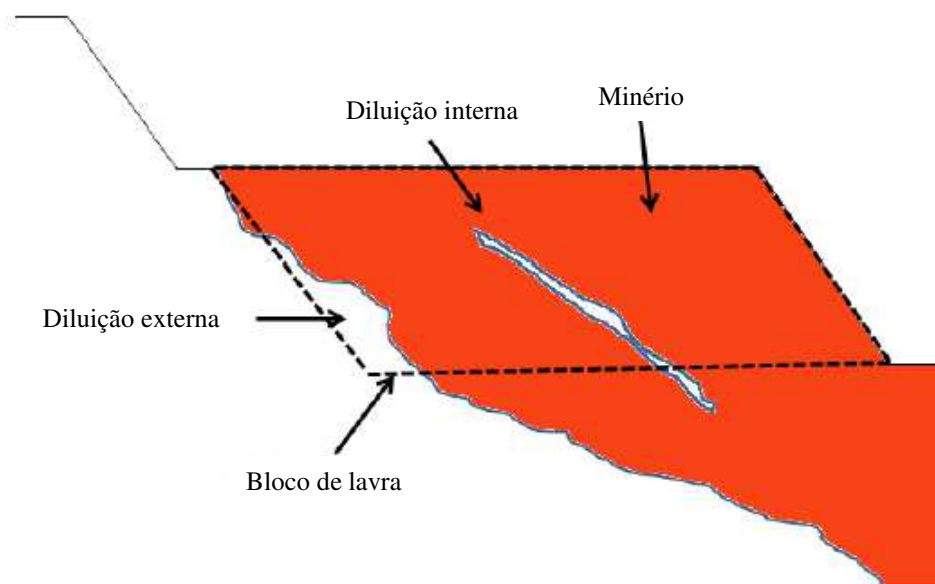


Figura 3. Representação dos tipos de diluição em um bloco de lavra (adaptado de Ebrahimi, 2013).

É fácil demonstrar como a diluição prejudica o resultado de uma reconciliação, pois na prática, diminui o total de metal contido no minério encaminhado à usina. Quando se compara a lavra com o resultado da usina realmente não se terá reconciliação com a previsão fornecida pelo modelo de recurso e reserva. Ebrahimi (2013) comenta que, ao invés de quantificar a diluição, a maior parte das mineradoras define um padrão de até 5% para depósitos maciços, e 10% para depósitos tabulares, e desconsidera que a diluição depende do contato geológico real, e que isso pode variar abruptamente de uma zona a outra do depósito.

Câmara (2016) afirma que o maior problema da diluição, numa mina de minerais metálicos, é de se encaminhar para usina minérios com teores menores que o estimado, podendo até mesmo ficar abaixo do teor de corte (*cut-off*) da jazida, gerando prejuízos acumulados ao negócio, no longo prazo. Essa analogia também é verdadeira para o estudo de caso numa fábrica de cimento, como se verá mais adiante.

O conceito do teor de corte não se aplica aos minerais industriais da mesma forma que para os metálicos, mas influencia sobremaneira no sequenciamento de curto prazo da lavra e na confecção dos *blends* (ou misturas) de minérios pobres e ricos para se atingir os parâmetros necessários ao produto. (ELLEFMO, 2019).

Considerando-se o grande impacto no sequenciamento da lavra e cumprimento e objetivos, e o impacto na redução da vida útil do depósito de minerais industriais, é importante medir e controlar a diluição de lavra, no sentido de se conhecer a diluição teórica do depósito e se estimar a diluição ocorrida na prática. Com isso chega-se a um melhor entendimento dos problemas encontrados na reconciliação mina-usina, e abre-se um leque de opções para melhoria contínua da operação. (CÂMARA, 2016). A estimativa e controle da diluição de lavra depende essencialmente da atividade de reconciliação, afirma MACFARLANE (2015).

4.4. Produção de cimento Portland e o papel da mineração na cadeia de valor

O cimento Portland é o aglomerante hidráulico mais produzido e consumido do mundo. É um componente indispensável da produção do concreto e da argamassa e está presente em todas as obras de construção civil, desde as residenciais, até as estruturas de grande porte como pontes, indústrias, e barragens de hidrelétricas ou rejeitos. Por ano cerca de 1 (uma) tonelada de concreto é fabricada e consumida para cada habitante do planeta (HUNTZINGER, 2009). A demanda global de cimento Portland projetada para o ano de 2030 deve chegar a 6 (seis) bilhões de toneladas anuais, partindo de uma base de 2,8 bilhões de toneladas, crescimento puxado principalmente pelas potências emergentes China e Índia. (SCHNEIDER, 2011).

Em Labahn (1983) encontra-se um breve histórico do cimento: enquanto aglomerante hidráulico (que reage na presença de água), este produto é conhecido e fabricado desde os tempos do Império Romano, persistindo ainda hoje, no Século XXI, construções desta época. A palavra cimento se origina dos termos em latim *opus caementitium* ou *cementum*, que se referem aos ligantes à base de cal que, após hidratação, endureciam e adquiriam forma rígida. A tecnologia de fabricação mudou ao longo do tempo, tendo evoluído até se estabelecer o cimento moderno de cor cinza, ao qual se denomina cimento Portland. O processo de fabricação deste cimento foi desenvolvido pelo inglês Joseph Aspdin e seu filho William, entre 1824 e 1843. O nome Portland foi dado devido à semelhança do cimento já endurecido com as rochas naturais encontradas na ilha de Portland, ao sul da Inglaterra, e ainda hoje é usado para diferenciar o cimento cinza dos outros tipos, como o cimento branco e os cimentos especiais.

O Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) define o processo produtivo do cimento Portland como uma atividade integrada de mineração - do calcário e da argila, principalmente - e indústria química. Em média, para cada tonelada de cimento se demandam 1,40 toneladas de mistura crua alimentada ao forno rotativo e aquecidas a 1.450°C para se transformarem em clínquer, que é moído com gesso e outros aditivos para dar origem aos tipos normatizados de cimento Portland. O clínquer é um produto intermediário, de fácil estocagem e transporte. A mistura crua, por sua vez, é uma composição de matérias-primas finamente moídas a seco e homogeneizadas, no processo

denominado moagem de cru. A mistura crua também é denominada de farinha ou de *raw mix*.

As matérias-primas usadas para produção do cru são o calcário ou mármore calcítico (rochas carbonáticas) e óxidos corretivos de sílica, alumínio e ferro, geralmente na forma de argila ou areia. A composição química da farinha é cuidadosamente controlada, buscando atingir os parâmetros-objetivo, necessários para uma boa clínquerização, além de possuir estabilidade, ou seja, o menor desvio padrão possível em relação ao objetivo. (MEZZA *et al.* 2020).

Para haver produção do clínquer necessariamente deve haver a mina de calcário, que compõe, em média, 85% da alimentação do moinho de cru, e é comum que as empresas possuam também as minas de corretivos como argila e marga (SCHNEIDER, 2011). Os demais corretivos, como areia, bauxita e minério de ferro, são normalmente comprados, devido a seu consumo ser pequeno em volume. A Figura 4 representa uma cadeia completa de cimento Portland, desde a extração do calcário até a expedição do produto:

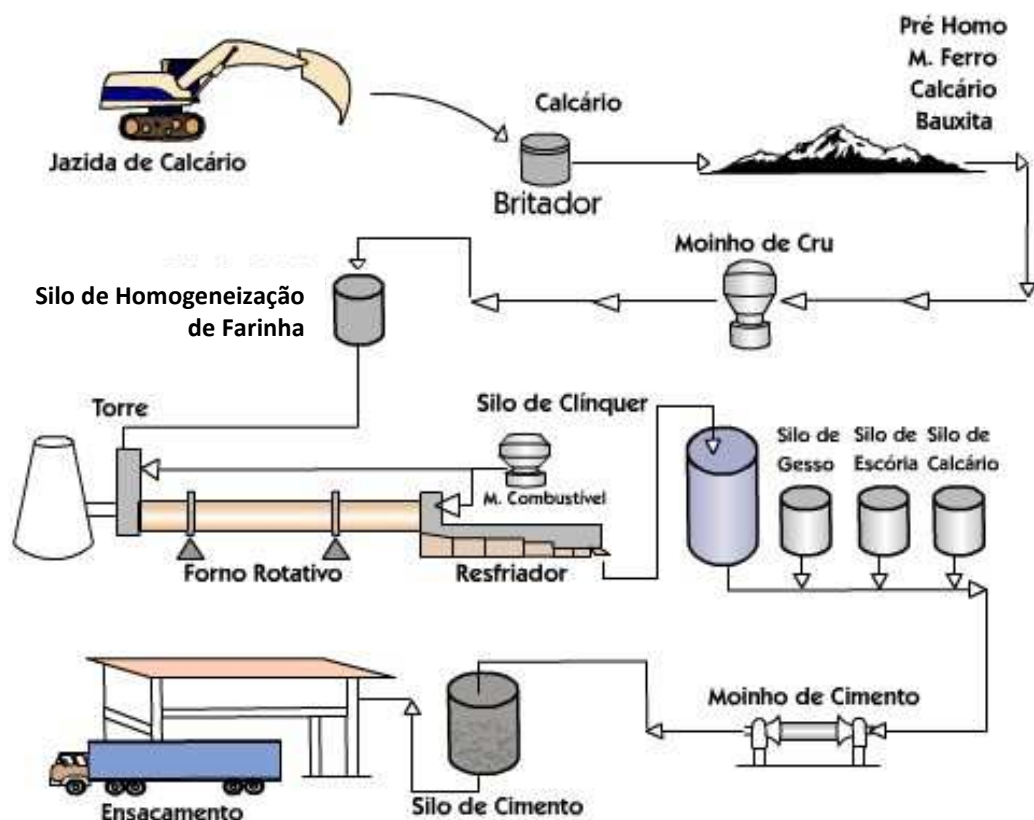


Figura 4. Fluxograma simplificado de produção de cimento Portland (adaptado de Interceмент Brasil).

O calcário, rocha sedimentar química, ou o mármore calcítico, originado pelo metamorfismo do calcário, são as principais rochas mineradas para o cimento. No contexto dessa indústria, são sempre chamados de calcário, independentemente da classificação petrográfica. Essas rochas são consideradas minerais industriais, uma vez que não são exploradas para se purificar e obter um metal em específico, mas sim visando ao aproveitamento da massa mineral como um todo, para aplicação industrial direta de suas propriedades físicas e químicas. (ELLEFMO, 2019).

O cimento é um produto de baixo valor agregado e o lucro é obtido na comercialização de grandes quantidades, transportadas a distâncias não superiores a 300 km. Devido ao efeito da descarbonatação (perda de massa devido à emissão de dióxido de carbono) que ocorre durante a transformação da farinha em clínquer, é mais econômico produzir o clínquer longe dos grandes centros e transportá-los até eles para moer o cimento, do que transportar o calcário para produzir o clínquer perto das cidades. Por este motivo, as fábricas costumam se posicionar próximas das jazidas de calcário, para tirar o máximo de vantagem na produção do clínquer. (MEDEIROS, 2015).

Na mineração de calcário para cimento, busca-se controlar os três parâmetros cimenteiros estabelecidos pelos estudiosos do processo e, caso ocorram na mina, algumas impurezas que são prejudiciais à qualidade do produto. Os parâmetros, que serão brevemente discutidos a seguir, aplicam-se tanto ao calcário minerado, quanto à mistura crua que alimenta o moinho para produzir a farinha – do qual o calcário, como já foi visto, é o principal componente.

O parâmetro cimenteiro principal é o Fator de Saturação de Cal (FSC), ou *lime saturation factor (LSF)*. Este parâmetro mede a razão entre o cálcio e os óxidos de Si, Al e Fe na matéria-prima, determinando o teor de cal livre (CaO) e a qualidade do clínquer que será formado. De modo geral, quanto mais nobres os combustíveis usados no aquecimento do forno rotativo, menor pode ser a saturação, significando menor demanda de cálcio para atingir o ponto ideal de clinquerização. Um clínquer de menor qualidade resultará na produção de cimentos com menor resistência mecânica, ou muito fino, entre outros problemas.

Quando ocorre o uso de combustíveis menos nobres como coque de petróleo ou resíduos (pneus, tecidos, biomassa), deve-se buscar saturação maior, para compensar a fração sólida dos combustíveis que é incorporada ao clínquer (VIANNA, 2018).

O Fator de Saturação de Cal necessário nas indústrias atuais varia tipicamente entre 98 e 108, sendo que essa grande amplitude é devida às diferenças do *mix* de combustíveis adotados em cada fábrica. A fórmula matemática para cálculo do FSC a partir dos óxidos é a seguinte (MEZZA, 2020):

$$\text{FSC} = 100 \times \% \text{CaO} / [(2,8 \times \% \text{SiO}_2) + (1,2 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) + (0,65 \% \text{Fe}_2\text{O}_3)], \text{ varia de 98 a 108.}$$

Esta equação é denominada fórmula de Kühl (LABAHN, 1983). Há variações da fórmula, introduzindo o óxido de magnésio (MgO) no numerador, ou aplicando pesos diferentes para os óxidos no denominador, mas tais fórmulas caíram em desuso, sendo o FSC de Kühl o mais usado hoje.

Os outros dois parâmetros são o Módulo de Sílica (MS) e o Módulo de Alumina (MA), os quais determinam outros parâmetros de controle e desempenho da clinquerização, tais a viscosidade do clínquer fundido no interior do forno. As fórmulas e os valores típicos, são fornecidos:

$$\text{MS} = \% \text{SiO}_2 / (\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3), \text{ varia de 2,00 a 2,50.}$$

$$\text{MA} = \% \text{Al}_2\text{O}_3 / \% \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{ varia de 1,20 a 1,50.}$$

Em Labahn (1983) se explica que o MS caracteriza a razão entre a fração sólida e a fração líquida das matérias-primas fundidas no interior do forno. A essa razão se denomina *fase líquida* do clínquer. Esta fórmula considera que na temperatura do forno, a sílica (SiO₂) se concentra nos elementos sólidos da mistura, enquanto os outros dois óxidos (Al₂O₃ e Fe₂O₃) se concentram na parte líquida. Segundo Duda *apud* Vianna (2018), o MS mais baixo é favorável ao processo de clinquerização, pois aumenta a formação de uma colagem protetora sobre os tijolos refratários no interior do forno rotativo.

Quanto ao MA, ele representa a razão entre os dois principais óxidos da fase líquida, e se presta para mensurar sua viscosidade. O ferro contribui para diminuir a viscosidade, ou seja, um valor de MA menor representa queda na viscosidade. A fase líquida do clínquer e a sua viscosidade são parâmetros de controle muito importantes para garantir que as reações da clinquerização ocorram conforme esperado no interior do forno rotativo. (KIHARA *apud* VIANNA, 2018)

Caso estejam presentes na jazida de calcário, também devem ser controlados os óxidos de magnésio, enxofre, sódio, potássio, titânio, manganês e cloro, como listado em Shimada (1999). Todos estes elementos são impurezas com efeitos indesejáveis no processo de produção e que possuem limites de tolerância estabelecidos por normas técnicas nacionais, ou por questões práticas do processo.

Sendo uma indústria que tem como principal matéria-prima um minério, a fábrica de cimento está tão inserida na cadeia de valor mineral quanto qualquer mineradora tradicional de metais. Está, portanto, sujeita a incertezas quanto aos parâmetros do calcário alimentado na fábrica, pois a obtenção de informações sobre a jazida é limitada às sondagens e amostragens diretas realizadas, e a maior parte da informação é interpolada ou estimada. Mezza (2020) reconhece essa característica e afirma que é necessário controlar a qualidade do calcário, pois sendo grande sua contribuição em massa para o produto final, a afirmação de que “controlar o calcário é controlar o cimento” não é um exagero.

Em Vianna (2018) se ressalta as dificuldades e particularidades da otimização de uma mina de calcário para cimento: além da incerteza geológica inerente a qualquer jazida mineral, o calcário não admite uma otimização matemática pelos algoritmos consagrados devido à dificuldade de se definir no longo prazo um teor de corte para a jazida e sequenciar a extração de modo a sempre atender as demandas estreitas de qualidade do cimento. Isso leva à adoção de abordagens mais holísticas, de análises de fatores exógenos, como restrições de cavernas, e endógenos, como a presença de camadas de calcário mais pobre, para tentar definir os projetos de mineração no longo prazo e conduzi-los na operação de curto prazo.

A indústria de cimento responde, sozinha, por aproximadamente 5% das emissões globais de CO₂ na atmosfera (HUNTZINGER, 2009). Além disso é uma grande consumidora de matérias-primas minerais e energia na forma de combustíveis fósseis. Em razão disso, faz-se necessário controlar e melhorar continuamente o processo produtivo, desde seu início na mineração, para se ter o melhor desempenho e o menor impacto possível (FELLAOU, 2016).

Os crescentes custos da energia elétrica, a demanda de reduzir a emissão de CO₂, e o necessidade de se ter um suprimento adequado de matérias-primas minerais, em volume e em qualidade, são os grandes desafios da indústria para as próximas décadas. Em Schneider (2011) se reitera que o desafio de se atender à crescente demanda global de cimento, com menos consumo de energia e de matérias-primas, e ao mesmo tempo cumprindo com metas de custo, performance e qualidade do produto, só será possível com investimento em treinamento de pessoal e incorporação de tecnologia.

4.4.1. Analisadores de calcário do tipo PGNAA

A atividade de lavra do calcário demanda o controle de qualidade da composição química média, especialmente dos óxidos da matéria-prima e dos parâmetros cimenteiros dados pelas razões entre eles. Para tal controle ser feito, o recurso tradicionalmente usado é a análise do “pó de rock” retirado dos furos para desmonte, analisados em laboratório por fluorescência de Raios X. (MEZZA, 2020).

No final da década de 1980 foi introduzida uma nova tecnologia para controle, usando os analisadores de ativação neutrônica por gamas prontos (*prompt gamma neutron activation analysis*, PGNAA). Esses equipamentos servem para controlar em tempo real a qualidade do calcário e demais matérias-primas, tanto na etapa de britagem e empilhamento, quanto na dosagem do moinho de cru, garantindo uma uniformidade e homogeneidade da farinha que até então não era possível com as análises químicas pontuais do laboratório (BOND, 2011).

A tecnologia de análise pela ativação de nêutrons com radiação gama já é conhecida há mais cinco décadas, ressalta Guerra (2016), porém o desenvolvimento das aplicações

em larga escala tem ocorrido mais recentemente, já na virada do século XXI. Aplicações industriais pesadas, na mineração de calcário para cimento, de carvão, de ferro, e em centrais nucleares, hoje são comuns.

Os PGNAAs utilizam uma fonte emissora de radiação, como o elemento Califórnio 252, para emitir feixes de nêutrons sobre as amostras, cujos átomos os absorvem, ficam instáveis e emitem radiação gama em resposta, de acordo com sua própria composição química. A Figura 5 ilustra o processo de forma simplificada:

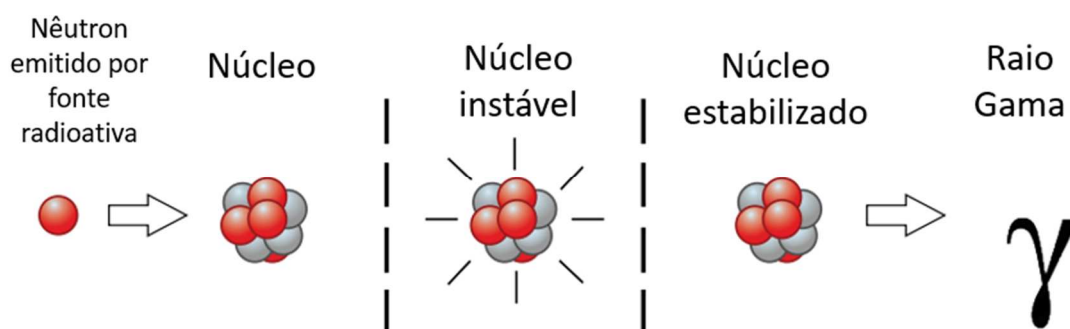


Figura 5. Princípio de funcionamento do PGNAA (adaptado de Thermo Fisher Scientific, 2019).

A radiação gama emitida pelos núcleos instabilizados é captada e analisada pelo leitor do equipamento, feito de iodeto de sódio (NaI). Cada elemento químico presente no material passante pelo analisador emite um certo número de pulsos elétricos a determinada energia, os quais podem ser captados e contados pelo leitor, formando um espectro de radiação próprio, exemplificado na Figura 6, a seguir. Essa assinatura própria de cada elemento permite programar computadores para realizar operações de regressão linear, onde a energia lida no aparelho é comparada com os espectros típicos e se obtém a composição química do material analisado.

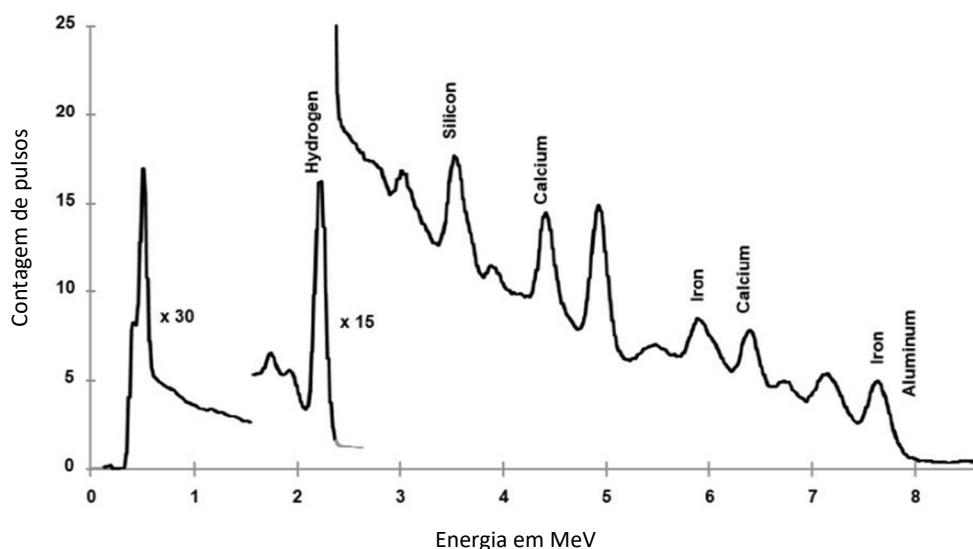


Figura 6. Espectro típico de radiação gama emitido por alguns elementos químicos (adaptado de Thermo Fisher Scientific, 2019).

Nas aplicações na indústria cimenteira é possível reconhecer com notável acurácia a composição do calcário e demais matérias-primas, através de seus elementos Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, bem como outros de menor importância (FOSTER, 2006).

O PGNAA teve grande penetração na indústria de cimento e na mineração de carvão. Hoje há mais de 500 fábricas de cimento no mundo utilizando este equipamento em alguma etapa de sua cadeia, seja na mina ou na moagem de cru. Outras aplicações estão sendo testadas em outras fases da cadeia, como, por exemplo, para análise de combustíveis do forno rotativo, ou do clínquer produzido (BOND, 2011).

Numa aplicação em mineração, o PGNAA costuma ser instalado sobre um fluxo contínuo de material, tipicamente sobre um transportador de correias na saída da britagem ou na alimentação de uma moagem, como mostra a Figura 7, a seguir.

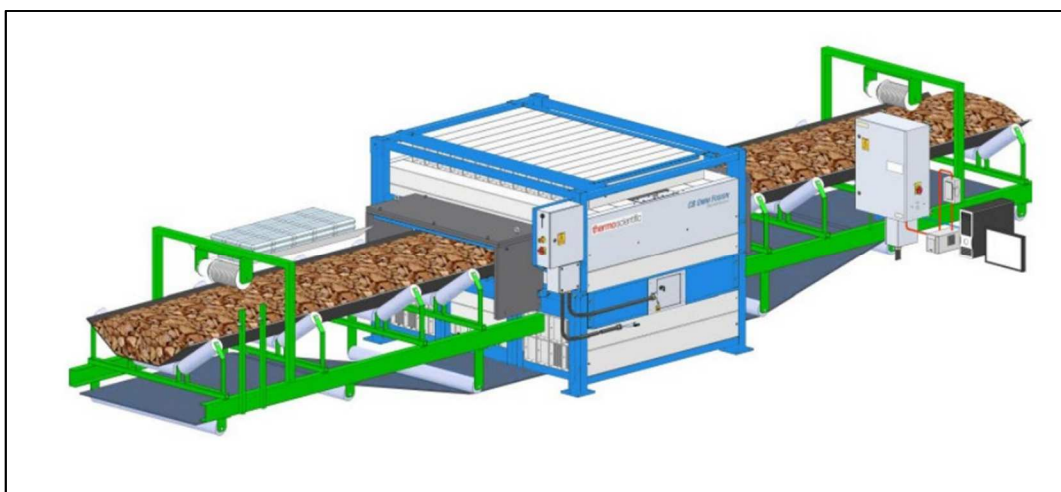


Figura 7. Representação do PGNAA instalado sobre um transportador de correias (Thermo Fisher Scientific, 2019).

Em Qasim (2011) são elencados alguns dos benefícios reais do uso de um PGNAA na mineração de calcário: redução do desvio da farinha alimentada ao forno (indicador denominado *kiln feed uniformity index* – KFUI); menor custo para a aquisição de matérias-primas corretivas; maximização do consumo de calcários de baixo teor de cálcio (minérios marginais). Os benefícios são mensuráveis tanto em cartas de processo quanto em valores monetários.

Quanto ao local de instalação e forma de uso, Bond (2011) informa que os PGNAA normalmente são usados para controlar a dosagem das matérias-primas no britador, de modo a produzir uma pilha de calcário ou a pilha de pré-homogeneização com composição química muito próxima do objetivo químico do processo (os parâmetros FSC, MS e MA já discutidos no item anterior). Alternativamente, podem ser usados como um *sorter*, para separar o material britado em pilhas com intervalo de qualidade conhecido (ex: calcário de alto teor e calcário de baixo teor), as quais depois são retomadas na dosagem de alimentação do moinho de cru.

As Figuras 8 e 9, a seguir, ilustram as aplicações mais comuns do equipamento na cadeia do cimento, como controle de dosagem e como *sorter*:

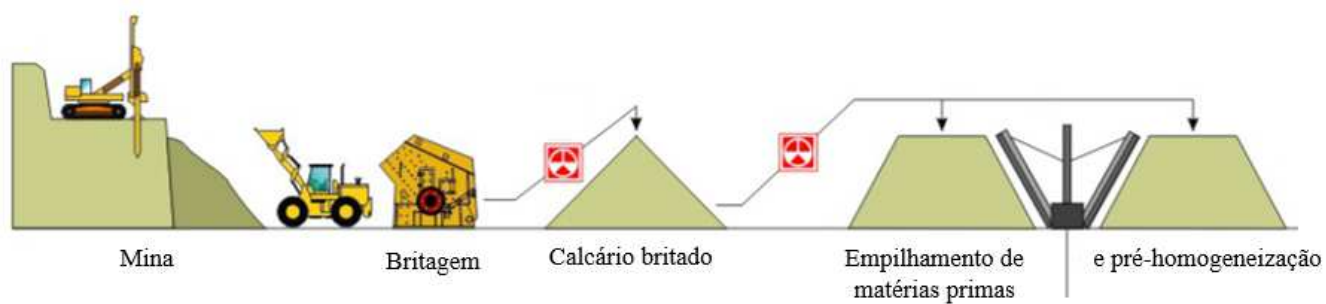


Figura 8. Uso do analisador PGNAA para dosar o empilhamento de matéria-prima e a formação das pilhas de pré-homogeneização (adaptado de BOND, 2011).

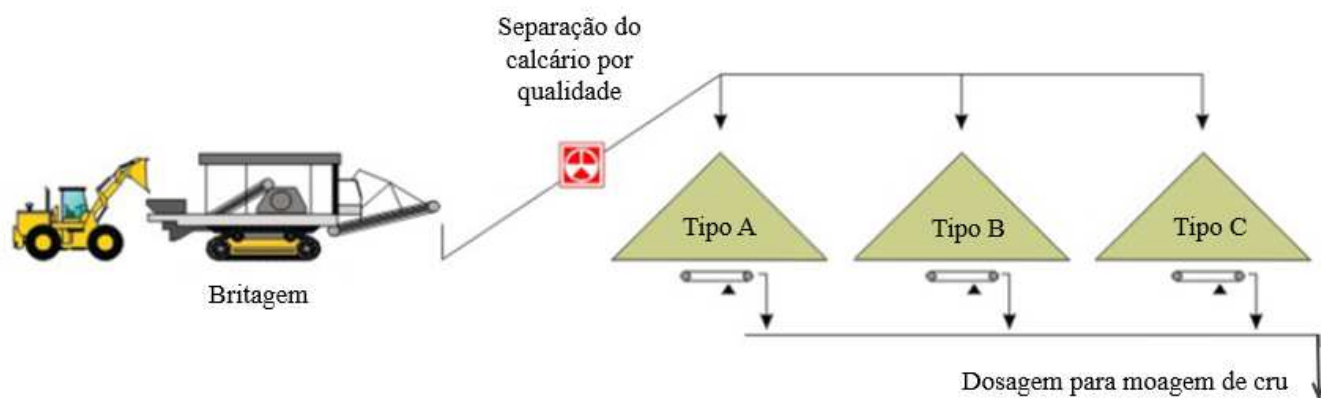


Figura 9. Uso do analisador PGNAA como *sorter* para separar o calcário em pilhas de diferentes composições químicas (adaptado de BOND, 2011).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Metodologia da pesquisa em tópicos sequenciais

- Revisão bibliográfica sistemática tópicos-chave da pesquisa: reconciliação, diluição, analisadores de calcário do tipo PGNAA, e a relação destes temas com a produção de cimento Portland;
- Seleção, dentre a bibliografia consultada, de um fluxograma-modelo do processo de reconciliação tal como se pratica nas mineradoras de metais;
- Avaliação aprofundada da cadeia de valor mineral do cimento Portland e a elaboração do fluxograma teórico do processo de reconciliação adaptado para essa cadeia;
- Levantamento da informação disponível na empresa para construção do banco de dados: sondagens de longo prazo, sondagens pré-lavra, modelos de blocos, análise de “pó de rock” para *grade control*, análises do PGNAA da britagem e análises da farinha produzida;
- Elaboração do fluxograma prático da reconciliação para as fábricas escolhidas para os estudos de caso;
- Realização dos estudos de caso: aplicação da metodologia de reconciliação na fábrica de Cajati, SP (mina de argila) e na fábrica de Candiota, RS (mina de calcário), usando os bancos de dados criados para esse fim;
- Diagnóstico do planejamento e da operação nas duas minas, identificando as principais lacunas que possam impedir a reconciliação de lavra proposta. O foco nessa etapa será responder à pergunta: “*Qual informação necessária para a reconciliação que ainda não é gerada e registrada pela empresa?*”. Em Macfarlane (2015) são exemplificados os nós críticos do processo que podem ser considerados nesse diagnóstico;

- Análise crítica dos resultados obtidos na reconciliação: formulação de hipóteses para alta ou baixa reconciliação, e avaliação dos ganhos esperados com a implementação do sistema.

5.2. Estudo de caso em fábricas de cimento em operação

Como previsto na metodologia, o trabalho incluiu dois estudos de caso em fábricas de cimento em operação, para implementação prática da metodologia. Cada estudo de caso envolveu a visita à fábrica, coleta e processamento dos dados da operação, coleta de amostras, análise química, obtenção de resultados e discussão. Para este fim, foram selecionadas as fábricas de cimento de Cajati e de Candiota.

A cidade de Cajati se localiza no estado de São Paulo, a aproximadamente 250 km de distância da capital, pela rodovia BR-116 (Régis Bittencourt), na região do Vale do Ribeira.

Emancipada de Jacupiranga no início dos anos 1990, Cajati é um polo de mineração com relevância nacional, pois no território do município se localiza um carbonatito que vem sendo minerado continuamente há várias décadas para produção de concentrados fosfáticos. O carbonatito é uma rocha carbonática (rica em CaCO_3) de origem ígnea, que contém uma relevante mineralização de apatita, minério de fosfato.

A fabricação de cimento Portland em Cajati teve início na década de 1970, utilizando o rejeito da usina de flotação da apatita, constituído basicamente de calcário. Além do calcário, a fábrica de cimento necessita minerar argila em jazidas próprias, para efetuar a correção dos teores na farinha. Essa mina de argila será o foco do estudo de caso.

A Figura 10 ilustra a localização de Cajati em relação à capital do estado:



Figura 10. Localização do município de Cajati (Google Earth).

Quanto à cidade de Candiota, ela se localiza no estado do Rio Grande do Sul, a aproximadamente 400 km de distância da capital, com acesso principal pelas rodovias BR-116 e BR-293, na região da Campanha.

Candiota foi emancipada de Bagé no início dos anos 1990. O município também é um relevante polo de mineração, pois em seu território se localiza a maior jazida de carvão mineral do Brasil. Este carvão vem sendo explorado sistematicamente por empresas estatais e privadas, e utilizado para geração de energia elétrica em usinas termoeletricas.

A fabricação de cimento Portland no atual território de Candiota e no município vizinho de Pinheiro Machado teve início na década de 1970. Colaborou para a instalação da indústria cimenteira o fato de Candiota contar com a única grande jazida de calcário calcítico conhecida em todo o estado, com a composição química adequada para a fabricação de cimento. Além disso, as cinzas provenientes da queima do carvão (*fly ash*), constituem excelentes adições para composição de cimento.

A fábrica de cimento estudada em Candiota realiza a mineração do calcário para prover até 99,50% da matéria-prima necessária para a produção do clínquer em suas instalações industriais. Essa mina de calcário será o foco do estudo de caso. A presença de um analisador PGNAA na britagem é um interesse especial.

A Figura 11 ilustra a localização de Candiota em relação à capital do estado:

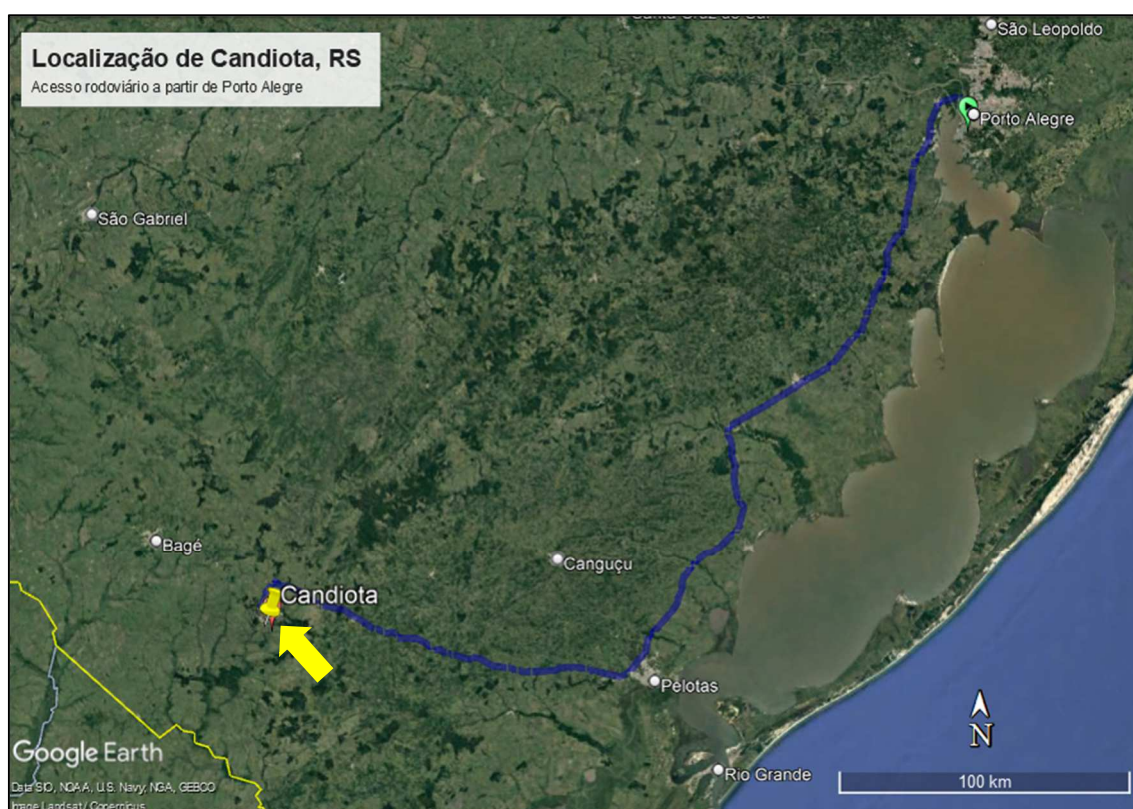


Figura 11. Localização do município de Candiota (Google Earth).

5.3. Dados a serem disponibilizados pela empresa

Para realização do trabalho, foi necessário coletar os seguintes dados de propriedade da empresa InterCement Brasil S.A., proprietária das duas fábricas de cimento estudadas:

- Banco de dados geológico, contendo mais de 10.000 m de sondagens rotativas diamantadas do calcário de Candiota e 600 metros de sondagens a trado mecanizado na argila de Cajati;

- Mapa geológico de detalhe e perfis verticais;
- Modelo de blocos da reserva elaborados pela empresa em *software*;
- Análises químicas do “pó de rock” (*grade control*) em Candiota: cada análise representa 3 a 5 furos de desmonte agrupados;
- Banco de dados completo do PGNAA da britagem de Candiota;
- Análises químicas das matérias-primas de correção adicionadas na moagem de cru;
- Amostras de matérias-primas de correção para realização de análises químicas próprias;
- Análises químicas da farinha (*raw mix*) produzida em ambas as fábricas.

6. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E PRÁTICO

6.1. Escolha de um fluxograma-modelo para reconciliação

O processo de reconciliação segue um fluxograma no qual as atividades da cadeia de valor mineral são comparadas entre si. Conforme foi visto na revisão bibliográfica, as minas onde mais se realiza essa atividade são os minerais metálicos, em especial os de alto valor agregado, dos quais se destaca o ouro (Au), cuja produção é rigorosamente auditada e onde cada ponto percentual de diluição a mais do minério impacta muito na viabilidade econômica do projeto (MACFARLANE, 2013).

No decurso da revisão bibliográfica, foram encontrados alguns modelos de fluxograma-base de reconciliação que poderiam representar a cadeia de qualquer mina de minerais metálicos onde se pretenda realizar a atividade. Dentre estes, destacou-se o apresentado na Figura 12, como um bom exemplo de reconciliação tradicional.

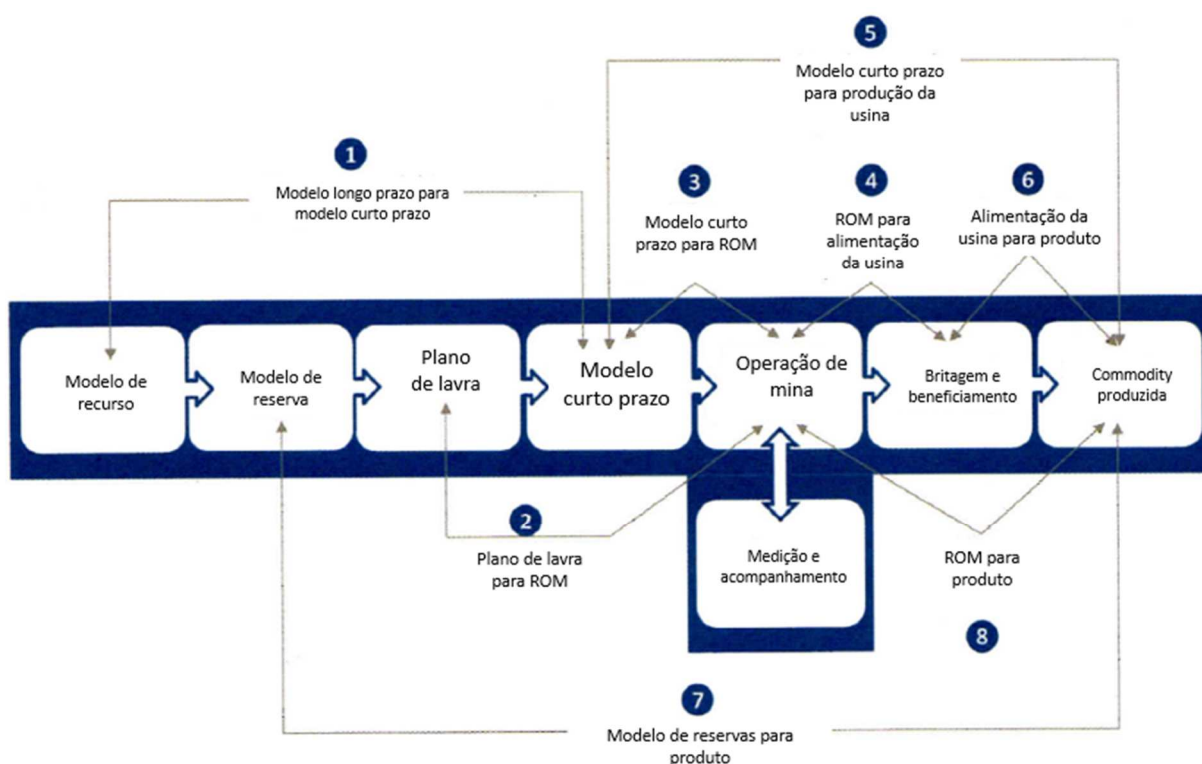


Figura 12. Reconciliação ao longo da cadeia de valor mineral, com várias comparações possíveis (adaptado de HARGREAVES, 2014).

Há outros fluxogramas ainda mais extensos, como o mostrado em Fouet (2009) e em Macfarlane (2013), que abrangem até as etapas de logística e venda do produto, mas não foram utilizados como base neste trabalho, justamente por serem muito complexos.

Ainda sobre o fluxograma da Figura 12: para fins de esclarecimento neste trabalho, se explicam brevemente os termos utilizados em cada atividade da cadeia:

- Modelo de recurso (ou modelo de longo prazo): é o modelo geológico elaborado em *software* de engenharia, a partir das informações da pesquisa mineral da jazida (topografia, mapeamento, geofísica, sondagem, análise química). Este modelo é a base para se reportar o Recurso Mineral.

- Modelo de reserva: normalmente, o modelo de reserva é o próprio modelo de recurso, cortado pelo projeto de cava final a céu aberto ou de exploração subterrânea. Em outros termos, ele incorpora os fatores modificadores que influenciam na escolha do método de lavra, nos limites ambientais e na estabilidade das escavações. Esse modelo é a base para se reportar a Reserva Mineral.

- Plano de lavra: o plano de lavra, dividido em longo, médio e curto prazo, é o projeto das áreas da mina onde ocorrerão os avanços (exploração) de minério e remoção de estéril. Os planos podem ser de longo prazo, chegando na configuração final prevista para a reserva, ou podem cobrir períodos curtos tão curtos quanto um mês (plano mensal).

- Modelo de curto prazo: também chamado de modelo de *grade control* ou modelo de pré-lavra, é um modelo construído a partir de informações obtidas de amostragens das frentes de lavra e de sondagens menos profundas e menos espaçadas. Estes modelos possuem vida útil curta, pois são criados somente para detalhar as áreas que estão em lavra ou onde se iniciarão as atividades num curto prazo.

- Operação de mina: refere-se ao minério efetivamente extraído, o ROM ou *run-of-mine*, cuja quantidade e teor podem ser controlados por sistema de despacho, analisador PGNA ou outra tecnologia.

- Britagem e beneficiamento: refere-se ao controle de qualidade do material recebido na usina para iniciar o processo de beneficiamento.

- *Commodity* produzida: é o produto saído da usina. Geralmente é um concentrado de metal (ferro, cobre, alumínio, zinco, ouro, entre outros), que é vendável em mercados globais, vindo daí o uso do termo *commodity*.

Voltando à Figura 12, estão indicados sobre o fluxograma um total de 8 (oito) reconciliações que podem ser realizadas entre as atividades da cadeia. Para que se possam realizar tais reconciliações, são necessárias basicamente as informações de massa ou volume de minério e seus respectivos teores do elemento/metall de interesse em cada atividade da cadeia. O detalhamento das informações necessárias é bastante explorado em Hargreaves (2014) e inclui dados de fontes diversas como balanças, levantamentos topográficos de mina e pilhas de estoque, análises químicas de amostras representativas, entre outros.

6.2. Adaptação do fluxograma para o processo do cimento Portland

Uma vez compreendido o esquema geral de se ordenar as atividades da cadeia de valor mineral (até a obtenção do produto) na forma de um fluxograma de reconciliação, passou-se a avaliar o processo produtivo do cimento e seus detalhes para se chegar a uma delimitação do problema.

A produção de cimento, conforme visto na revisão bibliográfica, começa pela mineração, que é a forma mais econômica e segura de se obter o suprimento de minérios em quantidade e qualidade necessárias. No âmbito da produção de cimentos, os minérios (calcário, argila e outros) são usualmente chamados pelo termo “matérias-primas” (*raw materials*) refletindo o fato de que são minerais industriais lavrados por suas propriedades químicas e físicas, e não pelo seu teor de um elemento específico.

Na Figura 13 apresenta-se um processo genérico de produção de cimento, que inclui as cinco principais etapas que se encontra em uma fábrica de cimento típica:

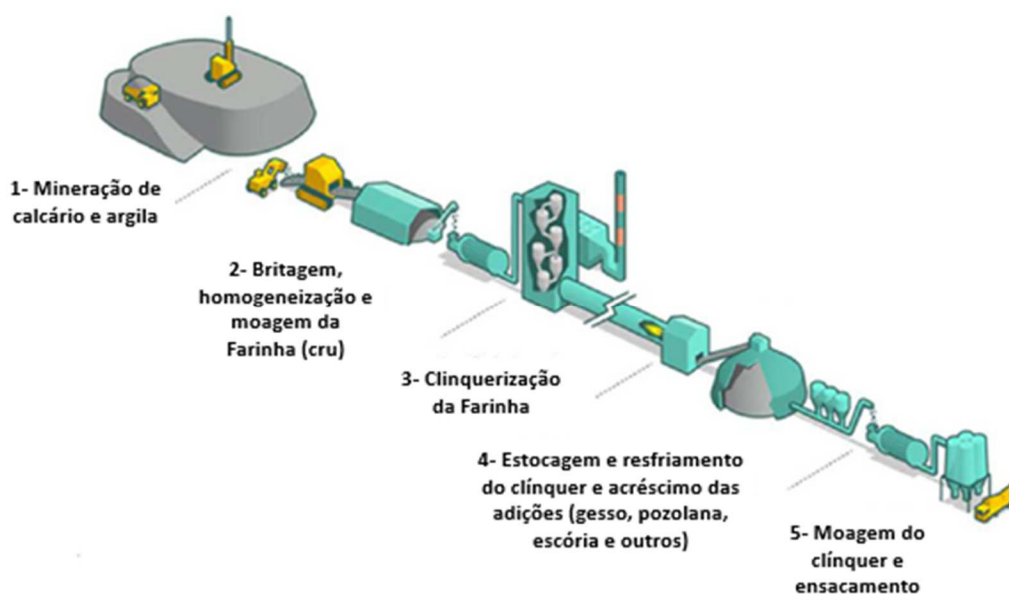


Figura 13. Processo de fabricação do cimento Portland dividido em 5 etapas principais (adaptado de VIANNA, 2018).

As matérias-primas de origem mineral entram no processo pelos pontos 1, 2 e 4 do esquema da Figura 13. Geralmente a empresa proprietária da fábrica também detém e opera a jazida de calcário, para ter garantia das reservas e do controle de qualidade por toda a vida útil do empreendimento. A presença da mineração de argila, como suprimento matéria-prima corretiva também é muito comum, pois são poucos os calcários que possuem naturalmente a proporção correta de óxidos de Ca, Si, Al e Fe para atender os módulos FSC, MS e MA conforme visto na revisão bibliográfica.

A etapa 1 consiste na mineração do calcário, da argila e, eventualmente de outras substâncias que também sejam utilizadas na composição da mistura crua, que podem ser: marga, filito, quartzito, entre outras. Com raríssimas exceções, a mineração ocorre pelo método a céu aberto, em cava ou em encosta.

Na etapa 2, de britagem, homogeneização e moagem de cru, é comum que sejam feitas correções com volumes pequenos de matérias-primas tais como: areia, bauxita, caulim e minério de ferro, com o intuito de se fazer um ajuste fino em determinado elemento. Devido ao baixo consumo em massa, geralmente essas matérias-primas de correção são

compradas, pois a posse e gestão de uma jazida própria teria a viabilidade econômica questionável dada a pequena escala de produção.

A etapa 3, clinquerização da farinha, inclui o pré-aquecimento na torre de ciclones e depois a clinquerização em si, que ocorre no interior no forno rotativo. Nesta etapa, ocorrem as transformações químicas que foram os compostos do clínquer. Não ocorre adição de matérias primas-minerais.

Na etapa 4, de acréscimo das adições ao clínquer para a moagem e produção final do cimento, várias das possíveis adições são matérias-primas minerais: o gesso, o próprio calcário ou a pozolana natural. Não é incomum que as fábricas detenham ao menos uma mina de uma destas matérias-primas, ou que aproveitem calcário usado para a moagem do cru também como adição ao cimento.

A etapa 5 compreende propriamente a moagem do cimento e o ensacamento para expedição e venda. O cimento também é vendido a granel, com carregamento direto em caminhões especiais para este fim.

Antes de mais considerações, é importante ressaltar que a produção de cimento é um processo que ocorre totalmente a seco. A única fração de água que adentra o processo é a umidade natural das matérias-primas adicionadas. A moagem de cru ocorre à seco e na presença de gases quentes do forno, que eliminam a umidade natural. Na clinquerização é eliminada a água de cristalização de todos os minerais presentes na farinha. A moagem de cimento também é feita à seco e com gases quentes, que eliminam qualquer umidade presente nas adições ao clínquer.

Indo adiante na análise do processo, conforme visto na etapa de Revisão, o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019) divide a cadeia entre atividades de mineração, processo químico e moagem.

De fato, o que se observa é que a Farinha é uma mistura moída de matérias-primas, a maior parte delas de origem mineral, enquanto que o clínquer, produto da etapa seguinte,

passou por uma transformação química durante o pré-aquecimento e o percurso no interior do forno, que incluem a descarbonatação (conversão do carbonato de calcário em óxido de cálcio e a emissão de gás dióxido de carbono), a formação de óxidos complexos e a incorporação de elementos presentes nos combustíveis utilizados para o aquecimento.

O SNIC não formaliza qual seria o limite ou “fronteira” entre as atividades do domínio da mineração e as do domínio do processo químico. Tal delimitação faz-se necessária para seguir com a analogia do fluxograma de reconciliação para a produção de cimento.

Deste modo, propõe-se a delimitação das áreas de mineração e processo químico conforme a Figura 14, tomando como base o mesmo esquema apresentado na figura anterior.

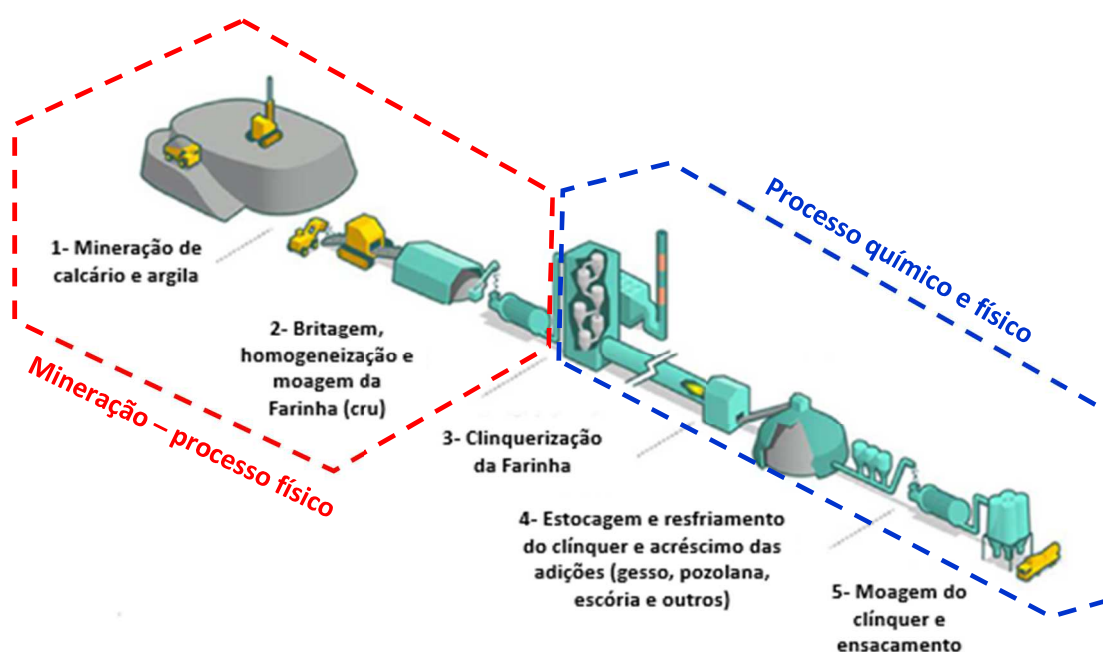


Figura 14. Delimitação das áreas de mineração e de processo químico numa fábrica de cimento típica (adaptado de VIANNA, 2018).

Essa figura permite distinguir claramente a cadeia de valor mineral do cimento, ainda sem detalhar suas atividades principais. Nesse âmbito, a moagem de cru funcionaria como uma “usina de beneficiamento” da produção mineral, entregando um “concentrado” (a farinha) para atividades subsequentes de transformação química até se chegar ao produto

final, à semelhança das minas de minérios metálicos, cujas usinas de beneficiamento de fato processam o minério até se obter o concentrado. A diferença entre as cadeias de valor do cimento e outras minerações, é que no cimento há uma maior verticalização do processo, pois que a farinha é transferida internamente na fábrica e utilizada logo em seguida para produção do clínquer. Enquanto isso, na maior parte das operações de metálicos, os concentrados são os produtos vendáveis, ficando a parte da Metalurgia geralmente a cargo de outras empresas.

Portanto, feita essa proposição de delimitar a reconciliação de lavra entre a mina e a moagem de cru, convém avaliar qual elemento químico (ou elementos) será alvo da reconciliação. No caso geral de mineração de metálicos, o metal a ser reconciliado é evidente, já para a indústria cimenteira, é preciso avaliar as matérias-primas que são utilizadas no processo.

As rochas carbonáticas, das qual o calcário é o principal exemplo, são as matérias-primas principais da composição da farinha, e contribuem com o elemento cálcio (Ca) para a formação do clínquer. Já as matérias-primas de correção (argila, areia, bauxita, minério de ferro etc.) contribuem com alguns elementos para ajustar os parâmetros cimenteiros da farinha, que conforme já visto, são: FSC (fator de saturação de cal), MS (módulo de sílica) e MA (módulo de alumina).

Das fórmulas matemáticas dos parâmetros cimenteiros encontram-se, então, os principais elementos a se reconciliar. Novamente, as fórmulas são as mesmas já apresentadas, apenas uma pequena diferença no cálculo do FSC, adotada na empresa: ao invés do fator 1,2 como multiplicador do Al_2O_3 , utiliza-se o fator 1,18:

$$FSC = 100 \times \%CaO / [(2,8 \times \%SiO_2) + (1,18 \times \%Al_2O_3) + (0,65 \%Fe_2O_3)], \text{ varia de 98 a 108}$$

$$MS = \%SiO_2 / (\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3), \text{ varia de 2,00 a 2,50}$$

$$MA = \%Al_2O_3 / \%Fe_2O_3, \text{ varia de 1,20 a 1,50.}$$

Logo, os elementos, em sua forma de óxidos, são: CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃.

Convém expandir a avaliação para incluir os demais óxidos relevantes na composição típica destas matérias-primas, das quais se destaca o magnésio (MgO), que não raro é um contaminante bastante controlado nas operações de lavra de calcário, devido aos seus efeitos danosos na cadeia do cimento.

Outra informação de composição química que é importante no contexto de rochas carbonáticas e produção de cimento, é a perda ao fogo (P.F.) ou *loss on ignition* (LOI). Este parâmetro representa a massa que é perdida pela amostra na forma de dióxido de carbono (CO₂) quando ela é aquecida a cerca de 1.000° C. A determinação da perda ao fogo é uma maneira importante para controlar a qualidade das análises químicas de calcário, pois o somatório dos óxidos analisados em uma amostra, mais a P.F., deve ser igual ou próximo a um total de 100%, o que é chamado de “fechamento químico” no jargão industrial. Fechamentos químicos muito diferentes de 100% indicam problemas na análise química, desta forma, a P.F. também é um teor importante a ser controlado e reconciliado.

Feita essa avaliação, conclui-se que no contexto do cimento, a reconciliação deve ser feita visando não o teor de um metal em específico, mas a maioria, senão todos, os óxidos principais de uma amostra de matéria-prima para cimento.

É importante ressaltar que os parâmetros cimenteiros (FSC, MS e MA) são propriedades não-aditivas, ou seja, são números calculados sobre os quais não se pode calcular médias. Isso significa que, por exemplo, a média do FSC de 100 amostras de calcário não é calculada pela média aritmética do FSC. O correto é fazer a média de cada óxido (Ca, Si, Al e Fe) e depois calcular o FSC.

Por fim resta apresentar o fluxograma-base de reconciliação adaptado para uma fábrica de cimento. O fluxograma inicia pelo modelo de reservas usado para o planejamento da lavra, passa por todas as atividades possivelmente realizadas até chegar na farinha produzida, como mostra a Figura 15, a seguir:

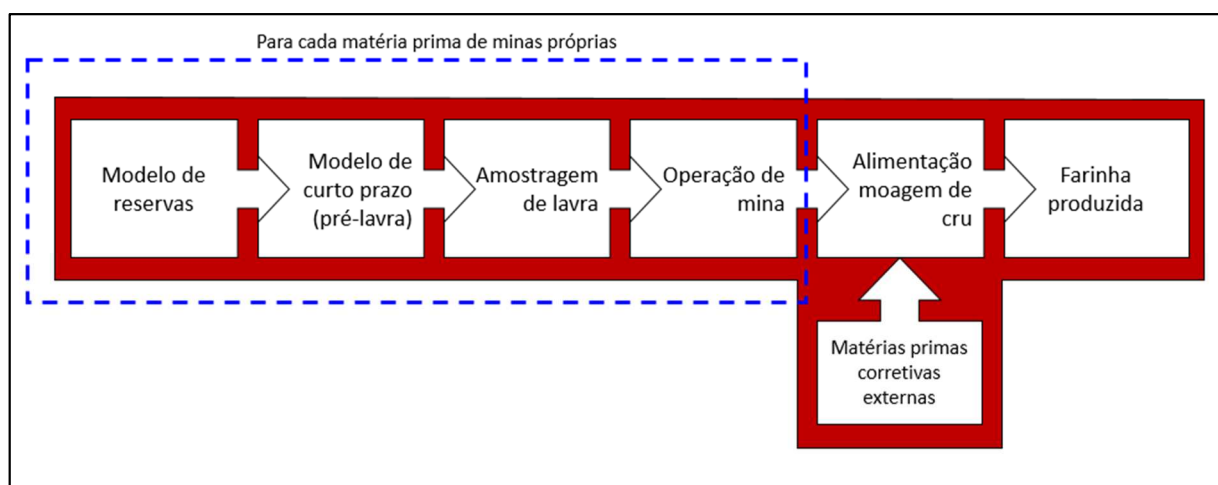


Figura 15. Reconciliação ao longo da cadeia de valor mineral do cimento.

Caso a fábrica possua mais de uma mina, como é comum ocorrer, cada mina pode ser reconciliada individualmente até a atividade de moagem de cru, para onde todas as matérias-primas convergem, tanto as mineradas quanto as compradas externamente.

A respeito das diferenças do fluxograma acima com o mostrado no início deste item:

- Simplificação no primeiro item do fluxograma: como o modelo de recurso e o modelo de reservas são basicamente os mesmos, com a única diferença de que o modelo de reservas já incorpora o projeto de cava final, optou-se por incluir apenas o modelo de reservas.

- Modelo de curto prazo ou *grade control*, neste caso será denominado de modelo de “pré-lavra”.

- A moagem de cru, por analogia, é a usina de beneficiamento no caso dos metais.

- O termo *commodity* ao final do fluxograma foi substituído pela Farinha produzida, que é o produto da moagem de cru e corresponde ao final do processo de mineração abrangido neste trabalho. Como já visto, a partir do pré-aquecimento e do forno rotativo, o processo se torna eminentemente químico.

6.3. Estudo de Caso 1: mineração de argila na fábrica em Cajati, SP

6.3.1. Avaliação da cadeia de valor mineral

Em Cajati, SP, o estudo de caso será feito na fábrica de cimento da cidade, que utiliza como principal matéria-prima o calcário que sai como rejeito do processo de flotação da apatita na mina da Mosaic Fertilizantes (antiga Serrana e depois Vale Fertilizantes).

Este calcário adquirido com a Mosaic responde por até 82% da alimentação da moagem de cru. A mineração de argila em mina própria é feita para suprir esta matéria-prima, que chega a até 17% de participação na alimentação da moagem. O restante da alimentação é feito com areia silicosa, para ajuste fino no MS.

As Figuras 16 e 17, a seguir, mostram a mina de argila e a fábrica de cimento, esta última com seus principais equipamentos identificados:



Figura 16. Panorama da mina de argila em Cajati.

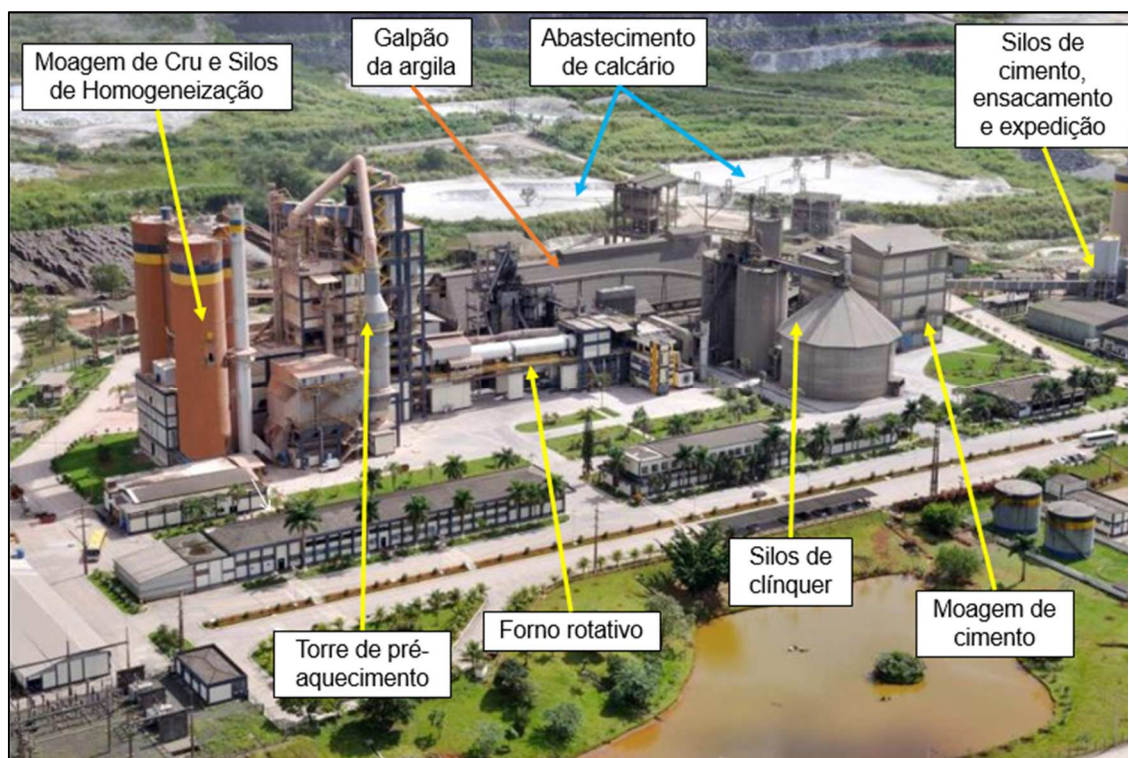


Figura 17. Panorama da fábrica de cimento de Cajati.

A fábrica de cimento de Cajati se distingue de outras fábricas por não possuir jazida própria de calcário, logo, a atividade mineração em sua cadeia de valor se restringe apenas à exploração da argila. O fato de receber matérias-primas com granulometria já reduzida, pois o calcário é um rejeito de flotação, implica que a moagem de cru para produção da farinha é uma etapa menos dispendiosa de energia elétrica, sendo essa a única outra diferença relevante da fábrica com relação a outras.

A Figura 18, a seguir, ilustra o fluxograma de produção de Cajati, com ênfase na mineração da argila que será o foco da reconciliação:

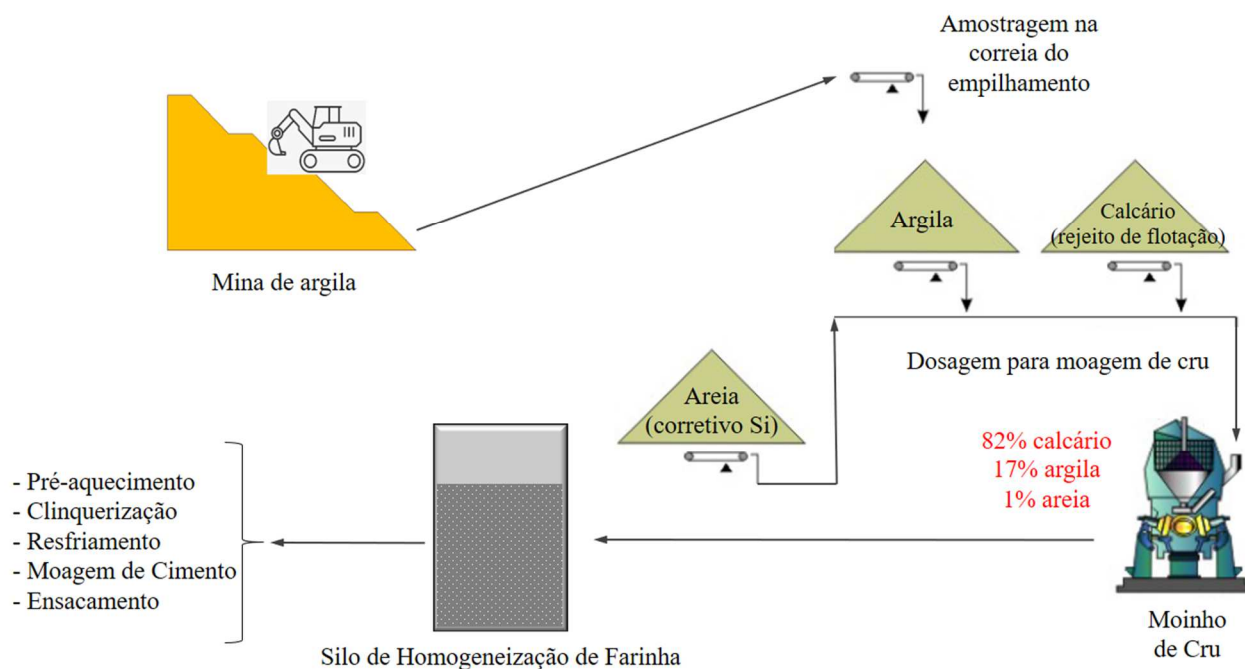


Figura 18. Esquema produtivo da fábrica de Cajati, com foco na mineração.

A mina de argila de Cajati é tratada como uma mina a céu aberto padrão: há trabalhos feitos de sondagem, descrição geológica, amostragem, análise química, modelamento de blocos e estimativa de recurso e reservas. Com o modelo de blocos se elabora os planos de lavra para que a argila atenda aos parâmetros químicos do processo do cimento. Quanto à argila, ela se trata de uma alteração de rochas da Formação Turvo-Cajati, predominantemente micaxistos, sendo rica em alumínio e ferro, e com bolsões de concentrações elevadas de titânio.

Um ponto importante na jazida de argila para seu aproveitamento na produção de clínquer, é observar estritamente os teores da argila extraída. A reserva projetada no longo prazo possui uma vida útil calculada para determinados teores médios de Si, Al e Fe, que determinam os parâmetros MS e MA. Caso se praticasse, por exemplo, uma lavra seletiva em termos de MS, buscando argila mais silicosa (de maior MS), isso representaria uma óbvia redução da vida útil da reserva, já que nem toda a argila se enquadra na demanda de qualidade.

A exploração da argila é uma atividade simples. O desmonte do material é realizado mecanicamente, utilizando escavadeira hidráulica e dispensando uso de explosivos. Depois ocorre o transporte por caminhões basculantes até a fábrica de cimento, onde a

argila é empilhada em pilha longitudinal para posterior retomada e alimentação na moagem de cru.

A qualidade da argila é previamente conhecida pelo planejamento de lavra, através do modelo de blocos, e controlada na lavra por amostras feitas até duas vezes por dia, coletadas nas correias que levam ao empilhamento da fábrica e analisadas no laboratório próprio. Com isso, em uma análise inicial de reconciliação, pode-se comparar as qualidades esperadas pelo modelo e as analisadas pelas amostras. Essa avaliação já é feita de forma não sistemática. Na Tabela 1 se exemplifica uma destas análises: a média das análises da argila lavrada em um trimestre, comparada com o modelo de blocos contido entre as superfícies topográficas do início e do final do período.

Tabela 1. Comparativo do teor médio da argila lavrada em um trimestre.

| Fonte da Informação | Fe₂O₃ | SiO₂ | Al₂O₃ | K₂O | MS | MA |
|--|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|
| Modelo de Blocos | 10,42 | 59,25 | 17,95 | 0,09 | 2,09 | 1,72 |
| Análises do Laboratório | 8,85 | 61,27 | 16,03 | 0,45 | 2,46 | 1,81 |
| Diferença entre Modelo de Blocos e Amostras Lab. (%) | -15,1% | 3,4% | -10,7% | 395,5% | 17,9% | 5,1% |

A Tabela 1 sinaliza diferenças percentuais relevantes no Fe e Al, que conduzem à diferença no MS da argila no trimestre do exemplo. Se fossem tomados como verdadeiros os resultados do laboratório de Cajati, o MS de 2,46 indicaria a lavra da argila acima do MS médio projetado para a reserva, o que caracterizaria a lavra seletiva do minério. Essa informação motiva o interesse de se realizar a reconciliação da produção para que se possa confirmar ou rejeitar a informação.

Uma oportunidade de reconciliação a se explorar neste estudo de caso, é usar as análises do calcário e da farinha produzida, que são realizadas de hora em hora no laboratório, para se conhecer a composição da argila por retrocálculo, e com isso ter mais uma base de comparação. Para isso será necessário dispor dos dados da massa alimentada no moinho de cru e analisar a composição química da areia silicosa que se usa em pequena quantidade apenas para ajuste do MS.

Com base no estudo do processo de produção em Cajati, e no fluxograma geral de reconciliação criado no item anterior para uso em fábricas de cimento, chega-se ao fluxograma prático para esta mineração, mostrado na Figura 19:

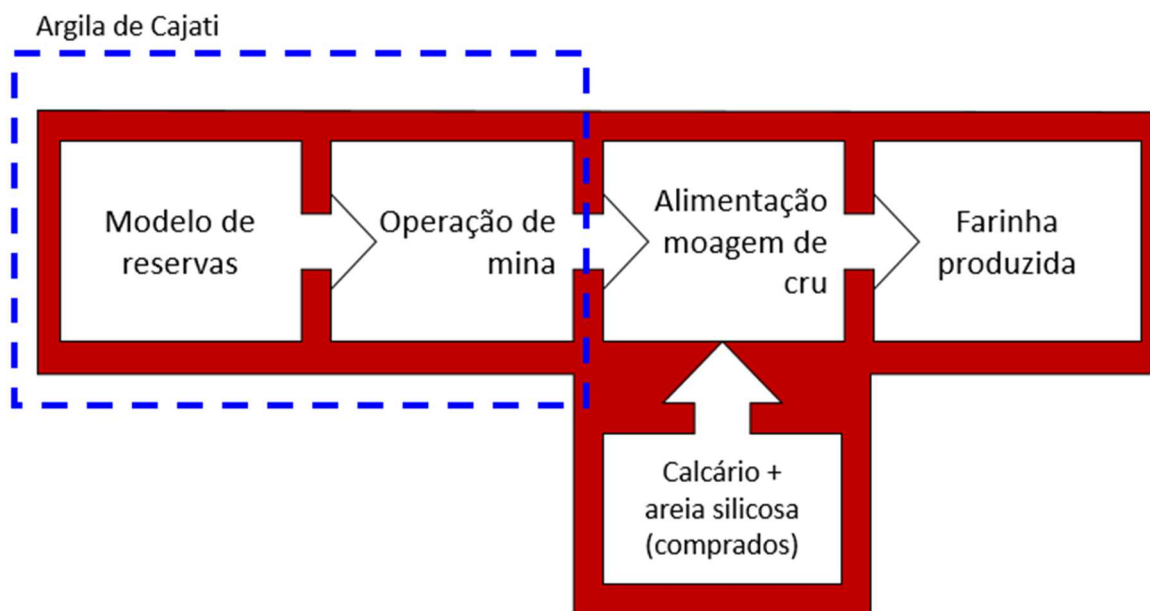


Figura 19. Fluxograma prático para reconciliação da produção de argila minerada em Cajati.

6.3.2. Dados coletados para reconciliação de lavra

Com o fluxograma prático em mãos, partiu-se para obter os dados necessários para executar a reconciliação da argila em um determinado período de produção de 6 (seis) meses. O período foi escolhido em função da data dos levantamentos topográficos semestrais da mina.

A Figura 20, a seguir, ilustra os 5 (cinco) pontos onde se coletou os dados após o entendimento do processo de mineração:

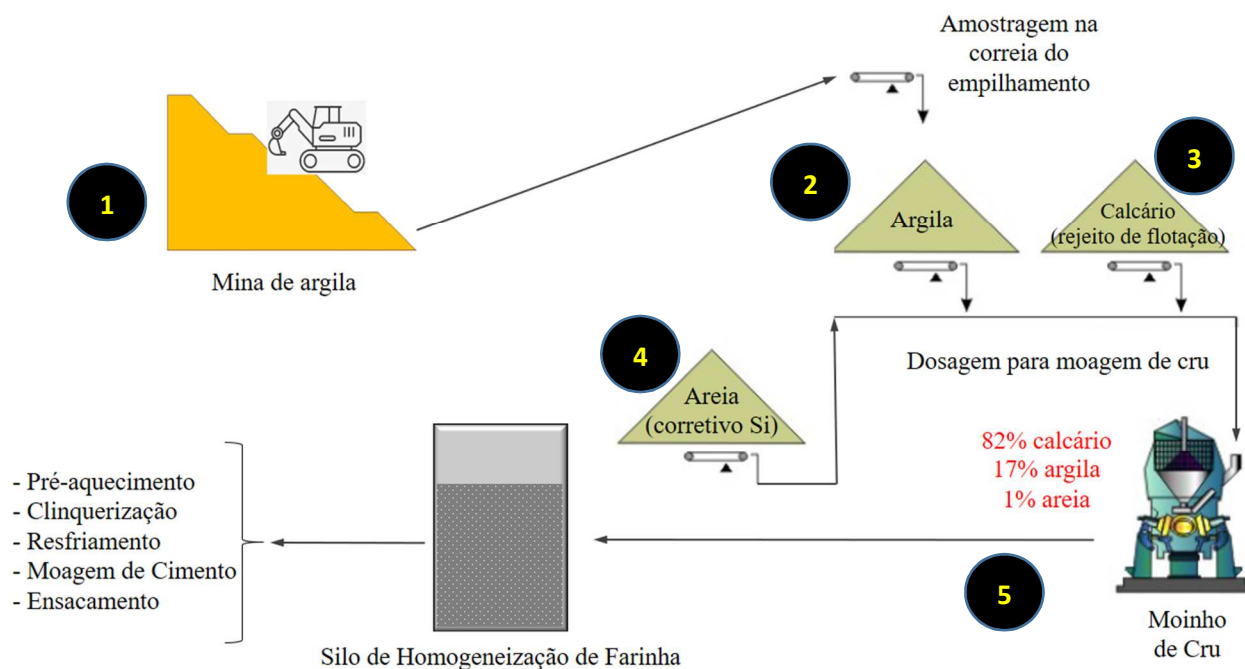


Figura 20. Pontos de coleta de dados na cadeia de valor mineral de Cajati.

Segue um descritivo das informações coletadas:

- Ponto 1- Argila extraída da mina.

Massa: calculada pelo volume topográfico extraído (medição semestral) x densidade média da argila (1,75 t/m³).

Teores: obtido pelo modelo de blocos cortado entre duas superfícies topográficas.

Umidade: generalizada como 20% no modelo de blocos.

- Ponto 2- Argila da mina, alimentada no moinho de cru.

Massa: medida por balança, número consolidado em base mensal.

Teores: 3 a 6 amostras pontuais por dia, recolhidas na alimentação do moinho.

Umidade: analisada nas mesmas amostras recolhidas para análise de teores.

- Ponto 3- Calcário comprado, alimentado no moinho de cru.

Massa: medida por balança, número consolidado em base mensal.

Teores: 5 a 6 amostras pontuais por dia, recolhidas na alimentação do moinho.

Umidade: analisada nas mesmas amostras recolhidas para análise de teores.

- Ponto 4- Areia comprada, alimentada no moinho de cru.

Massa: medida por balança, número consolidado em base mensal.

Teores: Não é analisada. Foi recolhida 1 amostra para ensaio em laboratório externo.

Umidade: generalizada como 20%.

- Ponto 5- Farinha produzida, saída do moinho.

Massa: medida por balança, número consolidado em base mensal.

Teores: Amostras a cada 2h (até 12 por dia), recolhidas na saída do moinho.

Umidade: considerada 0% pois o material é moído a seco e com gás quente.

As informações foram disponibilizadas pela empresa em meio digital e posteriormente foram organizadas em planilhas eletrônicas.

Somente a areia não era analisada sistematicamente, pois segundo a equipe da fábrica se espera que sua variação de teores seja mínima. Para que se tivesse ao menos um resultado experimental, foi recolhida uma amostra da areia e encaminhada para a empresa Minas Jr Consultoria Mineral, que realizou ensaios de Difractometria de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX). As informações obtidas por estes ensaios foram, respectivamente, a composição mineralógica e a composição química da areia usada como corretivo no processo de moagem em Cajati.

O relatório completo destes ensaios está nos ANEXOS deste trabalho.

6.3.3. Cálculos para reconciliação da argila

A base de dados organizada permitiu calcular os teores da argila lavrada de três maneiras, para que se pudesse efetuar as comparações:

- Modelo de blocos (Ponto 1): o modelo de reservas da empresa, criado no *software* Datamine Studio RM[®], foi cortado entre a superfície topográfica inicial e a final do

período de 6 meses considerado na reconciliação. Os blocos remanescentes representam a massa e os teores da argila lavrada, na visão do planejamento.

- Análises do laboratório da fábrica (Ponto 2): na visão da fábrica, a massa de argila é o acumulado da balança de dosagem desta matéria-prima na alimentação do moinho de cru. Os teores são obtidos pela média aritmética das amostras pontuais recolhidas no período.

- Retrocálculo da argila a partir da farinha produzida (Pontos 3, 4 e 5): para cada óxido, é possível realizar o cálculo de seu teor na argila a partir do conhecimento dos teores dos demais componentes da farinha e da própria farinha, basta isolar na equação. Afinal, a farinha consiste na mistura das matérias-primas, todas em base seca (sem umidade). Segue um exemplo para o SiO₂:

$$\text{SiO}_2 \text{ farinha} = \frac{(\text{M}_{\text{calcário}} \times \text{SiO}_2 \text{ calcário} + \text{M}_{\text{argila}} \times \text{SiO}_2 \text{ argila} + \text{M}_{\text{areia}} \times \text{SiO}_2 \text{ areia})}{\text{M}_{\text{farinha}}}$$

onde: M → massa em toneladas, na base seca (descontando a umidade)
 SiO₂ → teor do óxido em porcentagem (%)

Uma vez conhecidos os teores médios (do calcário, da areia e da farinha), é possível fazer o retrocálculo isolando o teor da argila na equação:

$$\text{SiO}_2 \text{ argila} = \frac{\text{M}_{\text{farinha}} \times \text{SiO}_2 \text{ farinha} - [(\text{M}_{\text{calcário}} \times \text{SiO}_2 \text{ calcário}) + (\text{M}_{\text{areia}} \times \text{SiO}_2 \text{ areia})]}{\text{M}_{\text{argila}}}$$

Esta mesma formulação permite retrocalcular todos os demais óxidos: CaO, Fe₂O₃, Al₂O₃, MgO, K₂O, P₂O₅, além de se permitir calcular o MS e o MA pelas razões destes óxidos. É importante atentar para que no retrocálculo seja considerada a base seca dos materiais, logo deve-se descontar a massa de água presente na argila, no calcário e na areia alimentados na moagem.

6.4. Estudo de Caso 2: mineração de calcário na fábrica em Candiota, RS

6.4.1. Avaliação da cadeia de valor mineral

Na fábrica de cimento localizada em Candiota, no estado do Rio Grande do Sul, a exploração de mármore calcítico acontece a céu aberto. Esse material cumpre o papel de rocha carbonática na composição da farinha. O mármore apresenta uma estrutura complexa, encaixado num arcabouço de quartzo-sericita-xisto, bastante dobrado, fraturado e falhado. Essas características podem ser observadas na Figura 21:

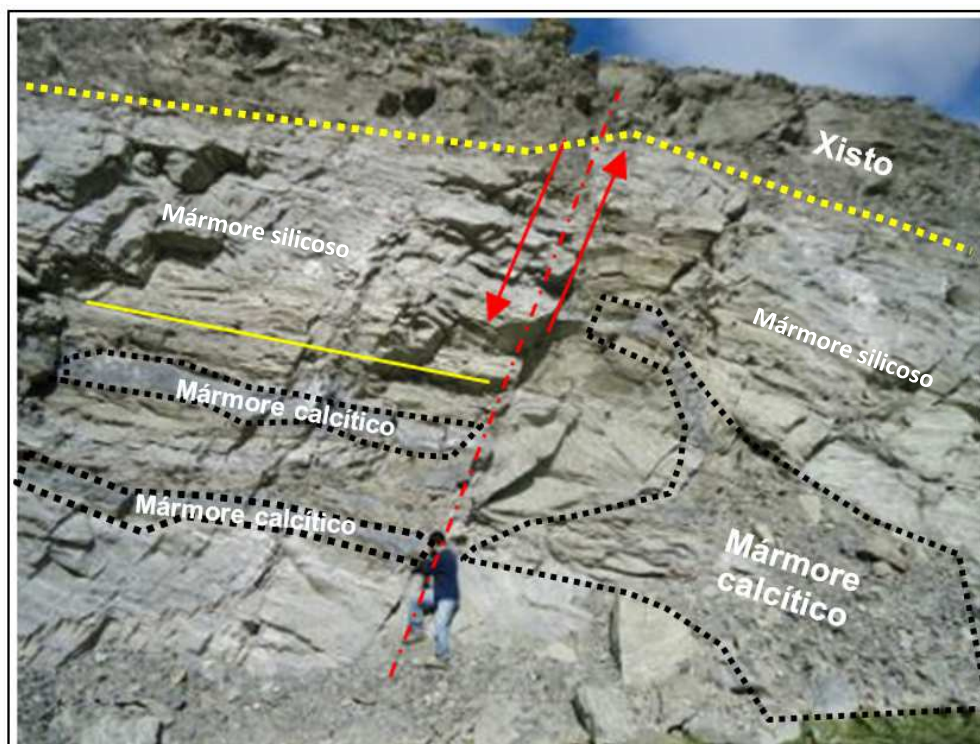


Figura 21. Exemplo de frente de lavra da mina de mármore calcítico.

A mina de mármore, doravante denominada neste trabalho como “mina de calcário” possui um diferencial importante: um analisador do tipo PGNAA instalado no transportador de correia após a britagem. Por meio deste analisador são geradas leituras instantâneas do calcário que passa na britagem primária e isso permite conhecer e controlar a composição química do ROM buscando os objetivos químicos através da mistura das frentes desmontadas.

As Figuras 22 e 23 mostram o PGNAA em operação:



Figura 22. Analisador de calcário (PGNAA), da fabricante Thermo Fisher, em Candiota (foto).



Figura 23. Vista externa da localização do PGNAA, dentro da contenção metálica azul (foto).

As Figuras 24 e 25 mostram a vista aérea da mina de calcário e da fábrica de cimento, esta última com seus principais equipamentos identificados:

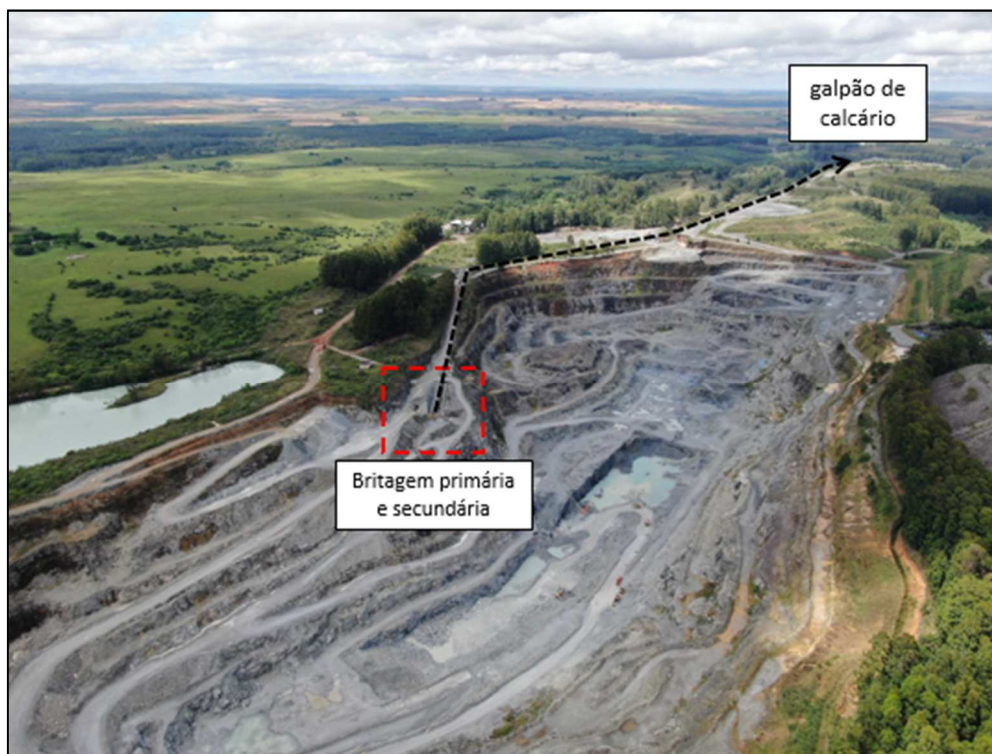


Figura 24. Panorama da mina de calcário em Candiota.

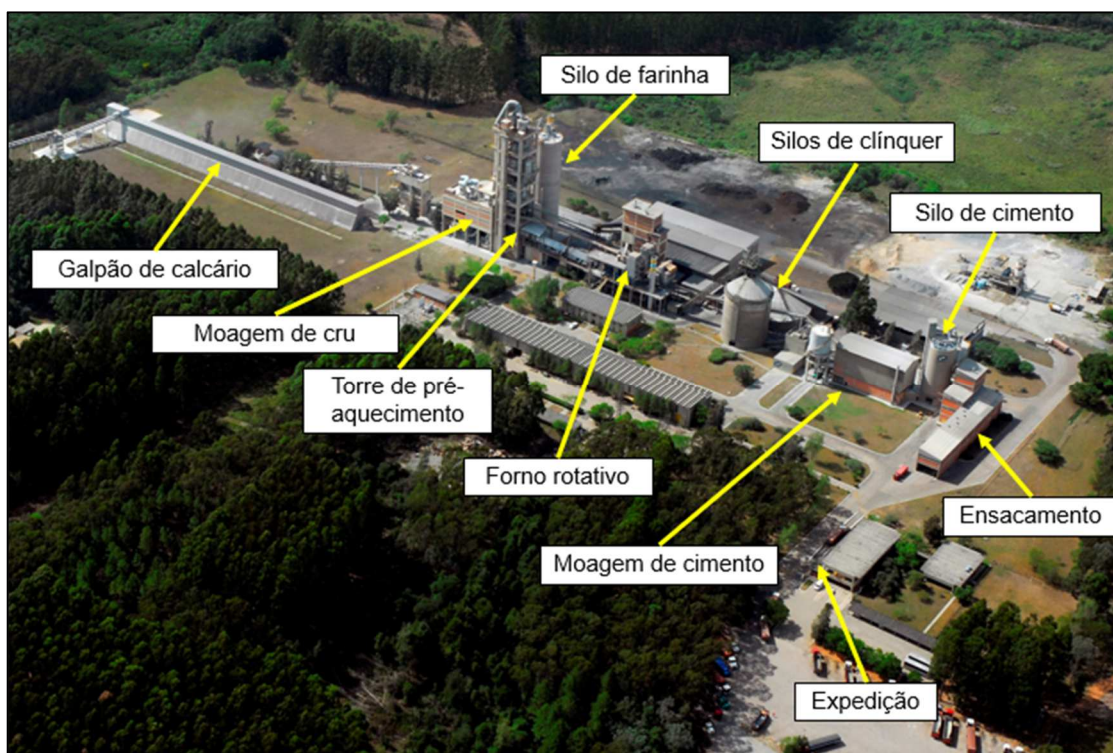


Figura 25. Panorama da fábrica de cimento de Candiota.

A fábrica de cimento de Candiota é um objeto interessante para estudo de caso, pois seu fluxograma instalado exemplifica perfeitamente uma linha de produção de cimento, sem equipamentos paralelos que tornem o estudo mais complexo. O processo da mina ocorre com exploração do calcário pelo método ao céu aberto, com duas etapas de britagem, e depois transporte por correias até a fábrica.

Também é interessante observar que o calcário da mina compõe a quase totalidade da alimentação da moagem de cru (até 99,50%), pois sua saturação (FSC) já é bem próxima do necessário para o processo e demanda uma mínima correção do teor de Fe_2O_3 , feita com minério de ferro ou carepa (resíduo de produção de aços laminados).

A Figura 26 ilustra o fluxograma de produção de Candiota, com ênfase na mineração de calcário que será o foco da reconciliação. Como se pode ver na figura, a planta não utiliza o PGNAA instalado na britagem para dosar o calcário na medida necessária para os objetivos químicos da moagem de cru, mas sim como um *sorter*, com o objetivo de separar o calcário em pilhas homogêneas dentro de intervalos de saturação. Essas pilhas, feitas dentro do galpão de calcário na fábrica são posteriormente extraídas e dosadas, junto com minério de ferro ou carepa, no moinho de cru.

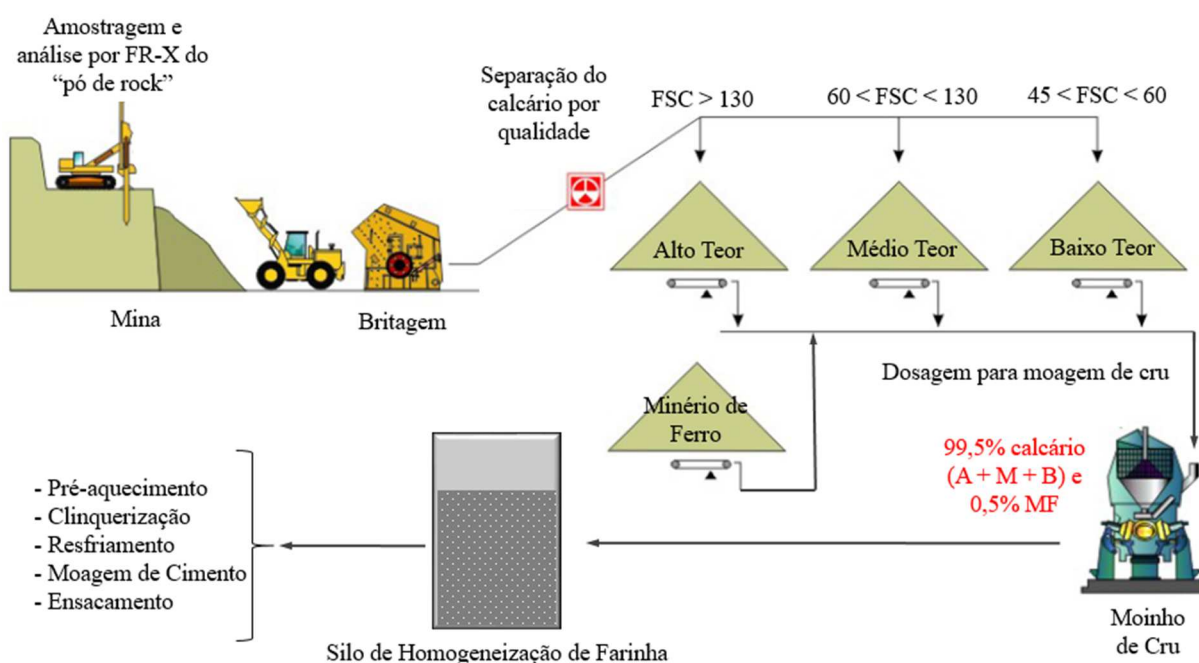


Figura 26. Esquema produtivo da fábrica de Candiota, com foco na mineração.

O PGNAA fecha um lote de calcário britado a cada 15 minutos, e destina-o a pilha de alto, médio ou baixo teor, conforme a saturação obtida no período. O tempo de 15 minutos é o intervalo entre o início da formação de um lote e o término do percurso pelas correias transportadoras do britador até o galpão onde é feito o empilhamento por uma empilhadeira móvel chamada *tripper*.

Devido às características intrínsecas da jazida e às limitações de seletividade das escavadeiras hidráulicas, ocorre a diluição do calcário com o xisto, fato que adiciona sílica, alumínio e magnésio indesejáveis no *run-of-mine* e, por consequência, reduz sua adequação química ao processo da moagem de cru. Tais diluições não podem ser previstas com exatidão no modelo de blocos de longo prazo, usado para o planejamento de lavra.

Entre os problemas causados pela diluição na lavra, destacam-se: necessidade de troca de frentes de lavra, formação de estoques intermediários, descarte de lotes inteiros de material britado fora de especificação e, quando o problema não é corrigido na farinha, pode mesmo acarretar paradas do forno rotativo, com grandes prejuízos à produtividade e qualidade do cimento no final da linha (BRANCÃO, 2020).

Além destes problemas que impactam com aumento do custo operacional em toda a cadeia, existe ainda a questão do quimismo da jazida: de todo recurso mineral estudado por meio de sondagens, sabe-se que há pouca margem de teor de cálcio (CaO) em relação ao mínimo necessário para o processo de clínquerização. Deste modo, a hipotética diluição de xisto no calcário levaria a um consumo maior do minério para se atingir o objetivo de CaO no *raw mix* e, no extremo, reduziria a vida útil projetada para a reserva. Esse é um risco presente que ainda não foi mensurado, e para o qual a reconciliação pode fornecer uma resposta.

A avaliação interna da empresa é que os desvios nos óxidos de ferro, silício, alumínio e de magnésio, podem ser originados por diluição do xisto no calcário durante a lavra, porém atualmente a empresa não apura a diluição real nos avanços, e nem controla se tal diluição está de acordo com o previsto no cálculo de reserva. Ainda não está implantado

um processo sistemático de reconciliação que organize as informações disponíveis e as utilize para fazer estas avaliações citadas.

Numa análise inicial da cadeia de valor, foram identificados na Figura 27 os seguintes pontos de controle de onde se pode extrair informação para reconciliar:

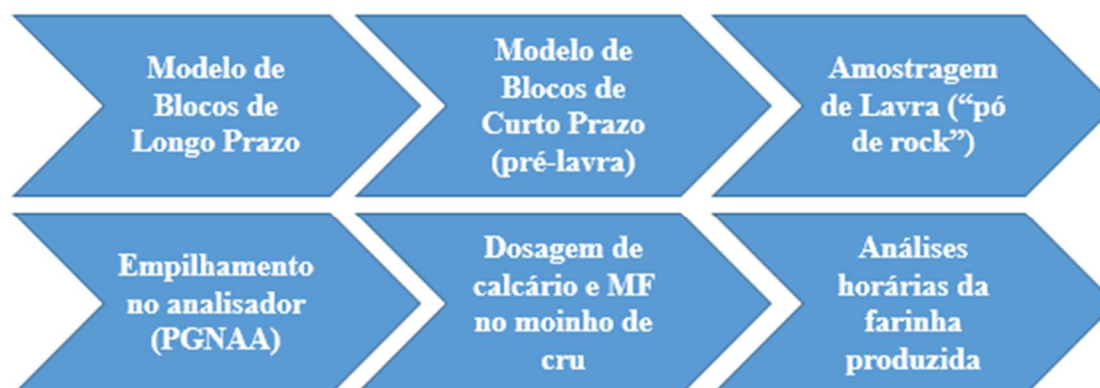


Figura 27. Avaliação inicial da cadeia de valor da mineração em Candiota/RS com pontos onde se pode fazer reconciliação (adaptado de MORLEY, 2014).

A Tabela 2 exemplifica as diferenças apuradas na produção de calcário acumulada de um trimestre da mina, pelos diferentes pontos de controle disponíveis identificados:

Tabela 2. Comparativo de teor médio do calcário lavrado em um trimestre.

| Fonte da Informação | Fe ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | FSC |
|---------------------------------------|--------------------------------|-------|------------------|--------------------------------|-------|-------|
| Modelo de Blocos Longo Prazo | 1,41 | 41,55 | 11,71 | 2,53 | 5,08 | 113,0 |
| "Pó de rock" | 1,61 | 38,32 | 15,78 | 3,36 | 5,40 | 77,8 |
| PGNAA britagem | 1,28 | 40,25 | 12,54 | 1,82 | 4,64 | 105,6 |
| Farinha produzida | 1,79 | 40,70 | 12,46 | 2,47 | 5,26 | 104,3 |
| Diferença entre Modelo LP x PGNAA (%) | 9,45% | 3,11% | -7,05% | 27,94% | 8,56% | 6,62% |

O problema, então, é definido por um grande desvio entre os teores médios do calcário produzido, comparado pelos pontos de controle do modelo de blocos de longo prazo, análise do "pó de rock" da furação e do PGNAA da britagem. Claramente o "pó de rock" está incluindo amostras de xisto intercaladas com o calcário (diluição interna), e sem que

haja algum tratamento deste dado, não é possível utilizá-lo efetivamente. Soma-se a esse desvio, um desconhecimento da diluição real do minério praticada na lavra.

Com base no estudo do processo de produção em Candiota, no fluxograma geral de reconciliação criado no item anterior para uso em fábricas de cimento, e na avaliação da cadeia de valor mineral da fábrica, chega-se ao fluxograma prático para Candiota, mostrado na Figura 28:

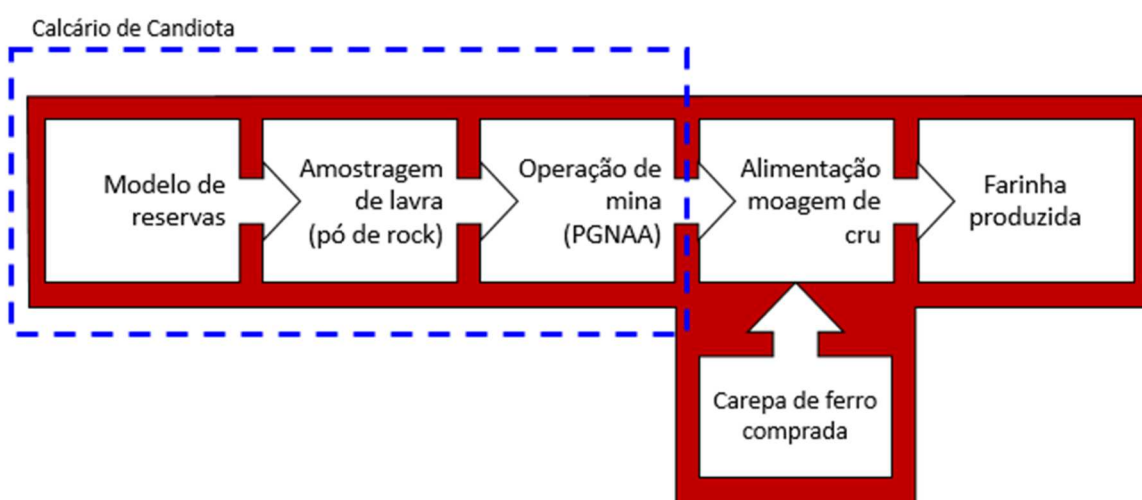


Figura 28. Fluxograma prático para reconciliação da produção de calcário minerado em Candiota.

6.4.2. Dados coletados para reconciliação de lavra

Com o fluxograma prático em mãos, partiu-se para obter os dados necessários para executar a reconciliação do calcário em um determinado período de produção de 11 (onze) meses. Há medição topográfica mensal, mas para ter uma maior produção e com mais chances de existirem os demais dados cobrindo total ou parcialmente o período, foi selecionado um período de 11 meses, indo de final de janeiro ao final de dezembro.

A Figura 29, a seguir, ilustra os 5 (cinco) pontos onde se coletou os dados após o entendimento do processo de mineração:

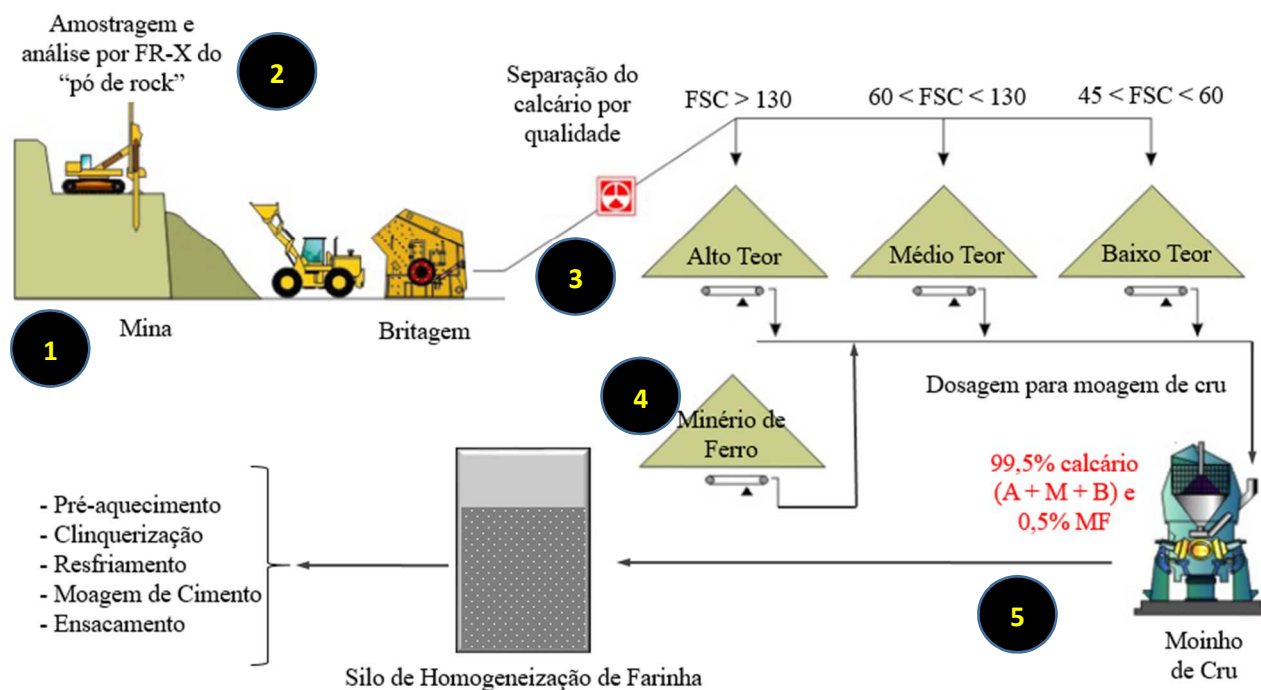


Figura 29. Pontos de coleta de dados na cadeia de valor mineral de Candiota.

Segue um descritivo das informações coletadas:

- Ponto 1- Calcário da mina, estimado pelo modelo de reservas

Massa: calculada pelo volume topográfico extraído (medição periódica) x densidade média do calcário (2,70 t/m³).

Teores: obtido pelo modelo de blocos cortado entre duas superfícies topográficas.

Umidade: não é considerada no modelo de blocos.

- Ponto 2- Calcário da mina, perfuração e desmonte.

Massa: medida por balança da britagem, número consolidado em base mensal.

Teores: amostras agrupando até 5 furos de desmonte, sempre que o pó da perfuração dá sinais de ser calcário (cor esbranquiçada).

Umidade: não é analisada.

- Ponto 3- Calcário britado, analisado pelo PGNAA e mandado para o galpão.

Massa: medida por balança da britagem, número consolidado em base mensal.

Teores: amostras consolidadas a cada 15 minutos pelo PGNAA.

Umidade: não é analisada, assumida como 0,85% pela média da perda de massa entre alimentação da moagem de cru *versus* a farinha produzida.

- Ponto 4- Carepa comprada, alimentada no moinho de cru.

Massa: medida por balança, número consolidado em base mensal.

Teores: não é analisada. Foi recolhida 1 amostra para ensaio em laboratório externo.

Umidade: não é analisada, assumida como 0,85% pela média da perda de massa entre alimentação da moagem de cru *versus* a farinha produzida.

- Ponto 5- Farinha produzida, saída do moinho.

Massa: medida por balança, número consolidado em base mensal.

Teores: Amostras a cada 2h (até 12 por dia), recolhidas na saída do moinho.

Umidade: considerada 0% pois o material é moído a seco.

Tal como no caso de Cajati, as informações foram disponibilizadas pela empresa e organizadas em planilhas eletrônicas.

Como a carepa não é analisada sistematicamente, foi recolhida uma amostra e encaminhada para fazer os ensaios de FRX e DRX, junto com a areia de Cajati, com o objetivo de se utilizar os resultados experimentais na implementação dos cálculos de reconciliação.

6.4.3. Cálculos para reconciliação do calcário

A base de dados organizada permitiu calcular os teores do calcário lavrado de 4 (quatro) maneiras, para que se pudesse efetuar as comparações:

- Modelo de blocos (Ponto 1): o modelo de reservas da empresa, criado no *software* Datamine Studio RM[®], foi cortado entre a superfície topográfica inicial e a final do período de 11 meses considerado na reconciliação. Os blocos remanescentes representam a massa e os teores do calcário mais estéril lavrados, na visão do planejamento. É aplicada uma legenda de cor no modelo, para diferenciar os blocos de minério (calcário alto teor e médio teor), minério marginal (calcário baixo teor), e estéril (calcioxisto e xisto).

- Análises do laboratório da fábrica (Ponto 2): as amostras do pó de perfuração (“pó de rock” ou *grade control*) são reunidas, em média, a cada 5 furos realizados para desmonte, e são analisadas no laboratório da fábrica. Foi compilada a informação disponível de locação topográfica dos furos (coordenadas X, Y e Z), os croquis de perfuração mostrando qual foi a amostragem realizada, e as análises químicas realizadas em cada amostra. Esta informação não estava completa para todos os desmontes realizados no período: para alguns desmontes não houve marcação topográfica, para outros faltou a análise química das amostras.

- Calcário britado e analisado no PGNAA (Ponto 3): todo o calcário britado para produção passa pelo PGNAA e é analisado minuto a minuto, sendo geradas as amostras consolidadas de lotes de 15 minutos, com massa e teor. Essa informação fica disponível na *intranet* da empresa e permite saber o teor do calcário enviado para a fábrica.

- Retrocálculo do calcário a partir da farinha produzida (Pontos 4 e 5): para cada óxido, é possível realizar o cálculo de seu teor no calcário a partir do conhecimento dos teores dos demais componentes da farinha e da própria farinha, basta isolar na equação. Afinal, a farinha consiste na mistura das matérias-primas, todas em base seca (sem umidade). Segue um exemplo para o Fe₂O₃:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ farinha} = \frac{(\text{M}_{\text{calcário}} \times \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ calcário} + \text{M}_{\text{carepa}} \times \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ carepa})}{\text{M}_{\text{farinha}}}$$

onde: M → massa em toneladas, na base seca (descontando a umidade)
 Fe₂O₃ → teor do óxido em porcentagem (%)

Uma vez conhecidos os teores médios (do calcário, da carepa e da farinha), é possível fazer o retrocálculo isolando o teor da calcário na equação:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ calcário} = \frac{[(M \text{ farinha} \times \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ farinha}) - (M \text{ carepa} \times \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ carepa})]}{M \text{ calcário}}$$

Esta mesma formulação permite retrocalcular todos os demais óxidos: CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, K₂O, P₂O₅, além de se permitir calcular o FSC, o MS e o MA pelas razões destes óxidos. É importante atentar para que no retrocálculo seja considerada a base seca dos materiais, logo deve-se descontar a massa de água, ainda que pequena, presente no calcário e na carepa alimentados na moagem.

7. RESULTADOS

7.1. Análise mineralógica e química das amostras coletadas

A Difractometria de Raios X (DRX) foi realizada com o intuito de se identificar os minerais presentes na amostra de areia, que se espera ser representativa do corretivo de sílica adicionado em até 1% na alimentação da moagem de cru. A Figura 30 mostra o difratograma obtido:

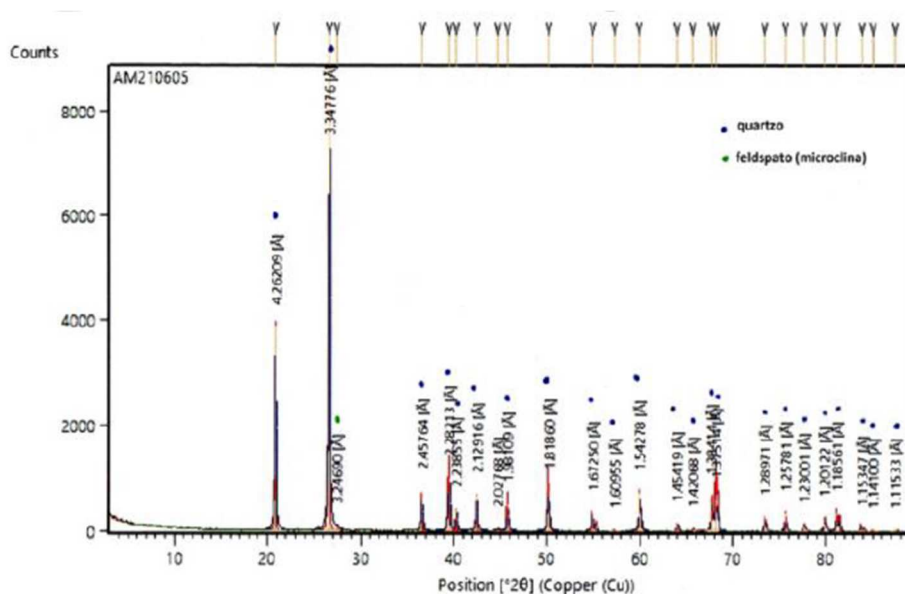


Figura 30. Difratograma de Raios-X da areia usada em Cajati (Relatório Minas Jr, 2022).

Após a interpretação deste difratograma, obteve-se a identificação das fases cristalinas presentes na amostra, conforme mostra a Tabela 3:

Tabela 3. Identificação por DRX das fases cristalinas da amostra de areia (Relatório Minas Jr, 2022).

| Fases Cristalinas Identificadas | Grau de abundância | Fase Cristalina em % |
|---------------------------------|--------------------|----------------------|
| Quartzo | Abundante | 99,1 |
| Feldspato (microclina) | Baixo | 0,9 |

Estes resultados de mineralogia confirmam a natureza do material.

Na análise de Fluorescência de Raios X (FRX), executada em duplicata, foram obtidos os teores dos óxidos e a porcentagem de perda ao fogo do material, mostrados na Tabela 4:

Tabela 4. Teores obtidos por FRX na amostra de areia (Relatório Minas Jr, 2022).

| Ensaio | Teores de óxidos e perda ao fogo (%) | | | | | | | | | | |
|--------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|------|------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | Na ₂ O | K ₂ O | MnO | P.F. |
| 1º | 96,80 | 1,07 | 1,32 | 0,04 | <0,1 | 0,25 | 0,16 | <0,1 | 0,42 | 0,02 | 0,20 |
| 2º | 97,30 | 1,07 | 1,31 | 0,03 | <0,1 | 0,24 | 0,17 | <0,1 | 0,42 | - | 0,17 |

Conforme esperado para areia pura, a perda ao fogo foi muito pequena (da ordem de 0,20%) e o maior teor encontrado foi o de sílica. Os teores obtidos no primeiro ensaio foram usados para o retrocálculo da argila a partir da farinha.

Da mesma forma, foram feitas as análises de DRX e FRX na amostra de carepa, que se espera ser representativa do corretivo de ferro adicionado em até 0,50% na alimentação da moagem de cru. A carepa é um material residual da produção de aços laminados, com a aparência de lascas de ferro, e pode ser usada como corretivo de ferro em substituição ao minério. A Figura 31 mostra o difratograma obtido no DRX:

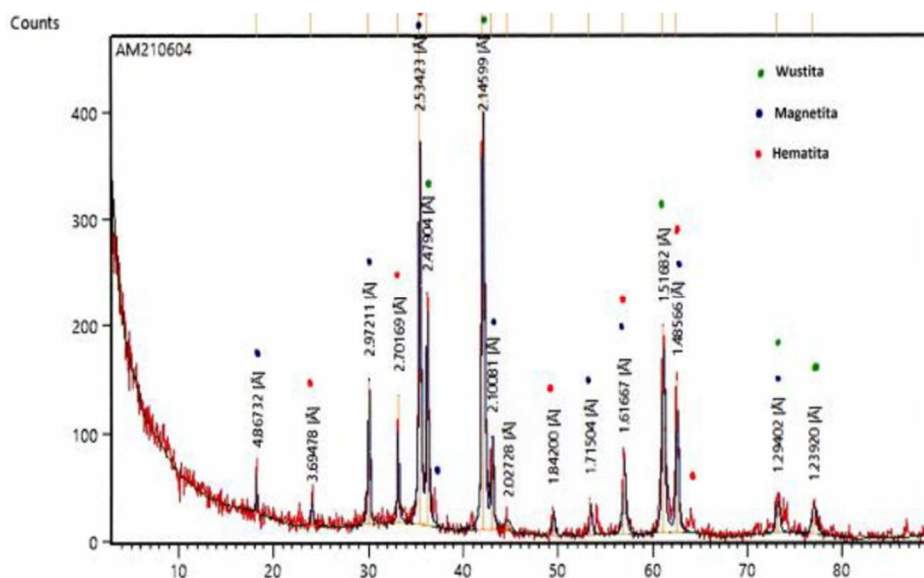


Figura 31. Difratograma de Raios-X da carepa usada em Candiota (Relatório Minas Jr, 2022).

As fases cristalinas presentes na amostra são listadas na Tabela 5:

Tabela 5. Identificação por DRX das fases cristalinas da amostra de carepa (Relatório Minas Jr, 2022).

| Fases Cristalinas Identificadas | Grau de abundância | Fase Cristalina em % |
|---------------------------------|--------------------|----------------------|
| Wustita | Abundante | 51,1 |
| Magnetita | Mediano | 37,7 |
| Hematita | Baixo | 11,2 |

Estes resultados de mineralogia confirmam que a carepa é um resíduo da produção de aço, com predominância de wustita (FeO) e magnetita, formas menos oxidadas do ferro.

Os teores de óxidos e a porcentagem perda ao fogo foram obtidos pela análise de FRX, conforme se mostra na Tabela 6:

Tabela 6. Teores obtidos por FRX na amostra de carepa (Relatório Minas Jr, 2022).

| Teores de óxidos e perda ao fogo (%) | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|-------|--------------------------------|--------|
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | Na ₂ O | K ₂ O | MnO | Cr ₂ O ₃ | P.F. |
| 0,375 | <0,01 | >100 | <0,1 | 0,015 | 0,025 | <0,1 | <0,01 | 0,555 | 0,165 | -6,130 |

Conforme esperado para uma amostra de carepa de ferro, o óxido Fe₂O₃ compõe quase integralmente a amostra, sendo que os demais óxidos encontrados acima do limite de detecção podem ser atribuídos, segundo a própria analista, a contaminações da amostra ou no processo de moagem durante a preparação para o ensaio de FRX.

Curiosamente, a perda ao fogo é negativa, o que segundo o relatório de análises, é devido ao fato de a amostra ganhar massa pela oxidação dos metais nela contidos, mediante aquecimento a cerca de 1.000° C.

7.2. Reconciliação da produção de argila na fábrica de Cajati, SP

7.2.1. Base semestral

A primeira reconciliação foi efetuada na base do semestre completo, marcado por um levantamento topográfico de início e outro levantamento realizado no final do período.

As Figuras 32 e 33 ilustram o modelo de blocos entre as duas superfícies, utilizado para o cálculo, na vista tridimensional e seção vertical:

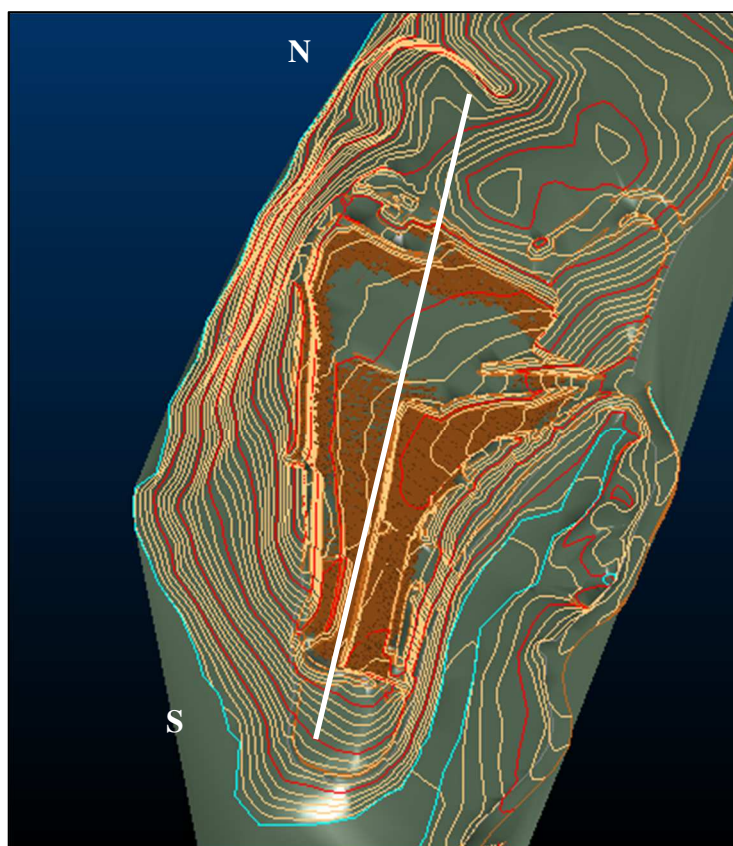


Figura 32. Vista em 3D da superfície topográfica, do modelo de blocos e localização da seção vertical.

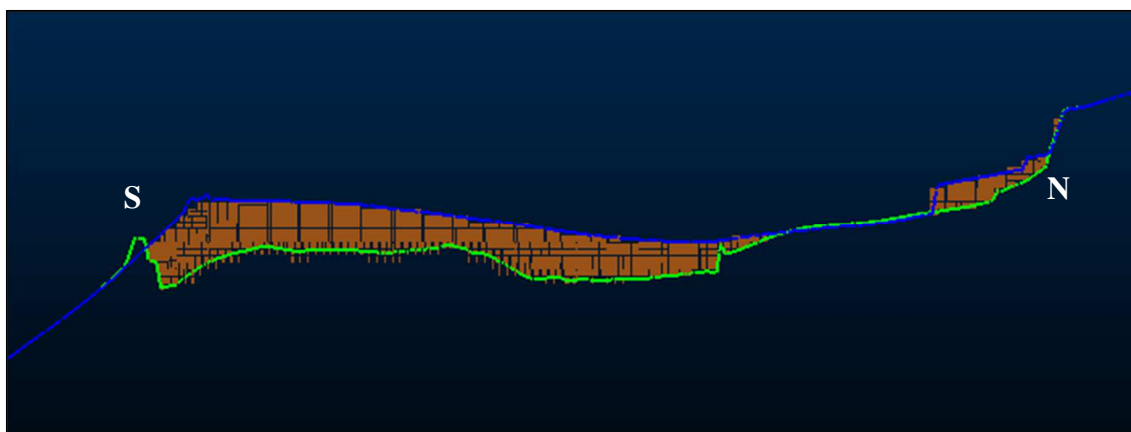


Figura 33. Seção vertical N-S do modelo de argila lavrada no semestre. Exagero vertical de 5x.

A argila lavrada, por este critério, teve a massa e composição química conforme mostradas na Tabela 7:

Tabela 7. Massa e teores da argila lavrada em um semestre, pelo modelo de blocos.

| Toneladas | Fe₂O₃ | CaO | SiO₂ | Al₂O₃ | MgO | K₂O | Na₂O | SO₃ | TiO₂ | P₂O₅ | MnO | P.F. |
|------------------|------------------------------------|------------|------------------------|------------------------------------|------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 98.674 | 10,58 | 0,17 | 60,37 | 16,90 | 0,11 | 0,52 | 0,02 | 0,07 | 1,91 | 0,05 | 0,14 | 8,43 |

A informação contida no modelo de blocos inclui óxidos de menor expressão, e a porcentagem de perda ao fogo. Cabe notar que o fechamento químico (somatório dos óxidos mais perda ao fogo) chega a 99,27%, indicativo de análises de boa precisão.

Já a média das amostras de argila coletadas da alimentação do moinho de cru e pesadas na balança de dosagem, teve a seguinte composição química (Tabela 8):

Tabela 8. Massa e teores da argila lavrada em um semestre, pelas análises da fábrica.

| Toneladas | Fe₂O₃ | CaO | SiO₂ | Al₂O₃ | MgO | K₂O | SO₃ | P₂O₅ | Umidade |
|------------------|------------------------------------|------------|------------------------|------------------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------|
| 104.929 | 9,02 | 0,16 | 60,18 | 15,32 | 0,07 | 0,62 | 0,12 | 0,02 | 17,77 |

Por fim, para realização do retrocálculo da argila a partir da farinha, óxido por óxido, foram utilizadas as médias das análises do calcário, da farinha produzida, e o ensaio da

areia. A massa de argila lavrada é a mesma da Tabela 6 anterior, medida pela balança de dosagem no moinho de cru, bem como a umidade considerada. O resultado do retrocálculo é mostrado na Tabela 9, a seguir:

Tabela 9. Massa e teores da argila lavrada em um semestre, por retrocálculo da farinha.

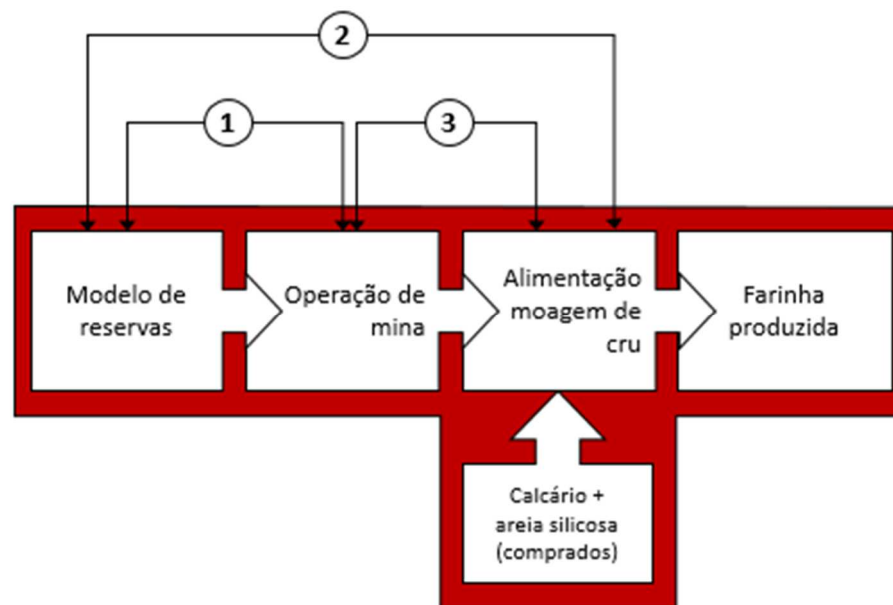
| Material | Toneladas (base úmida) | Umidade (%) | Toneladas (base seca) | Fe₂O₃ | CaO | SiO₂ | Al₂O₃ | MgO | K₂O | SO₃ | P₂O₅ |
|--------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------|------------------------|------------------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Calcário | 448.076 | 6,64 | 418.332 | 1,37 | 48,54 | 2,11 | 0,31 | 3,72 | 0,04 | 0,66 | 0,69 |
| Areia | 919 | 20,00 | 735 | 1,32 | 0,04 | 96,80 | 1,07 | 0,10 | 0,42 | - | 0,16 |
| Farinha Produzida | N/A | - | 505.334 | 2,78 | 41,96 | 12,15 | 3,41 | 3,77 | 0,17 | 0,61 | 0,66 |
| Argila (retrocálculo) | 104.929 | 17,77 | 86.283 | 9,64 | 10,41 | 60,08 | 18,48 | 4,06 | 0,76 | 0,36 | 0,51 |

A composição da argila pelas três fontes de informação é reunida na Tabela 10, na seguir, onde também se apresenta o cálculo dos parâmetros MS, MA e a soma dos óxidos com a P.F. para cada linha. A Figura 34, que acompanha a tabela, ilustra as reconciliações que foram realizadas.

Tabela 10. Resultados da reconciliação da produção de argila em Cajati, período de um semestre.

| ATIVIDADE | Fe ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | MnO | P.F. | MS | MA | Σ Óxidos |
|---|--------------------------------|--------|------------------|--------------------------------|--------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------------------|------|------|--------|--------|----------|
| Modelo de blocos | 10,58 | 0,17 | 60,37 | 16,90 | 0,11 | 0,52 | 0,02 | 0,07 | 1,91 | 0,05 | 0,14 | 8,43 | 2,20 | 1,60 | 99,27 |
| Operação de mina (amostras laboratório) | 9,02 | 0,16 | 60,18 | 15,32 | 0,07 | 0,62 | - | 0,12 | - | 0,02 | - | - | 2,47 | 1,70 | 85,50 |
| Alimentação do moinho (retrocálculo) | 9,64 | 10,41 | 60,08 | 18,48 | 4,06 | 0,76 | - | 0,36 | - | 0,51 | - | - | 2,14 | 1,92 | 104,29 |
| Reconciliação (1) - % | 17,3% | 7,6% | 0,3% | 10,3% | 52,1% | -15,2% | - | -39,8% | - | 123,9% | - | - | -11,1% | -6,0% | 16,1% |
| Reconciliação (2) - % | 9,8% | -98,4% | 0,5% | -8,6% | -97,4% | -30,8% | - | -80,0% | - | -91,1% | - | - | 2,8% | -16,8% | -4,8% |
| Reconciliação (3) - % | -6,4% | -98,5% | 0,2% | -17,1% | -98,3% | -18,4% | - | -66,7% | - | -96,0% | - | - | 15,7% | -11,5% | -18,0% |

Figura 34. Reconciliações realizadas seguindo o fluxograma estabelecido para Cajati.



Acerca dos resultados obtidos pode-se comentar:

Primeiramente, quanto à massa da argila: na visão do modelo de blocos, ficou em 98.674 toneladas (base úmida), enquanto a dosagem da balança de alimentação no moinho totalizou 104.929 toneladas, também base úmida. Essa divergência de dados se deve às datas da realização da topografia em campo, que não coincidiram exatamente com os dados da balança, os quais são disponibilizados na forma consolidada do dia 01 ao 30/31 de cada mês. Como a produção diária da mina ronda as 1.000 toneladas/dia, apenas 6 dias de diferença a menos podem ter gerado essa diferença.

Também não se pode descartar que a densidade adotada de 1,75 t/m³ esteja incorreta, pois carecem ensaios de determinação, ou mesmo que varie regionalmente na mina.

Verifica-se pela Reconciliação 1 (modelo de blocos usado no planejamento, *versus* argila extraída na mina), que o modelo pode estar subestimando os parâmetros MS e MA, respectivamente, em -11% e -6%. Este fato, se verificado também na reconciliação de outros períodos, pode indicar a necessidade de se atualizar o modelo, inserindo novas informações de sondagens, com análises químicas em laboratório certificado e com métodos de estimativa mais criteriosos.

Há um problema evidente com o somatório dos óxidos (o fechamento químico) nos dados da argila analisada na fábrica e na argila retrocalculada pela farinha. A argila analisada não dispõe dos dados de TiO₂ e da P.F., que se sabe serem relevantes, da ordem de até 10% do total de massa da argila. Por este motivo, carecendo destes dados, o somatório não chega a 90%. No somatório da argila retrocalculada ocorre o inverso: chega a 104% mesmo sem os dados do TiO₂ e da P.F., neste caso, uma avaliação a respeito da composição mineralógica das matérias-primas tem de ser feita, no contexto da fábrica, para se chegar a alguma conclusão.

Através de todo o conhecimento geoquímico da argila, que foi sondada e analisada para criação do modelo, e das próprias análises elaboradas pelo laboratório da fábrica para controle da operação, sabe-se que o minério é pobre em cálcio, magnésio e fósforo.

De fato, a única matéria-prima que aporta significativamente esses elementos na farinha, é o calcário. Portanto o resultado que aponta um teor de CaO de 10,41% na argila, por retrocálculo, evidentemente é falso e deve ser desconsiderado, bem como os resultados de MgO e P₂O₅.

Teoricamente o retrocálculo deveria funcionar para todos os óxidos, caso as médias da farinha, calcário e areia fossem totalmente representativas do material processado no período. Como isso não ocorreu, pode-se indicar a avaliação da qualidade da amostragem e análise destes materiais, principalmente o calcário, que é o mais variável entre estes e provavelmente está sendo subestimado o teor de CaO.

As três reconciliações indicam uma tendência a se subestimar o MA (módulo de alumina), isso se deve somente ao Al₂O₃ e Fe₂O₃. O MA é um parâmetro importante do cálculo de reservas, pois a cava final projetada possui um determinado MA médio. Se a fábrica privilegiar o consumo seletivo da argila com maior MA, em benefício das etapas subsequentes do processo, então a reserva de argila será reduzida em vida útil, a não ser que mais adiante se inclua a compra de corretivos de alumínio (ex: bauxita) que geralmente são caros e prejudicam sobremaneira o controle de custos na produção.

7.2.2. Base mensal

O resultado do semestre pode ser subdividido em avaliações mensais, realizando-se somente a Reconciliação 3 (amostras da mina x retrocálculo), pois não há atualização topográfica que acompanhe essa periodicidade.

Na Tabela 11, a seguir, estão listadas as reconciliações de 4 óxidos: os principais da argila, usados no cálculo do MS e do MA (Fe₂O₃, SiO₂ e Al₂O₃), e o CaO, este último apenas para se verificar se a tendência observada na base de reconciliação semestral se repete mês a mês.

Tabela 11. Resultados mensais da reconciliação da produção de argila em Cajati (4 óxidos).

| Óxido | Avaliação | Mês 1 | Mês 2 | Mês 3 | Mês 4 | Mês 5 | Mês 6 |
|--------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fe ₂ O ₃ | Amostras mina | 9,16 | 9,01 | 8,51 | 9,05 | 8,71 | 9,26 |
| | Retrocálculo | 10,14 | 9,55 | 9,32 | 9,79 | 9,53 | 9,24 |
| | Reconciliação | -9,7% | -5,6% | -8,7% | -7,5% | -8,5% | 0,2% |
| SiO ₂ | Amostras mina | 60,20 | 60,37 | 61,80 | 59,84 | 60,89 | 59,19 |
| | Retrocálculo | 61,58 | 60,34 | 62,09 | 59,29 | 62,21 | 56,23 |
| | Reconciliação | -2,2% | 0,1% | -0,5% | 0,9% | -2,1% | 5,3% |
| Al ₂ O ₃ | Amostras mina | 15,68 | 15,40 | 14,72 | 15,46 | 15,10 | 15,19 |
| | Retrocálculo | 19,45 | 18,51 | 18,40 | 18,66 | 18,68 | 17,15 |
| | Reconciliação | -19,4% | -16,8% | -20,0% | -17,1% | -19,2% | -11,4% |
| CaO | Amostras mina | 0,15 | 0,20 | 0,18 | 0,15 | 0,15 | 0,13 |
| | Retrocálculo | 6,44 | 8,97 | 10,21 | 10,49 | 10,52 | 13,83 |
| | Reconciliação | -97,6% | -97,8% | -98,3% | -98,5% | -98,6% | -99,1% |

Os resultados da base mensal mostram a mesma tendência observada na reconciliação completa do semestre: subestimação relevante nos teores de Fe e Al; diferenças desconsideráveis no Si; e resultado do Ca totalmente errado (não há reconciliação).

7.3. Reconciliação da produção de calcário na fábrica de Candiota, RS

7.3.1. Período completo

A primeira reconciliação foi efetuada na base do período completo de 11 meses, marcado por um levantamento topográfico de início e um levantamento topográfico do final.

O calcário lavrado, por este critério do corte do modelo de blocos da reserva, teve a massa e composição química mostradas na Tabela 12:

Tabela 12. Massa e teores do calcário lavrado no período, pelo modelo de blocos.

| Toneladas | P.F. | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | FSC |
|-----------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|--------|
| 699,927 | 34,63 | 11,58 | 2,63 | 1,45 | 41,09 | 5,19 | 0,15 | 1,15 | 0,10 | 112,66 |

A informação contida no modelo de blocos inclui óxidos de menor expressão, e a porcentagem de perda ao fogo. Cabe notar que o fechamento químico chega a 97,97%, indicativo de que faltam óxidos analisados e estimados nos blocos, ou que a base de análise químicas pode ter alguma deficiência.

As Figuras 35 e 36 ilustram o modelo de blocos da reserva entre as duas superfícies, utilizado para o cálculo. A legenda aplicada para colorir os blocos é uma legenda de ZONE do calcário e do estéril.

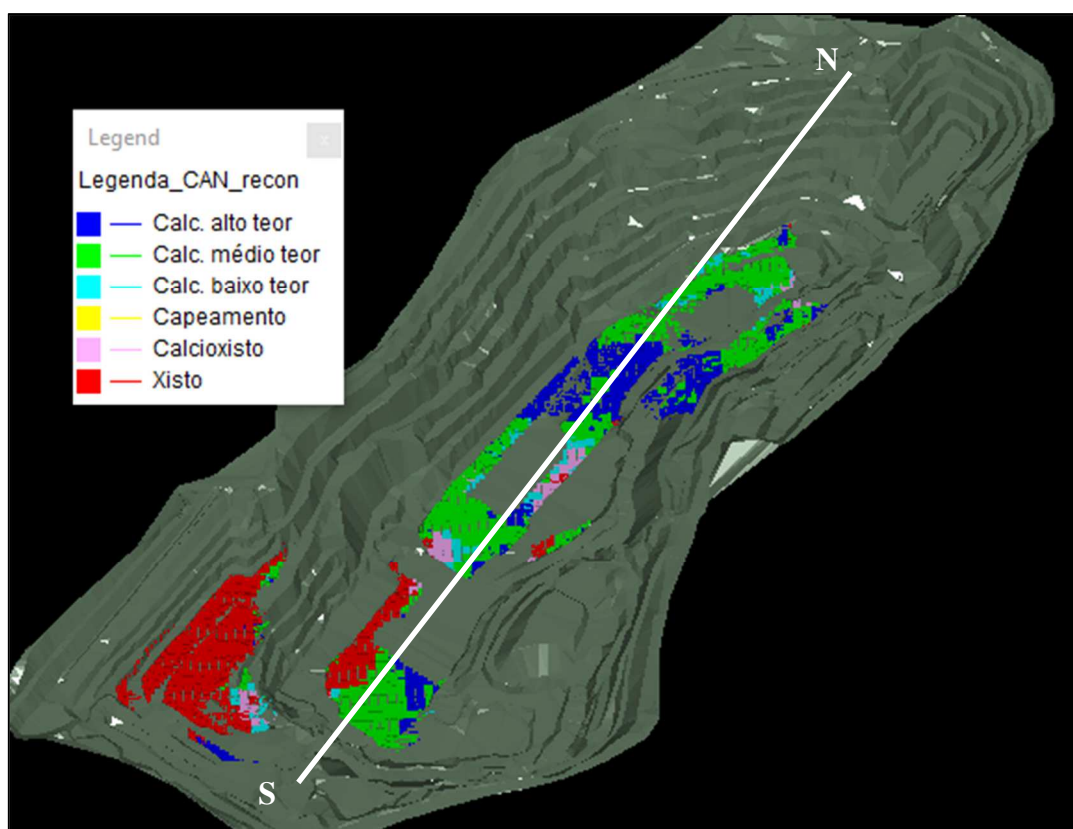


Figura 35. Vista em 3D da superfície topográfica, do modelo de blocos e locação da seção vertical.

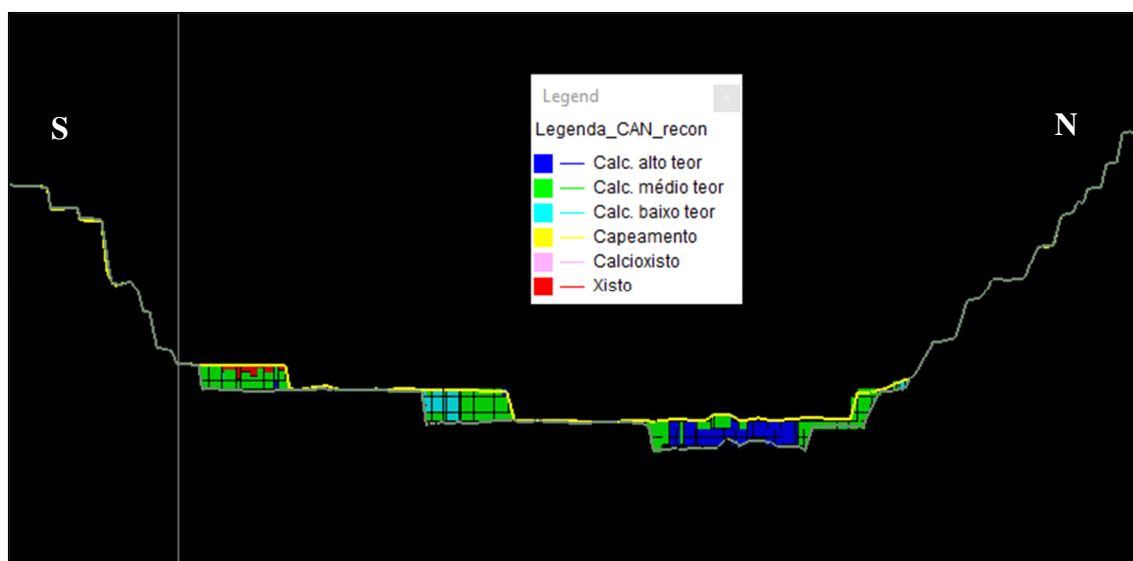


Figura 36. Seção vertical N-S do modelo de calcário lavrado no semestre. Exagero vertical de 3x.

A zona à sudoeste com maior concentração de blocos vermelhos na Figura 35 é o contato do xisto que recobre a camada principal de calcário. Essa região é simplificada no modelo da reserva devido à malha de sondagem rotativa mais espaçada, mas na prática o contato entre xisto e calcário pode variar bastante, aumentando ou diminuindo a quantidade recuperada de calcário.

A segunda base da informação seriam os furos de desmonte e a respectiva amostragem do “pó de rock”, também chamado *grade control*. Como explicado no item 6, não foi possível montar a base de dados completa para todos os desmontes realizados no período, pois para ser utilizada, a informação dos fogos precisa estar georreferenciada (coordenadas UTM levantadas em campo), com o registro da amostragem de quais furos foram agrupados para formar as amostras e, por fim, a análise química. O que ocorreu foi que em vários desmontes faltava uma ou mais destas informações, por isso não foi possível usar os dados para fazer uma comparação completa dentro do período de 11 meses. Foi empregado um método para utilizar essa informação, como se verá mais adiante, em um caso especial separado da reconciliação total.

Seguindo adiante no fluxograma, para o terceiro passo, tem-se a média das amostras de calcário britado, gerada a cada 15 minutos pelo PGNA, mostrada na Tabela 13:

Tabela 13. Massa e teores do calcário lavado no período, pelo analisador PGNAA da britagem.

| Toneladas | Fe₂O₃ | CaO | SiO₂ | Al₂O₃ | SO₃ | MgO | K₂O | Na₂O | FSC |
|------------------|------------------------------------|------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------------------|------------|
| 509.965 | 1,25 | 41,09 | 12,10 | 1,38 | 0,00 | 4,56 | 1,11 | 0,00 | 113,17 |

Por fim, para realização do retrocálculo do calcário a partir da farinha, óxido por óxido, foram utilizadas as médias das análises do calcário, da farinha produzida, e o ensaio da carepa. A massa de calcário lavado é a que foi alimentada na moagem de cru, medida pela balança de dosagem. O resultado é mostrado na Tabela 14:

Tabela 14. Massa e teores do calcário lavado no período, por retrocálculo da farinha.

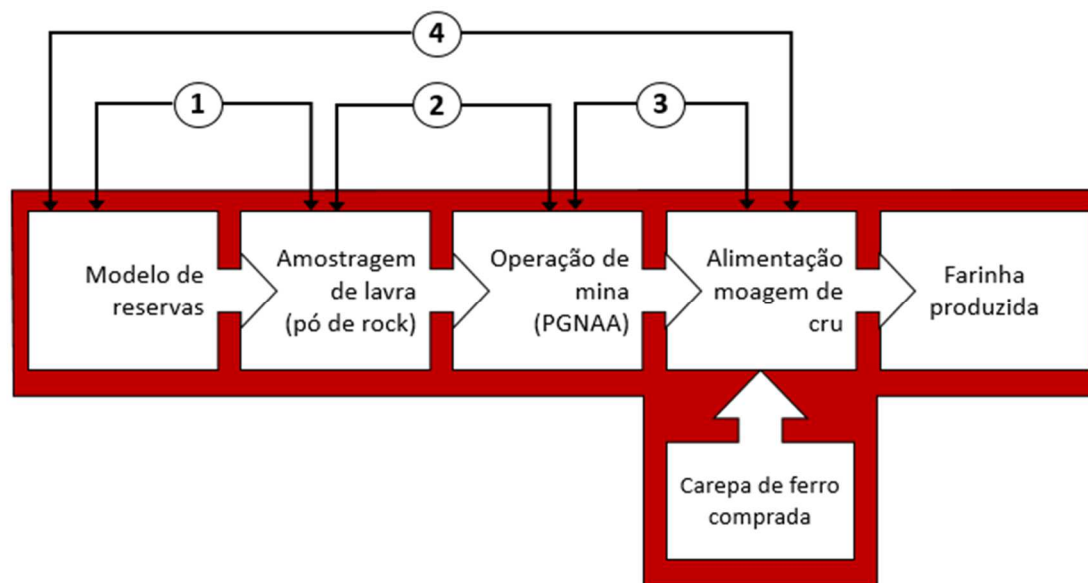
| Material | Toneladas (base úmida) | Umidade (%) | Toneladas (base seca) | Fe₂O₃ | CaO | SiO₂ | Al₂O₃ | SO₃ | MgO | K₂O | Na₂O |
|----------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------------------|
| Carepa | 2.391 | 0,85 | 2.370 | 100,00 | 0,00 | 0,38 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Farinha Produzida | N/A | - | 646.019 | 1,67 | 40,63 | 12,28 | 2,53 | 0,24 | 5,14 | 1,10 | 0,08 |
| Calcário (retrocálculo) | 649.319 | 0,85 | 643.800 | 1,31 | 40,77 | 12,32 | 2,54 | 0,24 | 5,16 | 1,10 | 0,08 |

A composição do calcário, compilada de todas as fontes de informação é reunida na Tabela 15, a seguir, onde também se apresentam todas as reconciliações feitas, além do cálculo dos parâmetros FSC, MS, MA. A Figura 37, que acompanha a tabela, mostra os respectivos pares de dados considerados para as reconciliações.

Tabela 15. Resultados da reconciliação da produção de calcário em Candiota, período de 11 meses.

| ATIVIDADE | Fe ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | SO ₃ | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | FSC | MS | MA |
|---|---|-------|------------------|--------------------------------|-----------------|--------|------------------|-------------------|--------|--------|--------|
| Modelo de blocos | 1,45 | 41,09 | 11,58 | 2,63 | 0,15 | 5,19 | 1,15 | 0,10 | 112,66 | 2,84 | 1,81 |
| Operação de mina (furos de <i>grade control</i>) | não cobrem toda a área do período | | | | | | | | | | |
| Britagem (leitura do PGNAA) | 1,25 | 41,09 | 12,10 | 1,38 | 0,00 | 4,56 | 1,11 | 0,00 | 113,17 | 4,60 | 1,10 |
| Alimentação moinho (retrocálculo) | 1,31 | 40,77 | 12,32 | 2,54 | 0,24 | 5,16 | 1,10 | 0,08 | 106,36 | 3,20 | 1,93 |
| Reconciliação (1) - % | ver caso especial apenas para as áreas com cobertura de furos de <i>grade control</i> | | | | | | | | | | |
| Reconciliação (2) - % | não é possível calcular para o período (os furos não cobrem toda a área) | | | | | | | | | | |
| Reconciliação (3) - % | -4,5% | 0,8% | -1,8% | -45,8% | -99,9% | -11,6% | 0,7% | -100,0% | 6,4% | 43,8% | -43,2% |
| Reconciliação (4) - % | 10,9% | 0,8% | -6,0% | 3,5% | -37,9% | 0,6% | 4,3% | 28,2% | 5,9% | -11,3% | -6,6% |

Figura 37. Reconciliações realizadas seguindo o fluxograma estabelecido para Candiota.



Sobre os resultados obtidos é possível afirmar que:

Evidentemente, pela falta de geração e/ou armazenamento de dados da operação de perfuração, amostragem e análise, não foi possível realizar a Reconciliação 1 e 2. Isso já ressalta a importância de ter uma gestão destes dados, pois seria nestas duas primeiras reconciliações que se teria a mensuração, para todo o período, da diluição prática ocorrida na lavra.

A Reconciliação 3, o calcário britado e analisado no PGNAA, parece indicar má aderência com relação ao FSC, que no caso de Candiota é o principal parâmetro de controle, afinal é o que determina a produção do clínquer e também a vida útil que será obtida da reserva de calcário (algo análogo ao teor de corte em depósitos de metais). Porém, ao se observar a medição de massa aferida na balança, se evidencia que há problemas na pesagem ou que informação foi perdida, pois uma massa da ordem de apenas 509 mil toneladas diverge muito da massa de calcário processada na fábrica. Na checagem mensal, que se verá mais adiante, pode-se verificar se o problema ocorreu em algum mês específico ou se é algo sistemático.

Outro aspecto importante a comentar da Reconciliação 3, é que ela indica algum problema do PGNAA na análise do Al_2O_3 , pois a reconciliação é significativamente pior para este óxido do que os outros óxidos principais (CaO , SiO_2 , Fe_2O_3). Essa má reconciliação no Al_2O_3 também se replica para os parâmetros cimenteiros MS e MA.

A Reconciliação 4, que efetivamente compara o modelo da reserva com o produto saído da usina, indica positivamente que o modelo se prestou bem a prever o teor de CaO e MgO , que são, respectivamente, o principal óxido determinante da qualidade do material para cimento, e o principal contaminante. Os óxidos com pior reconciliação, nomeadamente, SO_3 e Na_2O , são muito pouco significativos em valor absoluto, e não representam entraves no processo realizado na fábrica.

7.3.2. Caso especial - Reconciliação do modelo de longo prazo com os furos de desmonte

Como informado no item anterior, não foi possível reunir as informações dos furos de desmonte realizados em todo o período conforme originalmente planejado, devido à falta de informação abrangente para todo o período. Foi necessário, então, aplicar uma metodologia alternativa para utilizar a informação, nos locais onde estava disponível, para fazer algum comparativo com o modelo de blocos da reserva.

A Figura 38 mostra o conjunto de furos de desmonte compilados para todo o período da reconciliação, coloridos de azul:

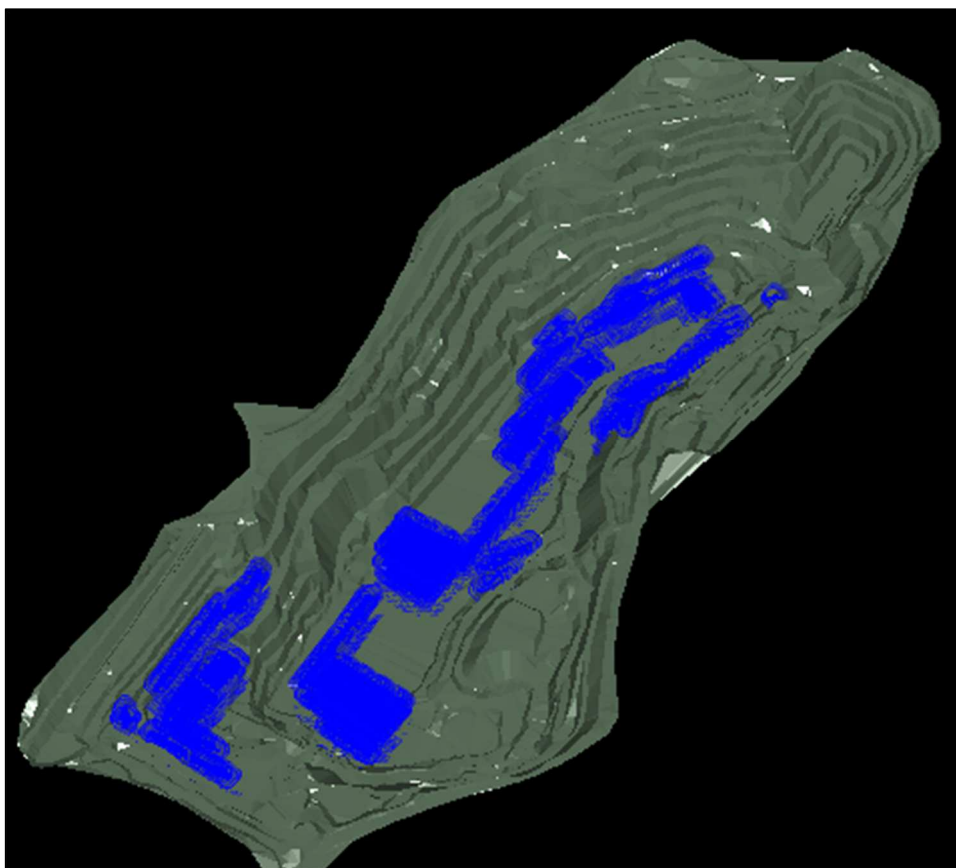


Figura 38. Furos de desmonte com informação do “pó de rock” compilados ao longo de todo o período.

Quando se avalia em maior proximidade a informação disponível, ficam evidentes os locais de avanço onde não se conseguiu ter a informação dos furos, seja pela falta de levantamento topográfico das coordenadas, ou pela falta de análise química das amostras. A Figura 39 exemplifica um destes locais:

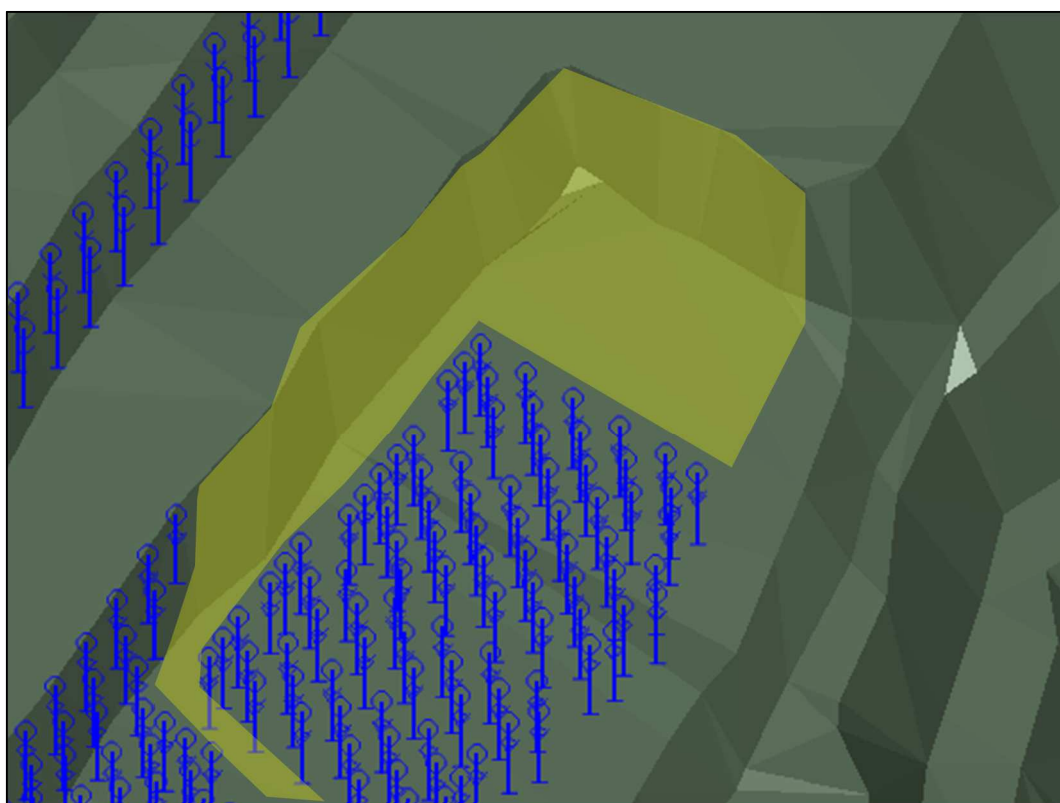


Figura 39. Exemplo de local lavrado na mina, marcado em amarelo, sem o registro das informações do desmante.

Mesmo sendo insuficientes para utilizar na reconciliação completa do período, os dados podem ser comparados com o modelo de reserva nos locais onde há sobreposição das informações. Para isso, a informação disponível dos furos de desmante foi utilizada para gerar um modelo de blocos com área de influência restrita aos locais com cobertura de furos de desmante contendo informação completa, e depois este modelo teve os teores estimados seguindo uma área de influência pequena (compatível com a malha do plano de fogo da mina), sempre respeitando os domínios geológicos do calcário e do xisto. A Figura 40, a seguir, mostra o modelo obtido a partir dos furos de desmante:

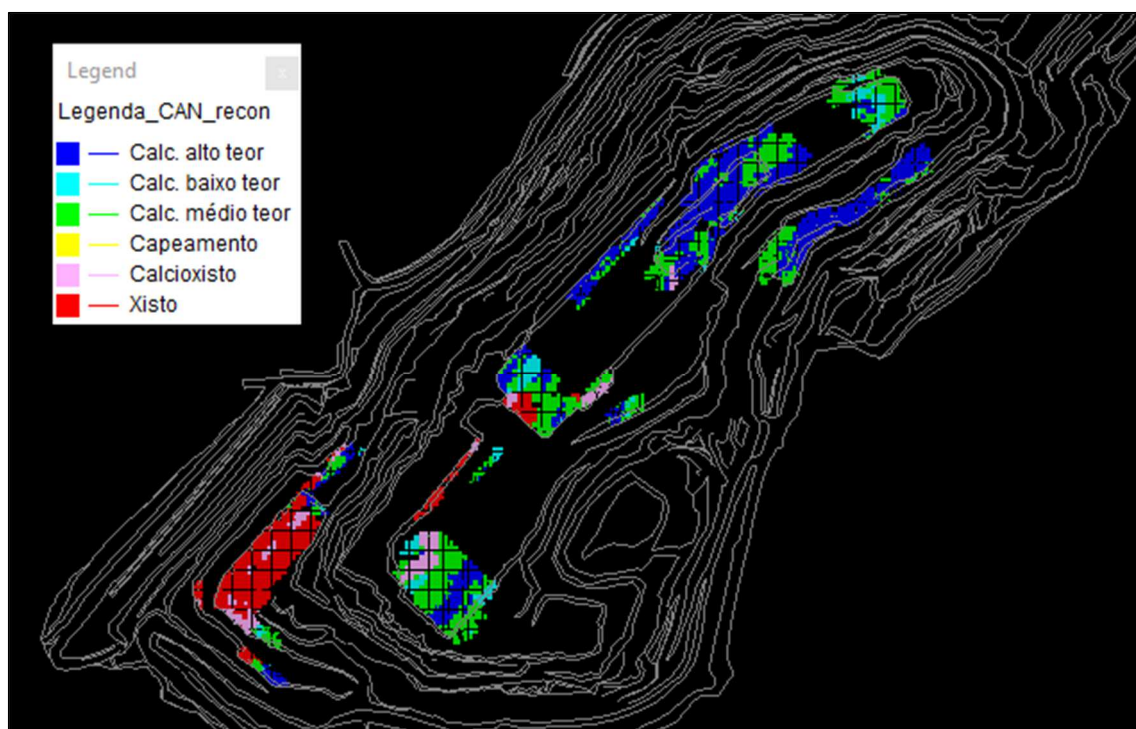
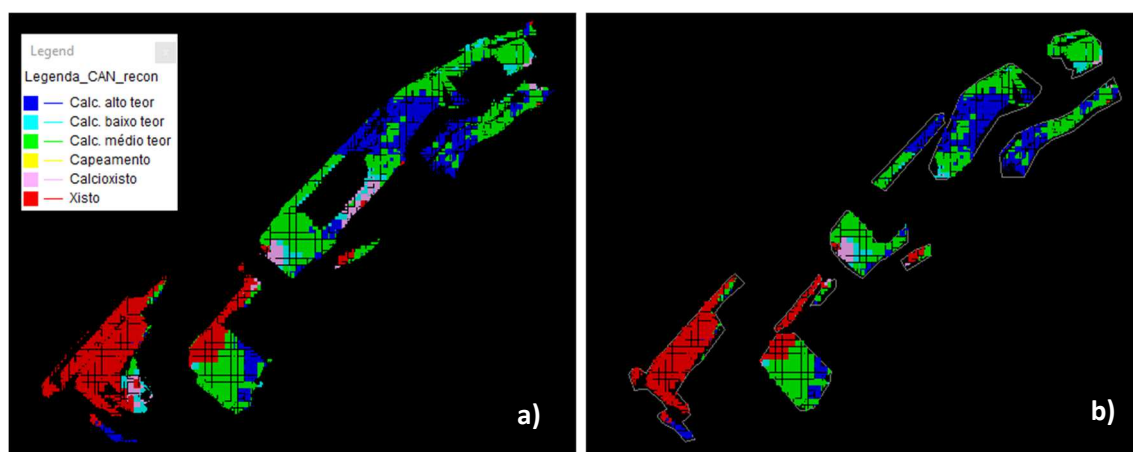


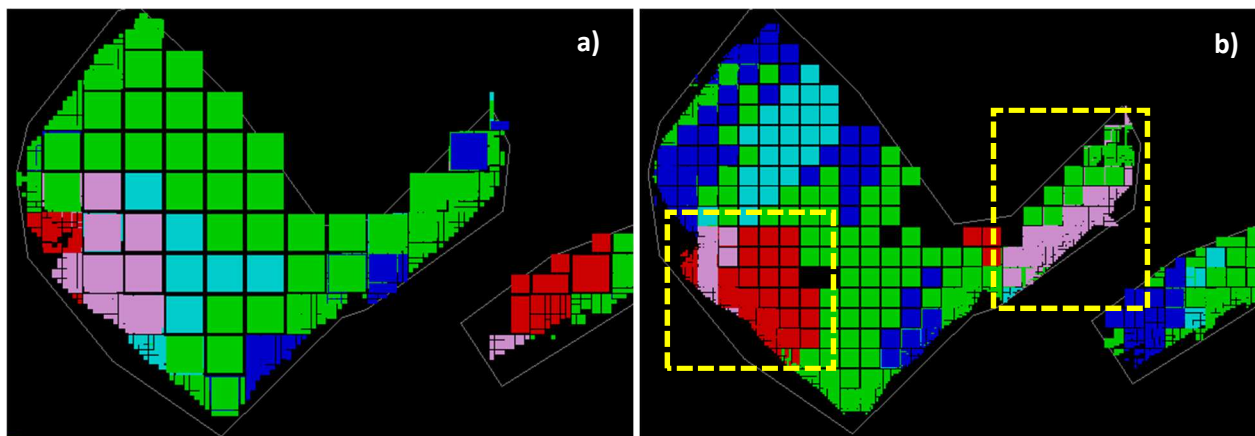
Figura 40. Modelo de blocos gerado com as informações dos furos de desmonte (*grade control*).

As áreas cobertas por esse modelo também foram usadas para fazer um filtro no modelo de longo prazo da reserva, mantendo somente os blocos com sobreposição, tal como mostram as Figuras 41a e 41b.



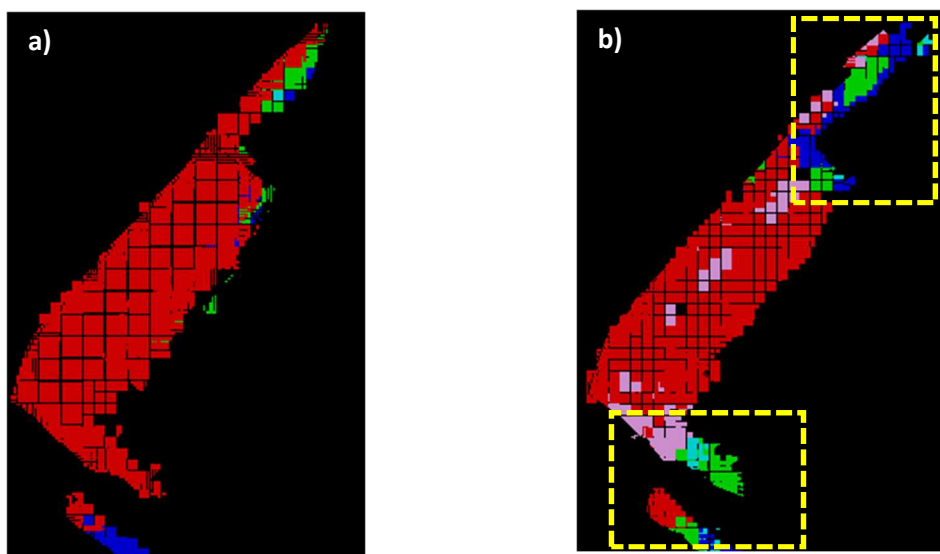
Figuras 41a e 41b. Modelo de blocos de longo prazo lavrado no período, (a) em toda a área e (b) locais onde também existe a informação dos furos de *grade control* (b).

Na comparação visual entre os dois modelos, pode-se identificar áreas onde o modelo de longo prazo da reserva era otimista e considerou contatos onde haveria menos blocos de xisto (blocos vermelhos) ou calcioxisto (blocos rosas), vide as Figuras 42a e 42b:



Figuras 42a e 42b. Corte do modelo lavrado na região central da cava, na visão do modelo de longo prazo (a) e do modelo gerado com informações do desmonte ou *grade control* (b).

O fenômeno contrário foi percebido em outro setor da cava: o contato real com o xisto na região sudoeste, conforme verificado na lavra, foi de menor escala, e permitiu maior recuperação de calcário na lavra, conforme mostram as Figuras 43a e 43b:



Figuras 43a e 43b. Corte do modelo lavrado na região sudoeste da cava, na visão do modelo de longo prazo (a) e do modelo gerado com informações do desmonte ou *grade control* (b).

De qualquer maneira, com os dois modelos ocupando a mesma região lavrada, foi possível fazer o comparativo que segue na Tabela 16:

Tabela 16. Reconciliação do modelo de reserva com a informação dos furos de desmonte, nas áreas onde as duas informações estão disponíveis.

| ATIVIDADE | Fe ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | SO ₃ | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | FSC |
|---|--------------------------------|-------|------------------|--------------------------------|-----------------|------|------------------|-------------------|-------|
| Modelo de blocos longo prazo (reserva) | 1,42 | 41,22 | 11,26 | 2,55 | 0,15 | 5,22 | 1,13 | 0,10 | 116,2 |
| Modelo de operação de mina (<i>grade control</i>) | 1,15 | 42,45 | 11,18 | 2,33 | 0,15 | 4,82 | 1,00 | 0,10 | 121,9 |
| Reconciliação (2) - % | 22,8% | -2,9% | 0,7% | 9,3% | 0,9% | 8,3% | 12,3% | -2,3% | -4,7% |

Percebe-se uma boa aderência entre o CaO e o SiO₂, que são os principais óxidos, e má aderência no Fe₂O₃ e no Al₂O₃, ambos com tendência de serem superestimados no modelo de longo prazo. Como resultado, o FSC (saturação) do calcário é subestimado na visão do modelo de longo prazo da reserva.

Tal diferença pode ser devido aos contatos reais verificados durante a lavra do depósito, que no geral indicaram haver menos xisto e calcioxisto que o esperado em alguns setores, mas também a uma menor diluição interna de xisto intercalado no calcário.

Para se fazer uma avaliação mais aprofundada e sistêmica da diluição ao longo da cadeia de valor, seria necessário dispor de toda a informação dos desmontes realizados no período para se comparar com o total britado e analisado no PGNAA. Se a massa de calcário britado for maior, e possuir um FSC menor do que o calcário quantificado nos furos de desmonte, isso indica que uma maior quantidade do minério marginal (calcário de baixo teor) ou até do calcioxisto, foi misturada e incorporada no produto, ou seja, que houve diluição a mais que o planejado. Este controle é fundamental, pois a vida útil da reserva está projetada para uma determinada diluição com o minério marginal, e o acompanhamento é importante para que a diluição seja sempre menor ou igual à planejada e nunca maior. Os dados do PGNAA e dos furos de desmonte são fundamentais para isso.

7.3.3. Reconciliação na base mensal

O resultado do período pode ser subdividido em avaliações mensais, realizando-se somente a Reconciliação 3 (PGNAA x retrocálculo). Para tanto, foi acessado o banco de dados do PGNAA para consultar as leituras minuto a minuto, que foram ordenadas e separadas em cada mês.

Na Tabela 17 estão listadas as reconciliações de 4 óxidos: os principais do calcário, usados no cálculo do FSC, do MS e do MA (CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃):

Tabela 17. Resultados mensais da reconciliação da produção de calcário em Candiota (4 óxidos)

| Óxido | Avaliação | Mês 1 | Mês 2 | Mês 3 | Mês 4 | Mês 5 | Mês 6 | Mês 7 | Mês 8 | Mês 9 | Mês 10 | Mês 11 |
|--------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CaO | PGNAA | 41,25 | 40,75 | 40,74 | 40,97 | 40,30 | 41,52 | 42,61 | 47,08 | 41,35 | 41,18 | 41,27 |
| | Retrocálculo | 40,96 | 40,62 | 40,60 | 40,78 | 40,75 | 40,72 | 40,89 | 40,87 | 40,80 | 40,61 | 41,13 |
| | Reconciliação | 0,7% | 0,3% | 0,3% | 0,5% | -1,1% | 2,0% | 4,2% | 15,2% | 1,3% | 1,4% | 0,3% |
| SiO ₂ | PGNAA | 11,77 | 11,99 | 11,66 | 11,89 | 12,75 | 11,75 | 11,33 | 7,62 | 12,94 | 12,96 | 13,30 |
| | Retrocálculo | 12,20 | 12,10 | 12,36 | 12,51 | 12,34 | 12,37 | 12,37 | 12,16 | 12,37 | 12,27 | 12,47 |
| | Reconciliação | -3,5% | -0,9% | -5,7% | -5,0% | 3,3% | -5,0% | -8,3% | -37,3% | 4,7% | 5,6% | 6,6% |
| Al ₂ O ₃ | PGNAA | 1,60 | 1,61 | 1,32 | 1,46 | 1,60 | 1,40 | 0,75 | 0,12 | 1,06 | 0,87 | 0,72 |
| | Retrocálculo | 2,55 | 2,49 | 2,39 | 2,55 | 2,52 | 2,49 | 2,62 | 2,66 | 2,69 | 2,48 | 2,41 |
| | Reconciliação | -37,3% | -35,4% | -44,8% | -42,9% | -36,6% | -43,6% | -71,4% | -95,6% | -60,6% | -65,0% | -70,0% |
| Fe ₂ O ₃ | PGNAA | 1,29 | 1,34 | 1,19 | 1,28 | 1,35 | 1,25 | 1,01 | 0,64 | 1,16 | 1,14 | 1,18 |
| | Retrocálculo | 1,28 | 1,34 | 1,17 | 1,07 | 1,19 | 1,38 | 1,41 | 1,26 | 1,44 | 1,43 | 1,32 |
| | Reconciliação | 0,9% | 0,1% | 2,1% | 19,9% | 13,4% | -8,8% | -28,3% | -49,2% | -19,8% | -20,3% | -10,6% |
| FSC | PGNAA | 115,60 | 112,14 | 116,49 | 114,32 | 104,76 | 117,36 | 128,04 | 215,14 | 108,09 | 108,26 | 106,24 |
| | Retrocálculo | 107,82 | 107,80 | 106,29 | 105,26 | 106,37 | 105,81 | 105,86 | 107,55 | 105,29 | 106,26 | 106,46 |
| | Reconciliação | 7,2% | 4,0% | 9,6% | 8,6% | -1,5% | 10,9% | 21,0% | 100,0% | 2,7% | 1,9% | -0,2% |

Os resultados da base mensal auxiliam a entender a diferença de massa e dos teores dos óxidos apontado na reconciliação do período completo.

Primeiramente, o PGNAA parece sistematicamente subestimar o teor de Al₂O₃, por uma grande diferença, em relação às outras fontes de informação. Como este óxido é relevante no cálculo dos três parâmetros (FSC, MS e MA), evidentemente ele colabora sobremaneira para uma piora na reconciliação geral da cadeia, pois uma leitura a menor

do Al_2O_3 significa uma superestimação do FSC. Essa deficiência ou carência na análise de um óxido específico é algo que pode ser tratado mediante contato com a assistência técnica do equipamento e a realização de nova calibração do sistema.

Quanto aos demais óxidos (CaO , SiO_2 e Fe_2O_3) estes mostram boas reconciliações no começo do ano, até o terceiro mês. A partir do quarto, mês, notam-se problemas no ferro, e depois no sétimo e oitavo mês, a reconciliação é muito ruim para todos os óxidos e o FSC. Não só nos teores, como também no apontamento de massa da balança do britador. É por esse motivo que a massa do período completo, pelo PGNA, ficou muito abaixo, e a qualidade apontada do material não tem reconciliação com as outras atividades do processo.

Uma vez percebidos estes problemas, foi feita uma consulta na fábrica, especificamente sobre os meses 7 e 8, e de fato se confirmou que estes dois meses foram um período que antecedeu uma grande parada dos equipamentos e a troca das fontes radioativas do PGNA, justificando o grande desvio observado nas leituras em base mensal.

7.4. Avaliação dos resultados

O trabalho de reconciliação, quando implementado de forma consistente, acaba por se tornar um *nexo* ou um *hub* a partir do qual várias atividades da cadeia de valor são acompanhadas, medidas, auditadas e comparadas entre si.

No estudo de caso da fábrica de cimento de Cajati, com foco na mineração própria de argila, interessa acompanhar a qualidade do modelo usado para fazer os planos de produção desta matéria-prima e com isso ter mais previsibilidade a respeito do teor que chegará na planta. Outro ponto de grande importância é se acompanhar a exploração do recurso mineral, limitado e cercado de incertezas, para que seu aproveitamento se dê de forma equilibrada e aderente em relação ao projeto de reservas. Uma eventual lavra seletiva da argila, em busca de valores específicos de MS ou MA, representaria uma redução da reserva e a necessidade de ter que se adquirir corretivos externos no futuro,

algumas vezes a preços altos. Na mineração para cimento, é preciso ter equilíbrio e consumir os recursos minerais de acordo com a composição química que eles oferecem.

Neste sentido, de se utilizar os resultados da Reconciliação para atuar de forma proativa na detecção e resolução de problemas na cadeia de atividades, que se sugerem as seguintes ações para serem implementadas no futuro:

- Realização de ensaios de determinação da densidade *in situ* da argila;
- Programar a medição topográfica da mina para ocorrer sempre no final dos meses, coincidindo o máximo possível com o último dia;
- Realizar a atualização do modelo de reservas, através da adição de novas sondagens, realização de análises químicas em laboratórios certificados, e estimativas criteriosas de teor nos blocos;
- Implementar ou rever o controle de qualidade das análises do laboratório local, buscando melhoria contínua. Disponibilizar as análises de TiO_2 da argila, para que possam entrar na reconciliação. Realizar periodicamente o ensaio de P.F. em algumas amostras da mina, dentro do possível, também para que sejam utilizados na reconciliação.
- Avaliação das metodologias de amostragem e análise do calcário utilizadas. Realizar ensaios em laboratório externo para identificar se há alguma divergência no CaO, como identificado na reconciliação;
- Implementar ou reforçar a rotina de calibração e certificação das balanças de alimentação do moinho de cru, buscando maior confiança nas medições de massa;
- Implementar rotina de análise da areia, que pode ocorrer numa frequência menor que a das demais matérias-primas, mas é importante que exista;

Uma vez iniciadas estas ações, espera-se que na base mensal comecem a aparecer resultados na reconciliação, através da melhoria dos números em relação aos apontamentos deste primeiro trabalho.

Sobre o estudo de caso realizado para a fábrica de Candiota: dentro do período selecionado, acabou não sendo possível devido à carência das informações completas dos furos de desmonte, e dos problemas que foram detectados em determinados meses das leituras do PGNAA. De qualquer forma, o desenvolvimento teórico do assunto mostrou que é possível organizar os dados gerados pela operação e compará-los entre si, e que há vários ganhos a serem auferidos, pois mesmo uma reconciliação ruim é um resultado que motiva a procurar proativamente as suas causas. Ou seja, praticar a reconciliação é inserir a gestão da mina em um processo abrangente de melhoria contínua.

A jazida de calcário de Candiota, como já explicado, é um depósito com pouca disponibilidade de cálcio para constituir matéria-prima adequada para o processo de fabricação do cimento. Além disso, pela sua condição geológica e estrutural, está encaixada em um arcabouço de xisto e com diversas intercalações internas, que fazem com que a lavra do calcário tenda a sofrer diluições internas e externas com o xisto. Essas diluições, que contribuem pouco com o CaO e muito com os óxidos que diminuem o FSC, podem se constituir em um fato de quebra das reservas e da vida útil do projeto. Daí a importância de se acompanhar na reconciliação, atividade por atividade, qual o teor do minério efetivamente encaminhado para a produção de cimento.

O maior ganho a ser auferido com essa sistemática, em Candiota, é o real acompanhamento dos teores lavrados e encaminhados para a fábrica, com melhoria no controle de qualidade e redução nos desvios do material.

Neste sentido se sugerem as ações para implementação futura:

- Implementar definitivamente o controle e registro de todos os três componentes do *grade control* dos desmontes: marcação topográfica com coordenadas UTM de cada furo,

croqui de amostragem com o agrupamento de furos por amostra, e análise química da amostra realizada e disponibilizada na *intranet* da empresa.

- Realizar uma recalibração do PGNAA, a aferição do estado de suas fontes radioativas, substituindo-as se necessário, e discutir com o fornecedor especificamente sobre como melhorar a qualidade das análises do Al_2O_3 .

- Realizar sondagens de “pré-lavra”, com malha um pouco maior que a adotada nos desmontes, usando a própria perfuratriz e amostrando o pó para análise química. Estes resultados podem ser reunidos com os dados do *grade control* para formar um bom modelo de planejamento de curto prazo da mina, pois hoje ainda se utiliza o modelo de longo prazo para os planos de trabalho anuais.

- Implementar rotina de análise química da carepa de ferro, que pode ocorrer numa frequência menor que a das demais matérias-primas, mas é importante que exista.

8. CONCLUSÃO

A reconciliação de lavra é uma realidade e uma prática comum em diversas minerações existentes, em especial as de metais valiosos como o ouro. Quando se analisa a cadeia de valor mineral e as atividades são organizadas num fluxograma, é possível acompanhar o minério ao longo de toda a cadeia, desde o planejamento até o produto final, passando pela extração na mina e o beneficiamento na usina. Para cada uma destas atividades, é possível ter a quantificação e o teor do minério neste ponto, e acompanhar para cada par de atividades, como elas se reconciliam.

Neste trabalho, o objetivo era analisar a produção de cimento Portland, desde a mineração até o ensacamento, e desenvolver uma metodologia para ser possível fazer a reconciliação dos minérios utilizados nessa cadeia de valor mineral. Depois disso, utilizando-se de dados reais de duas fábricas de cimento em operação, o objetivo era demonstrar a aplicação da metodologia, seus resultados e quais perspectivas para continuar o trabalho a partir daí.

Primeiramente, pode-se concluir pelo trabalho que sim, é possível fazer reconciliação de lavra na cadeia de valor do cimento. Todos os minérios, chamados de matérias-primas no jargão desta indústria, podem ser rastreados ao longo da cadeia e comparados desde o modelo preditivo da reserva até a farinha produzida. Percebeu-se que, embora possa ser explicada por um fluxograma geral, a fabricação de cimento é um processo incrivelmente variável, pois depende muito da oferta local de recursos minerais, e dos produtos que se deseja obter para comercializar.

Diferentemente do caso da mineração de metais, onde se reconcilia apenas um ou dois elementos, no cimento é interessante reconciliar, no mínimo, os principais óxidos envolvidos no cálculo dos parâmetros cimenteiros: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , além de elementos contaminantes que possam estar presentes na situação local em cada estudo de caso.

Daí vem a metodologia geral expressa no item 6.2 deste trabalho. Partindo de um fluxograma geral, a fábrica de cimento objeto de estudo deve ser analisada para se compreender o processo existente, quais são as matérias-primas utilizadas e dentre estas, quais são extraídas pela empresa em minas próprias ou compradas. O contexto local das matérias-primas é de fundamental importância, como visto nos estudos de caso, pois é ele que determina se há algum elemento contaminante que deve ser mais controlado, ou se há algum dos parâmetros cimenteiros que é o crítico para o controle da reserva.

O conhecimento mineralógico da composição das matérias-primas é importante de se agregar na reconciliação, para que eventuais resultados possam ser descartados por não fazerem sentido, como foi visto no estudo de caso reconciliação da argila de Cajati, onde o CaO aparecia com um falso teor alto. Pelo contrário, o resultado da reconciliação serviu para indicar possíveis problemas em outros pontos, como análise do calcário e medição de massa nas balanças.

Abordando um pouco os dois estudos de caso, em Cajati (SP) ficou evidenciada a necessidade de se reavaliar o modelo usado no planejamento da argila e se modificar um pouco as rotinas de controle (medição topográfica, amostragem e análise química), para que se possa planejar melhor a exploração da reserva e se acompanhar os teores realizados na lavra. Este controle será muito importante para evitar uma lavra seletiva que faria diminuir a vida útil projetada para o depósito. A eventual exaustão da mina de argila antes do previsto levaria à necessidade de buscar nova área de mineração, ou de inserir no processo novos corretivos comprados no mercado, ambas essas soluções implicam em acréscimo de custos e/ou impactos ambientais ampliados pela necessidade de se adiantar a abertura de uma nova mina.

Já sobre a mina de calcário em Candiota, ao se organizar a informação existente dentro do fluxograma de reconciliação, diversas oportunidades de melhoria do processo apareceram. Primeiro, a falta de registro das informações completas dos desmontes realizados, num esquema de *grade control*, pois falta levantamento topográfico e/ou análise química das amostras. Outro ponto importante é que a reconciliação indicou que existe um problema sistêmico no analisador de calcário (PGNAA) da britagem, ao

subestimar a leitura do Al_2O_3 e, por consequência, superestimar o FSC do calcário. Ambas as informações, se forem geradas e utilizadas em um âmbito de reconciliação proativa das atividades da cadeia de valor, irão contribuir para melhoria no controle de qualidade e na mensuração e controle da diluição com xisto ocorrida na lavra.

Ao final do trabalho, com base nos dois estudos de caso, conclui-se realizar a reconciliação em fábricas de cimento não implica em aumento de custo, demandando somente maior controle e planejamento das atividades, voltando-as para gerar e guardar as informações necessárias.

Os resultados da reconciliação permitem avaliar de forma proativa a cadeia de valor mineral, detectando problemas e agindo sobre eles, fazendo com que a reconciliação do próximo ciclo tenda a ser melhor. A prática da reconciliação de lavra no cimento será tão mais interessante quanto mais forem restritas as reservas locais, como por exemplo, nos dois estudos de caso que foram realizados neste trabalho.

À medida em que as reservas minerais de mais alto teor para produção de cimento forem exauridas, e o que restar forem materiais de teores restritos e com presença de contaminantes, torna-se mais e mais importante que as empresas deste setor adotem práticas como a reconciliação para fazer a melhoria contínua de seus modelos de reservas.

8.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar a implementação das melhorias sugeridas nos estudos de caso em Cajati e Candiota, e avaliar novamente a reconciliação no período seguinte;

- Estudar e propor uma periodicidade adequada para fazer a análise química das matérias-primas corretivas usadas nas fábricas de cimento para correção na moagem de cru (minério de ferro, carepa, areia, bauxita e outras);

- Desenvolver e testar um sistema que automatize a coleta de informações e a obtenção dos resultados da reconciliação.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANCÃO, L.O. **Aspectos práticos acerca da fabricação do cimento**. Blog do Cimento, Maceió, 2020. Disponível em: <https://blogdocumento.com.br/2020/07/17/fabricacao-do-cimento/>. Acessado em 28 set. 2020.

BOND, J.E.; WINTZ, S.; PETERS, C. **Blending and control systems technologies for cement raw materials revisited - PGNA analyzer application review - An example from Lafarge's Davenport plant in Buffalo, Iowa USA**. Proceedings of 2011 IEEE- IAS/PCA 53rd Cement Industry Technical Conference, St. Louis-MO, EUA, mai. 2011, 18p. Disponível em: [10.1109/CITCON.2011.5934557](https://doi.org/10.1109/CITCON.2011.5934557). Acessado em 02 out. 2020.

CÂMARA, T.R. **Sistematização do cálculo de diluição e perdas operacionais para reconciliação de teores e massas em lavra a céu aberto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/86413>. Acessado em 17 set. 2020.

CÂMARA, T.R.; PERONI, R.L. Quantifying dilution caused by execution efficiency. **REM: International Engineering Journal**, Ouro Preto, vol. 69, no. 4, p. 487-490, out. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0370-44672014690006>. Acessado em 17 set. 2020.

CHIEREGATI, A.C.; PIGNATARI, L.E.C.; PITARD, F.F.; DELBONI JR, H. **Proactive reconciliation as a tool for integrating mining and milling operations**. International Journal of Mining Science and Technology, vol. 29, no. 2, p. 239-244, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.01.001>. Acessado em 02 set. 2020.

CRAWFORD, G.D. **Dilution and Ore Recovery**. Pincock Perspectives, Ed. 60, 2004, 4p. Disponível em: <https://pdfslide.us/documents/mining-dilution.html#>. Acessado em 15 jan. 2020.

EBRAHIMI, A. **The importance of dilution factor for open pit mining projects.** (versão modificada pelo autor a partir de artigo de congresso), 12 p, 2013. Disponível em: https://www.kz.srk.com/files/file/SRK_Dilution_April26_2013_Anoush_Ebrahimi.pdf.

Acessado em 02 out. 2020.

EL HAJJ, T.M.; CHIEREGATI, A.C.; DELBONI JR, H.; PIGNATARI, L.E.C. **Illusory reconciliation: the importance of sample representativeness.** REM – Revista Escola de Minas, vol. 66, no. 3, p. 383-389, jul-set 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672013000300017>. Acessado em 08 out. 2020.

ELLEFMO, S.L.; AASLY, K.; LANG, A.; VEZHAPPARAMBU, V.S.; SILVA, C.A.M. **Geometallurgical concepts used in industrial mineral production.** Economic Geology, vol. 114, no. 8, p. 1543-1554, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5382/econgeo.4685>. Acessado em 01 out. 2020.

FELLAOU, S.; BOUNAHMIDI, T. **Mass balance reconciliation for bilinear systems: A case study of a raw mill separator in a typical Moroccan cement plant.** Engineering, Technology & Applied Science Research, v.6, n.3, p.1006-1009, jun. 2016. Disponível em: [10.5281/zenodo.55385](https://zenodo.org/record/55385). Acessado em 01 set. 2020.

FOSTER, S.; BOND, J. **The history and future of nuclear elemental analysers for product optimization in the cement industry.** Record of 2006 IEEE Cement Industry Technical Conference, Phoenix-AZ, EUA, p. 237-254, abr. 2006. Disponível em: [10.1109/CITCON.2006.1635722](https://doi.org/10.1109/CITCON.2006.1635722). Acessado em 05 out. 2020.

FOUET, T.; RISKE, R.; MORLEY, C.; COOK, A.; CONTI, D.; CENTOFANTI, J. **Standardizing the reconciliation factors required in governance reporting.** Proceedings of the 7th International Mining Geology Conference, Perth-WA, Australia, p. 127-139, ago. 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/263620617_Standardising_the_Reconciliation_Factors_Required_in_Governance_Reporting. Acessado em 25 jul. 2021.

GUERRA, B. T. Análise por ativação neutrônica. *In*: GUERRA, B.T. **Estudo da viabilidade de aplicação do método prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) no reator Triga IPR-R1**. Tese (Doutorado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, São Paulo, 2016, p. 13-27. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUBD-AP9MUS>. Acessado em 23 out. 2021.

HARGREAVES, R.; MORLEY, C. **Mining reconciliation – an overview of data collection points and data analysis**. Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practices – 2nd edition, p. 739-748, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/263770059_Mining_Reconciliation_-_an_overview_of_data_collection_points_and_data_analysis. Acessado em 12 set. 2020.

HUNTZINGER, D.N.; EATMON, T.D. **A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies**. Journal of Cleaner Production, vol. 17, no. 7, p. 668-675, mai. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>. Acessado em 15 out. 2020.

LABAHN, O.; KOHLHAAS, B. **Cement engineers' handbook**. 4th edition. Wiesbaden and Berlin, Bauverlag, 1983, p. 103-113. ISBN 3-7625-0975-1.

MACFARLANE, A.S. **Reconciliation along the mining value chain**. The Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 115, p. 679-685, ago. 2015. Disponível em: [10.17159/2411-9717/2015/V115N8A3](https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/V115N8A3). Acessado em 08 out. 2020.

MEDEIROS, P.Y.; LEVY, D.C. **Análise empírica dos fatores que possibilitaram entradas na indústria de cimento brasileira**. RAM – Revista de Administração Mackenzie, São Paulo, vol. 16, no. 6, p. 220-251, nov. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-69712015/administracao.v16n6p220-251>. Acessado em 14 set. 2020.

MEZZA, S.; JEMAI, M.B.M.; SALAH, I.B.; TISS, H. **Geochemical suitability of Lower Eocene extra-siliceous limestone for cement making (Bizerte deposit – extreme north of Tunisia)**. Environmental Earth Sciences, vol. 79, no. 10, art. 219, mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08930-7>. Acessado em 03 set. 2020.

MORLEY, C. **Guide to creating a mine site reconciliation code of practice**. Mineral Resource and Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice – 2nd edition, p. 755-764. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/263770315_Guide_to_creating_a_mine_site_reconciliation_code_of_practice. Acessado em 12 set. 2020.

NADER, A.S. Características da indústria mineral e cadeia de valor. *In*: NADER, A.S. **Monitoramento de taludes via radar SSR como indicador chave de desempenho geotécnico integrado às atividades primárias da cadeia de valor mineral**. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013, p. 35-39. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-04032013-153034/pt-br.php>. Acessado em 12 jul. 2021.

NADER, A.S.; DE TOMI, G.; PASSOS, A.O. **Key performance indicators and the mineral value chain integration**. REM – Revista Escola de Minas, vol. 65, no. 4, p. 537-542, out-dez 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672012000400015>. Acessado em 25 jul. 2021.

QASIM, T.Q.; AL-ETAIWI, T.; AL-KHASHEB, M. **Analysis and developments of PGNAA installation at Al-Rashadiya Lafarge cement plant in Jordan**. Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Kuala Lumpur, Malaysia, jan. 2011. Disponível em: <http://ieom.org/ieom2011/pdfs/IEOM186.pdf>. Acessado em 08 out. 2020.

SACHS, P.F.T. A Cadeia de valor. *In*: SACHS, P.F.T. **Cadeia de valor mineral e tecnologia da informação: alinhamento estratégico como gerador de eficácia em empresas de mineração**. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009, p. 65-100. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-11082010-154822/publico/Tese_Paulo_Fernando_Tardelli_Sachs.pdf. Acessado em 12 set. 2020.

SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO, H. **Sustainable cement production – present and future**. *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 7, p. 642-650, jul. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>. Acessado em 12 set. 2020.

SHIMADA, H. O cimento Portland. *In*: SHIMADA, H. **Impacto da prospecção geológica na otimização do processo de produção de cimento Portland na fábrica de cimento Votoran, Votorantim, SP**. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999, p. 9-26. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-01102014-133707/pt-br.php>. Acessado em 11 abr. 2022.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, **Processo Produtivo do Cimento**, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/processo-de-producao.php>. Acessado em 22 dez. 2019.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, **Indústria Brasileira do Cimento, Base para a Construção do Desenvolvimento**. Ata do Encontro da Indústria para Sustentabilidade, 2012. 61p. Disponível em: http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2013/09/23/4970/20131002162355200901e.pdf. Acessado em 12 out. 2020.

THERMO FISHER SCIENTIFIC, **PGNAA and PFTNA technology for non-scientists.**

E-book, 2019, 26p. Disponível em:

<https://www.thermofisher.com/br/en/home/industrial/cement-coal-minerals/cement-coal-minerals-learning-center/cement-analysis-production-information/pgnaa-pftna-technology.html>. Acessado em 17 ago. 2021.

VIANNA, G.V.A. Processo de produção de cimento – conceitos básicos. *In*: VIANNA, G.V.A. **Impactos na análise técnica de projetos de lavra de calcário para fabricação de cimento**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018, p. 33-39. Disponível em:

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-27022018-090219/pt-br.php>. Acessado em 15 ago. 2021.

ANEXO I

Relatório de análise da amostra de areia de Cajati



RELATÓRIO TÉCNICO

P21012 - Projeto AQ Pedro Hespanha

Areia

Av. Presidente Antônio Carlos, 6627
CPDEE Sala 216 - Campus UFMG
Belo Horizonte - MG
CEP 31.270-901

+55 31 3409-1033
minasjr@minasjr.com.br
www.minasjr.com.br

RELATÓRIO TÉCNICO

PROJETO P21012 – Projeto AQ Pedro Hespanha

Cliente: Pedro Almeida Hespanha

Contato: Tel: (31) 97152 - 8598

E-mail: phespanha@hotmail.com

Equipe Técnica

Gerente do Projeto: Raquel Gomes Xavier

Diretor de Projeto: Raquel Gomes Xavier

Assessores de Projeto: Gabriela Oliveira Costa

Nathan Carlos Soares Martins

ATENÇÃO

O presente documento é propriedade intelectual da Minas Júnior Consultoria Mineral, sendo expressamente proibida qualquer forma de exposição das informações aqui apresentadas e/ou sua reprodução ou cópia, por qualquer meio ou instrumento, no todo ou em parte, sem a prévia e formal autorização da empresa avaliada e da Minas Júnior.

Belo Horizonte, 07 de fevereiro de 2022.

MINAS JÚNIOR CONSULTORIA MINERAL

A Minas Jr Consultoria Mineral é uma associação civil sem fins econômicos que busca aprimorar a formação acadêmica, cultural e social dos alunos dos cursos de Geologia e Engenharia de Minas da UFMG, desenvolvendo o espírito empreendedor dos futuros profissionais.

Atuando há mais de 10 anos no mercado, nossos serviços consistem na realização de estudos e elaboração de diagnósticos, pareceres, análises, relatórios, cursos e projetos sobre assuntos específicos da nossa área de atuação. Através destes estudos é possível assessorar a implantação de soluções indicadas para os problemas diagnosticados.

Buscamos sempre promover a integração social e profissional dos nossos membros segundo os princípios do Aprendizado, União, Coragem, Pessoas e Adaptabilidade. A valorização dos alunos e professores do curso de Geologia e Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais no mercado de trabalho e no âmbito acadêmico é nossa maior motivação.

Resumo

Este relatório teve como objetivo caracterizar uma amostra de Areia de forma quantitativa. As metodologias utilizadas para a identificação do material foram a análises por DRX, FRX e lâmina petrográfica.

Por meio da descrição da lâmina petrográfica, verificou-se que a amostra é composta, predominantemente, por Quartzo, seguido de Feldspato e, em menor quantidade, Biotita e minerais opacos. Além disso, a amostra possui granulometria variada.

A seguir encontram-se as tabelas com os resultados obtidos das análises por DRX (Tabela 1) e FRX (Tabela 2), respectivamente:

Tabela 1 - Caracterização e abundância das fases cristalinas identificadas (DRX). Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN

| Fases cristalinas identificadas | Grau de abundância | Fase Cristalina em % |
|---------------------------------|--------------------|----------------------|
| Quartzo | Abundante | 99,1 |
| Feldspato (microclina) | Baixo | 0,9 |

Tabela 2 - Substâncias e teores percentuais (FRX). Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda

| Óxidos | SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | FeO ₃ (%) |
|--------|----------------------|------------------------------------|----------------------|
| 1º | 96,8 | 1,07 | 1,32 |
| 2º | 97,3 | 1,07 | 1,31 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| Resumo | 4 |
| LISTA DE FIGURAS | 6 |
| LISTA DE TABELAS | 6 |
| 1. Introdução..... | 7 |
| 2. Objetivos | 9 |
| 3. Metodologia..... | 9 |
| 3.1. Fluxograma | 9 |
| 3.2. Recebimento da amostra | 10 |
| 3.3. Cominuição e Amostragem | 11 |
| 3.4. Análise Química por Difractometria de Raios X (DRX) | 13 |
| 3.5. Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX) | 14 |
| 3.6. Análise por descrição petrográfica de Lâmina | 15 |
| 4. Resultados..... | 16 |
| 4.1. Resultados da análise por Difractometria de Raios X (DRX) | 16 |
| 4.2. Resultados da análise por Fluorescência de Raios X (FRX) | 19 |
| 4.3. Resultados da análise por Lâmina Petrográfica | 20 |
| 5. Conclusão..... | 22 |
| 6. Estudos complementares | 23 |
| 7. Referências Bibliográficas | 23 |
| 8. Anexos..... | 23 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fluxograma dos processos desenvolvidos no Projeto | 10 |
| Figura 2 - Moinho de panelas do LTDM..... | 11 |
| Figura 3 - Painelas de pulverização..... | 12 |
| Figura 4 - Divisor de Rifles do Tipo Jones | 13 |
| Figura 5 - Microscópio Petrográfico..... | 16 |
| Figura 6 - Difratoograma de Raios-X da amostra de Areia Subauma. | 17 |
| Figura 7 - Refinamento para semiquantificação utilizando metodologia Rietveld para a amostra Areia Subauma. | 18 |
| Figura 8 - Imagem obtida por meio do microscópio da lâmina petrográfica da amostra de areia..... | 21 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Caracterização e abundância das fases cristalinas identificadas (DRX). Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN | 4 |
| Tabela 2 - Substâncias e teores percentuais (FRX). Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda..... | 4 |
| Tabela 3 - Fases Cristalinas Identificadas da amostra de Areia. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN | 17 |
| Tabela 4 - Identificação, grau de abundância e abundância percentual das fases cristalinas identificadas. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN | 18 |
| Tabela 5 - Valores encontrados em maior concentração na análise por FRX da amostra de areia. Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda..... | 19 |
| Tabela 6 - Valores encontrado em menor concentração na análise química por FRX da Amostra de Areia. Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda | 20 |

1. Introdução

Areia é um material com granulometria típica entre 0,5 e 0,1 mm resultante de desagregação natural ou cominuição de rochas, mais ou menos cimentadas. Os termos areia industriais, areia de quartzo, areia quartzosa ou mesmo areia de sílica (sílica sand) são atribuídos, geralmente, a areias que apresentam elevado teor de sílica, SiO_2 , na forma de quartzo, e são materiais muito importantes em vários segmentos industriais: na fabricação de vidros e na indústria de fundição, como suas principais aplicações, bem como na indústria cerâmica, na fabricação de refratários e de cimento. É também bastante utilizada na indústria química, fabricação de ácidos e de fertilizantes e também em aplicações não industriais como horticultura e locais de lazer.

A busca pelo conhecimento da composição de uma rocha amplia as possibilidades de sua aplicação nas mais diferentes áreas, de forma a facilitar o desenvolvimento de estratégias que garantam que sua completa prestabilidade.

As análises petrográfica (lâmina) e química (DRX e FRX) desenvolvidas neste trabalho buscam identificar características do material solicitado (areia). Essa descrição é fundamental no âmbito de utilização de um produto, uma vez que ela irá direcionar o cliente quanto às possibilidades de aproveitamento máximo de seu material. O principal método desenvolvido neste trabalho é a análise química, uma vez que ela fornece informações precisas a respeito de fases minerais e composição química, bem como suas proporções no material analisado.

PROPOSTA DE VALOR

No projeto buscamos fazer o levantamento de dados para a amostra de areia entregue, com a finalidade de compreender as características do material que o cliente possui. Com base no trabalho desenvolvido, foi possível gerar valor nos seguintes pilares:

Assertividade



O conhecimento do seu produto, por meio do método de análise química (DRX e FRX), bem como a análise microscópica, irá informar características essenciais a fim de estudar a melhor forma de aproveitar o material.

2. Objetivos

O presente relatório busca avaliar uma amostra de Areia e identificar as principais características, tais como a composição mineralógica, composição química e as respectivas concentrações dos elementos, bem como suas características microscópicas por meio da análise de lâmina petrográfica em um microscópio.

Tais procedimentos tem por finalidade verificar a aplicabilidade do material fornecido pelo cliente em diferentes setores industriais.

3. Metodologia

A fim de melhor detalhar a série de métodos e técnicas que foram utilizadas ao longo da execução do projeto, dividiu-se cada etapa a fim de que se tenha uma melhor compreensão.

3.1. Fluxograma

A Figura 1 apresenta o fluxograma que esquematiza todas as etapas dos procedimentos realizados com a amostra analisada no projeto: recebimento da amostra, secagem, amostragem, cominuição, análise por DRX, análise por FRX, elaboração e avaliação da lâmina petrográfica, até a fase final de elaboração do relatório técnico.

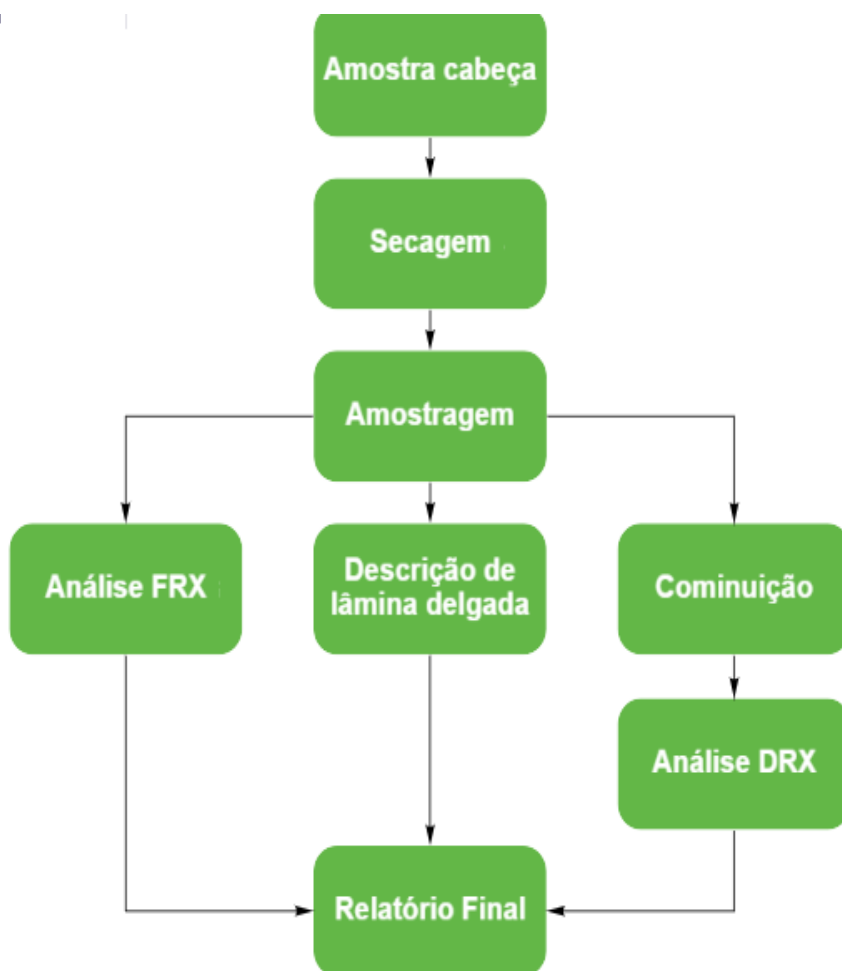


Figura 1 - Fluxograma dos processos desenvolvidos no Projeto

3.2. Recebimento da amostra

A amostra de Areia Subaúma foi recebida por um membro da Minas Jr e, posteriormente, encaminhada para realização do processo de cominuição. Após essa etapa, o material foi enviado para os laboratórios terceirizados SGS GEOSOL LTDA, para o Laboratório de Raio X do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) da UFMF e para o Laboratório Petrografia BR, onde foram realizadas as análises por FRX, DRX e confecção da Lâmina Petrográfica, respectivamente.

3.3. Cominuição e Amostragem

Após o recebimento das amostras, estas foram submetidas à cominuição, que consiste na fragmentação do material a fim de que ele atinja a granulometria adequada para a realização das análises via DRX e FRX.

Para a análise via DRX, membros da Minas Jr utilizaram o moinho de panelas disponível no Laboratório de Tratamento de Minérios (LTDM) do Departamento de Engenharia de Minas (DEMN) da UFMG para a cominuição do material, por um tempo igual a trinta (30) segundos, visando a pulverização da amostra de areia e, em seguida, realizou-se o peneiramento a fim de garantir a granulometria adequada.

As Figuras 2 e 3 representam os equipamentos utilizados para a realização dessa etapa.



Figura 2 - Moinho de panelas do LTDM.



Figura 3 - Painéis de pulverização

Em seguida, já com a granulometria correta, o material foi amostrado de modo que as novas amostras mantivessem as características do todo o material foi homogeneizado e amostrado, utilizando-se a técnica de quarteamento por divisor de rifles, que consiste em dividir o material em amostras menores de forma que elas sejam representativas do todo. Da amostra inicial, foram separadas quatro amostras para a realização dos testes seguintes (DRX e Lâmina Petrográfica) e para controle de qualidade.

A Figura 4 ilustra o equipamento utilizado para realizar a etapa de amostragem:



Figura 4 - Divisor de Rifles do Tipo Jones

Em relação ao FRX, os processos de cominuição e amostragem foram realizados pela empresa SGS GEOSOL LTDA, sendo tal etapa de inteira responsabilidade da terceirizada.

3.4. Análise Química por Difractometria de Raios X (DRX)

A Difractometria de Raios X é um método semiquantitativo que consiste em bombardear uma amostra com um feixe de Raios X, considerando que cada mineral possui uma estrutura cristalina específica e irá responder de forma particular.

Os Raios X ao entrarem em contato com o material são difratados em ângulos e em intensidades específicas, que são os indicadores diretos de qual estrutura cristalina está sendo bombardeada. Os picos nos difratogramas são analisados com base em dados de difratometria padronizados e, dessa forma, os minerais presentes na amostra são identificados. Cada estrutura cristalina possui

um padrão característico, e para interpretar os resultados obtidos, utiliza-se um banco de dados previamente determinado onde constam difratogramas para diferentes minerais.

O procedimento foi realizado por meio de um Difratorômetro da PANalytical, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ e cristal monocromador de grafita. O método de análise se baseia na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados do ICDD – International Centre for Diffraction Data.

Tais testes foram realizados pelo Laboratório de Raios X do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) e, portanto, a metodologia empregada é de responsabilidade do laboratório terceirizado. O laudo obtido após o ensaio encontra-se no Anexo desse Relatório.

3.5. Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

A técnica de análise por Fluorescência de Raios X (FRX) é um método quantitativo consiste em irradiar um material com um feixe de Raios X. As partículas são absorvidas pela amostra e excitam os elétrons deslocando-os entre as camadas eletrônicas dos elementos químicos, de forma que durante o processo ocorre a emissão de luz. O aparelho utilizado identifica essa emissão luminosa, que é particular para cada elemento químico, e consegue atestar os elementos que estão presentes na amostra em teor e proporção.

Os testes de FRX foram realizados pelo Laboratório da SGS GEOSOL Laboratórios Ltda e, portanto, a metodologia utilizada é de responsabilidade do

laboratório terceirizado. O laudo obtido após o ensaio encontra-se no Anexo desse Relatório.

3.6. Análise por descrição petrográfica de Lâmina

Este teste tem como objetivo a identificação das fases minerais presentes na amostra analisada a partir da descrição da lâmina delgada. É possível obter informações como granulometria, textura e estrutura, modo de ocorrência, minerais secundários e natureza química dos minerais, além da composição mineralógica dos agregados. Para isso, é necessário preparar uma lâmina de seção delgada, para que esta seja analisada em um microscópio petrográfico.

A confecção da lâmina delgada foi realizada pela PetrografiaBr, especializada na preparação de lâminas delgadas de rocha. A metodologia utilizada é de responsabilidade da empresa terceirizada.

As lâminas são descritas com o auxílio do microscópio petrográfico que inclui objetivas com capacidade de aumento da imagem em 2,5x; 5x; 10x; 40x e 100x. Tal procedimento foi realizado por membros da Minas Jr, utilizando-se equipamentos disponíveis no Laboratório do Instituto de Geociências (IGC) da UFMG. Na Figura 5 encontra-se a representação de um microscópio petrográfico utilizado para análise da lâmina.



Figura 5 - Microscópio Petrográfico

A descrição petrográfica inclui, principalmente, a identificação das fases minerais, feita com base na análise e correlação das características intrínsecas a cada mineral, assim como as fases presentes.

4. Resultados

4.1. Resultados da análise por Difractometria de Raios X (DRX)

A análise qualitativa por Difração de Raios-X indicou a presença das seguintes fases cristalinas: quartzo e feldspato (microclina). Os resultados da análise semiquantitativa de Difractometria de Raios X estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Fases Cristalinas Identificadas da amostra de Areia. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN

| Fases cristalinas identificadas | |
|---------------------------------|--|
| Quartzo | |
| Feldspato | |

A Figura 6 corresponde ao difratograma da amostra obtido pelo DRX:

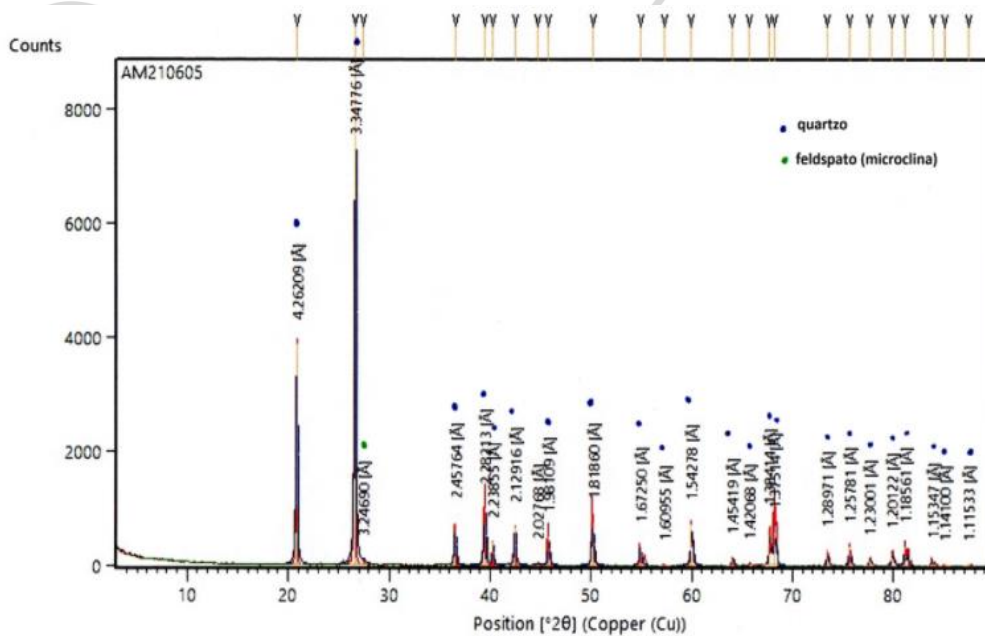


Figura 6 - Difratograma de Raios-X da amostra de Areia Subauma. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN

Com relação à proporção de cada fase cristalina presente na amostra de areia, foi utilizado o método semiquantitativo Rietfeld. Os valores obtidos estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Identificação, grau de abundância e abundância percentual das fases cristalinas identificadas. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN

| Fases cristalinas identificadas | Grau de abundância | Fase Cristalina em % |
|---------------------------------|--------------------|----------------------|
| Quartzo | Abundante | 99,1 |
| Feldspato (microclina) | Baixo | 0,9 |

Tal resultado também pode ser verificado na Figura 7.

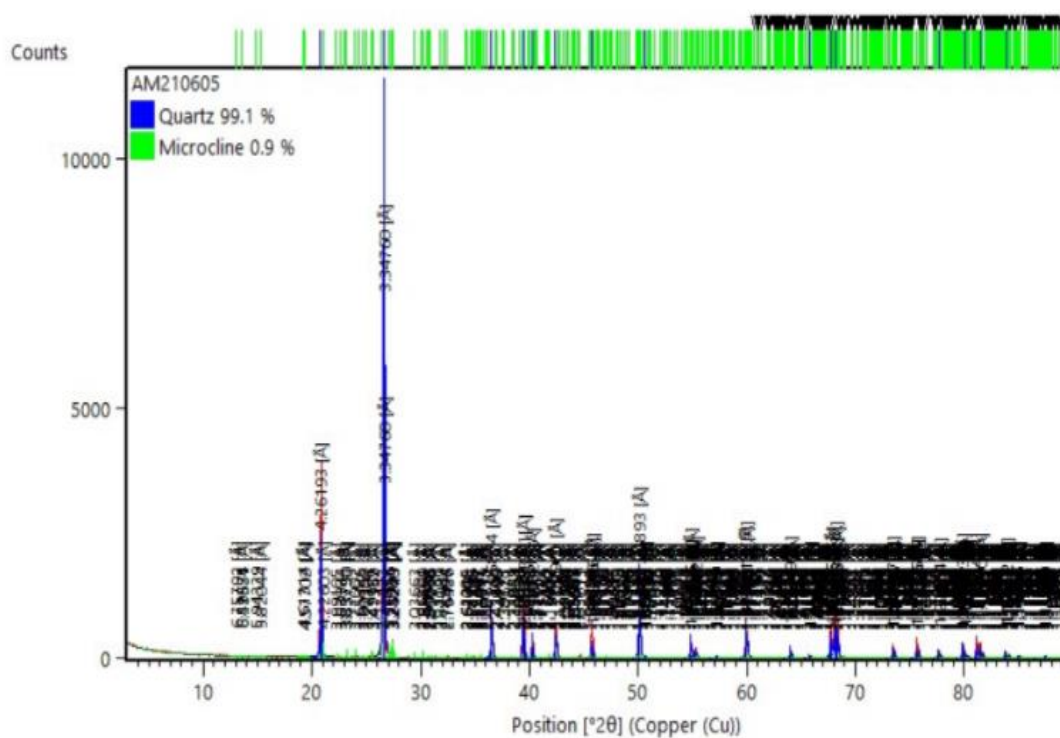


Figura 7 - Refinamento para semiquantificação utilizando metodologia Rietveld para a amostra Areia Subauma. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN

4.2. Resultados da análise por Fluorescência de Raios X (FRX)

Na Tabela 5, são apresentados os principais constituintes da areia em estudo, obtidos via análise química por fluorescência de Raio-X (FRX).

Tabela 5 - Valores encontrados em maior concentração na análise por FRX da amostra de areia. Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda

| Óxidos | SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | FeO ₃ (%) |
|--------|----------------------|------------------------------------|----------------------|
| 1º | 96,8 | 1,07 | 1,32 |
| 2º | 97,3 | 1,07 | 1,31 |

Nota-se que a amostra é constituída essencialmente por Sílica (SiO₂) correspondendo a 96,8% da composição da amostra, apontando que se trata de um material rico em quartzo. Observou-se também a presença de óxido de Alumínio (Al₂O₃) e de Óxido de Ferro (Fe₂O₃) que representam, nesta ordem, 1,07% e 1,32% da composição da areia.

Outros elementos como o Óxido de Sódio (Na₂O) e o Óxido de Titânio (TiO₂) apresentam-se em porcentagens menores, sendo elas respectivamente 0,1% e 0,25%.

A Tabela 6 apresenta os componentes da amostra cuja proporção é de menor relevância. Ademais, o teste foi realizado em duplicata a fim de atribuir mais confiabilidade aos resultados.

Tabela 6 - Valores encontrado em menor concentração na análise química por FRX da Amostra de Areia. Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda

| Óxidos | CaO (%) | MgO (%) | TiO ₂ (%) | P ₂ O ₅ (%) | Na ₂ O (%) | K ₂ O (%) | MnO(%) | LOI (%) |
|--------|---------|---------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|--------|---------|
| 1º | 0,04 | <0,1 | 0,25 | 0,16 | <0,1 | 0,42 | 0,02 | 0,2 |
| 2º | 0,03 | <0,1 | 0,24 | 0,17 | <0,1 | 0,42 | - | 0,17 |

No processo de análise por FRX é obtido informações de perda ao fogo (LOI) da amostra. Essa etapa foi realizada até a temperatura de 1000 °C e gerou como resultado um valor de 0,2 e 0,17% da massa. Esse resultado representa um consumo na massa da amostra, e corresponde a um procedimento padrão para técnicas de FRX.

4.3. Resultados da análise por Lâmina Petrográfica

A lâmina da amostra “Areia Subauma” é constituída em maioria por grãos de quartzo, ocorrendo também, em menor proporção, elementos como a biotita, feldspato, minerais opacos e fragmentos de rocha.

Observou-se que a mineralogia está distribuída em: quartzo, feldspato, biotita e minerais opacos. A amostra é composta, predominantemente, por Quartzo, seguido de Feldspato e, em menor quantidade, Biotita e minerais opacos.

A biotita pode ser visualizada na Figura 8, apresentando coloração laranja com reflexos verdes. Na análise via FRX foi detectado, aproximadamente, 1% de óxido de ferro que explica a identificação da biotita na lâmina, visto que sua fórmula química é $K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(FOH)_2$.

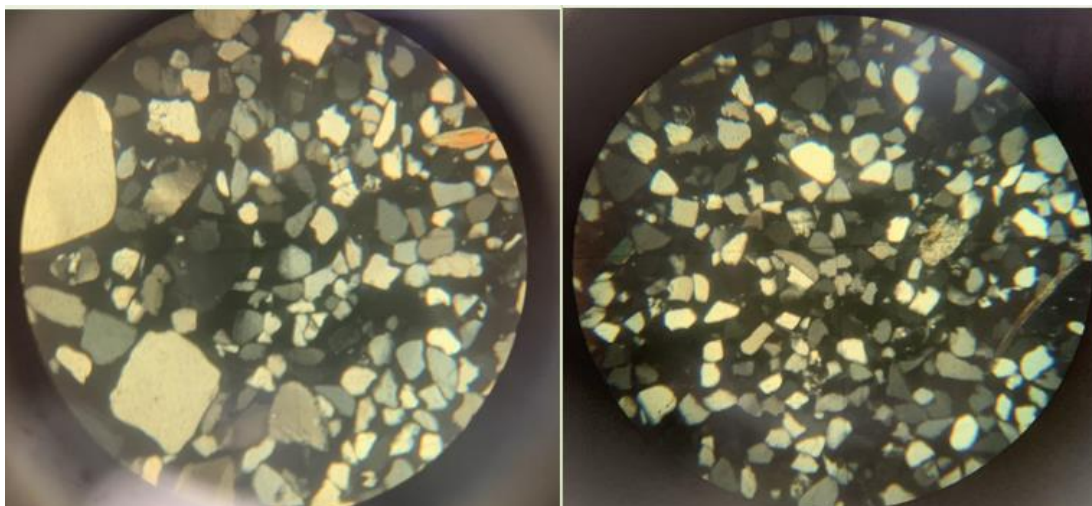


Figura 8 - Imagem obtida por meio do microscópio da lâmina petrográfica da amostra de areia.

Com relação ao feldspato, na amostra encontra-se a Microclina que faz parte do grupo dos feldspatos alcalinos, cuja composição é $K(AlSi_3O_8)$. Tanto a biotita quanto a microclina apresentam potássio em sua composição, logo, pode-se inferir que estes minerais dividem a quantidade de potássio presente na amostra que é de 0,42%.

Visualmente, os grãos analisados possuem granulometria variada. Ademais, no que tange a seleção dos sedimentos estes, são moderadamente selecionados, havendo uma uniformidade considerável, mas também a presença frequente de grãos que fogem do padrão dos demais.

A morfologia dos grãos é representada da seguinte forma: os grãos Quartzo predominam da forma sub-angulosa a sub-arredondado; os grãos de Feldspato do tipo Microclina não apresentam fratura e são angulosos; a Biotita apresenta-se predominantemente com feição angulosa.

5. Conclusão

O objetivo do estudo da amostra de Areia Subauma foi identificar suas principais características e avaliar possíveis aplicabilidades.

A análise de DRX retornou a seguinte composição mineralógica para a amostra de areia: Quartzo (99,1%) e Feldspato (Microclina) (0,9%).

A análise por FRX permitiu a identificação detalhada das substâncias que compõem o material, sendo elas apresentadas em ordem decrescente: SiO_2 (96,8%), Fe_2O_3 (1,32%), Al_2O_3 (1,07%), K_2O (0,42%), TiO_2 (0,25%), P_2O_5 (0,16%) e CaO (0,04%).

Ademais, constatou-se a presença de biotita, minerais opacos e fragmentos de rocha por meio da descrição petrográfica, além da identificação das fases minerais citadas anteriormente e a visualização da morfologia e do nível de seleção dos grãos.

Dessa forma, a realização da Análise Química e Microscópica da amostra de areia permitiu obter os principais aspectos do material. A fim de determinar se este é aplicável em setores como o da construção civil é necessário realizar análises aprofundadas.

6. Estudos complementares

A areia possui diversas aplicabilidades, principalmente dentro da construção civil, na qual pode ser utilizada como agregado miúdo em tubulações, composição de concreto e asfalto, assentamento de bloquetes.

As análises apresentadas neste relatório contribuem para a identificação do material, mas segundo as Normas Técnicas Brasileira (NBR) que regem o setor, não são suficientes para caracterizar o material como próprio ou não para a utilização no setor da construção civil.

Dessa forma, caso seja de interesse, a Minas Jr Consultoria Mineral oferece o serviço de caracterização tecnológica que abrange os ensaios técnicos requisitados.

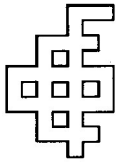
7. Referências Bibliográficas

Relatório de Análise por Fluorescência de Raios X (FRX) -SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. Belo Horizonte, janeiro de 2022.

Relatório de Análise por Difração de Raios X-Characterização das Fases Cristalinas- Laboratório de Raios X do Departamento de Engenharia de Minas-UFMG. Fundação Cristiano Ottoni. Belo Horizonte, janeiro de 2022.

Catálogo de Minerais do Laboratório de Mineralogia- Departamento de Geologia- UFC. Belo Horizonte, janeiro de 2022.

8. Anexos



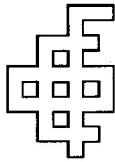
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Departamento de Engenharia de Minas
FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI



RELATÓRIO TÉCNICO 032/2021

Caracterização das fases cristalinas

Dezembro de 2021



Relatório: 032/2021

Material: Amostra mineral

Interessado: Minas Jr.

1. INTRODUÇÃO

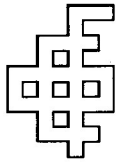
O presente relatório apresenta os resultados obtidos na caracterização das fases cristalinas, através da técnica de difratometria de raios X, de 01 amostra.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A amostra foi submetida à preparação e à análise semiquantitativa por Difratometria de Raios X (DRX), realizada em um Difratômetro da PANalytical, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ e cristal monocromador de grafita. O método de análise se baseia na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 do ICDD – International Centre for Diffraction Data.

Os padrões do banco de dados PDF-2 do ICDD utilizados para a identificação das fases cristalinas foram:

| Fases Identificadas | Fórmula | Código |
|------------------------|----------------------------|---------|
| Quartzo | $\alpha\text{-SiO}_2$ | 88-2302 |
| Feldspato (microclina) | KAISi_3O_8 | 84-0709 |



3. RESULTADOS

3.1. Difratometria de Raios X

Os resultados da análise semiquantitativa por Difratometria de Raios X da amostra são apresentados na Tabela I. Os difratogramas indexados da amostra são mostrados nas Figuras 1 e 2.

Tabela I: Identificação de fases cristalinas por difração de raios X

| Amostra | Fases Cristalinas Identificadas |
|---------------|---------------------------------|
| Areia Subauma | Quartzo, Feldspato(Microclina) |

Amostra Areia Subauma

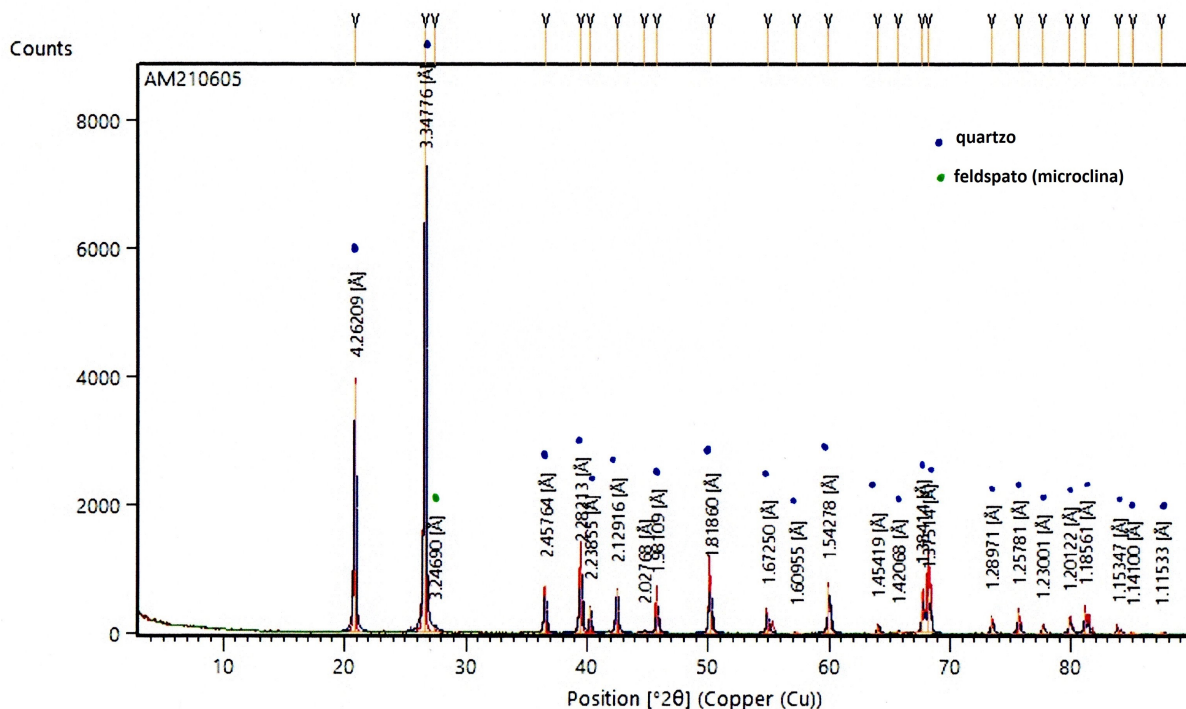
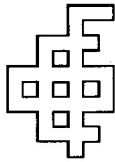


Figura 1: Difrátograma de raios X da amostra Areia Subauma.



Semiquantificação de fases pelo método Rietveld:

Difração de raios-X – DRX – fases cristalinas presentes:

- | | % |
|---------------------------------|------|
| • Quartzo (abundante) | 99,1 |
| • Feldspato(microclina) (baixo) | 0,9 |

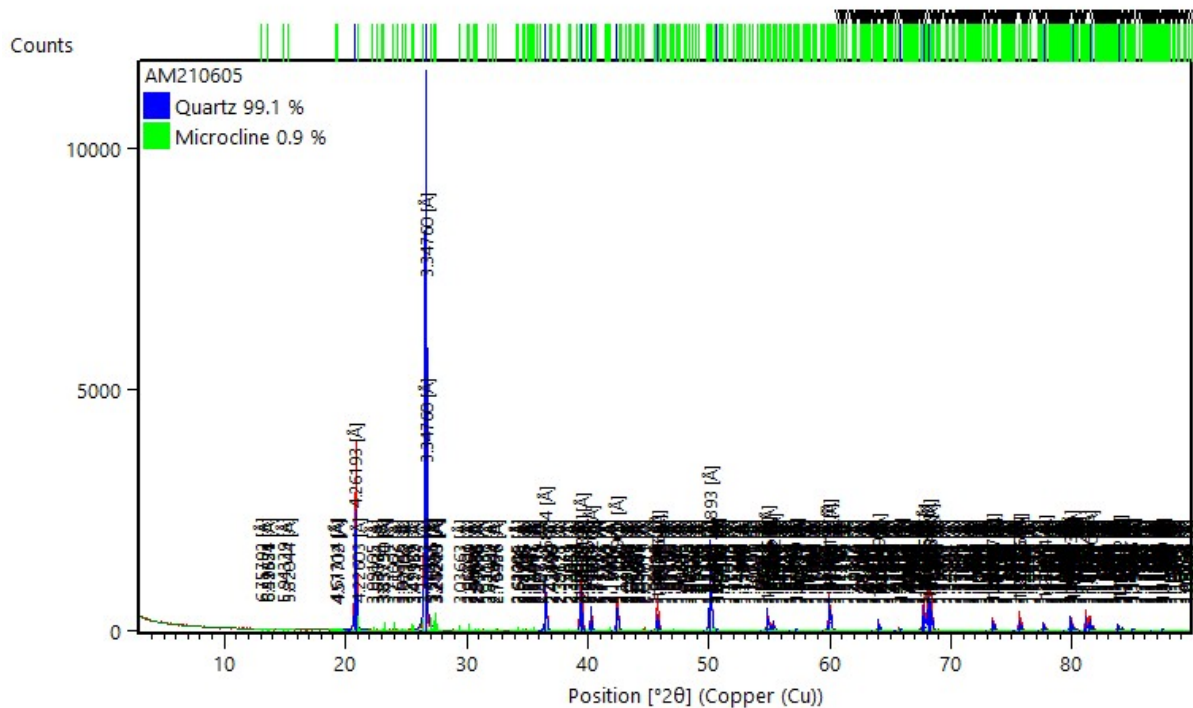


Figura 2: Refinamento para semiquantificação utilizando metodologia Rietveld para a amostra Areia Subauma.

Belo Horizonte, 28 de dezembro de 2021.

Andréia Bicalho Henriques

Andréia Bicalho Henriques
Professora Adjunta
Doutora em Tecnologia Mineral



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES
GQ2110222

INFORMAÇÕES DO CLIENTE

NOME
MINAS JUNIOR CONSULTORIA MINERAL

ATTN.
Gabriel Araujo

ENDEREÇO:
AV PRESIDENTE ANTONIO CARLOS 6627 6627 EDIF: ESCOL ENG PRED INOVA; PAMPULHA 31270901 MG BELO HORIZONTE

CPF/CNPJ
07.680.897/0001-90

REFERÊNCIA DO LOTE DE AMOSTRAS

REF. CLIENTE
Pedido 17/12/2021

QTE. AMOSTRAS
1

RECEBIDO
17/12/2021

PRODUTO
AREIA

COMPLETADO
19/01/2022

PROJETO
Default

EMITIDO
20/01/2022

REFERÊNCIA ANALÍTICA

PREP

DRY105: Secagem de amostras à 105°C

PREPQC: Controle de Qualidade - Preparação Física

PRP102_E: Secagem, britagem de 75% a 3 mm, homogeneização, quarteramento em Jones, pulverização de 250 a 300 g de amostra em moinho de aço 95% a 150#

XRA

PHY01E: Determinação de Perda ao Fogo (LOI) por Gravimetria - 1000°C

XRF79C: Fusão com tetraborato de Lítio - XRF

LEGENDA: SIGLAS

L.D.= Limite de Detecção

BLK = Branco

REP = Replicata

DUP = Duplicata

L.N.R. = Listado e não Recebido

I.S. = Amostra Insuficiente

N.A. = Não Analisado

STD = Padrão

I.N.F. = Não reportado devido a interferentes

OVR = Não Analisado devido ao alto teor


Marcos Filipe Gonçalves Silva
CRQ II 02202046
Responsável Técnico

Os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespasiano - MG - Brasil - CEP: 33.200-000

Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br

Certificados ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015 (ABS 32982 e ABS 39911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.



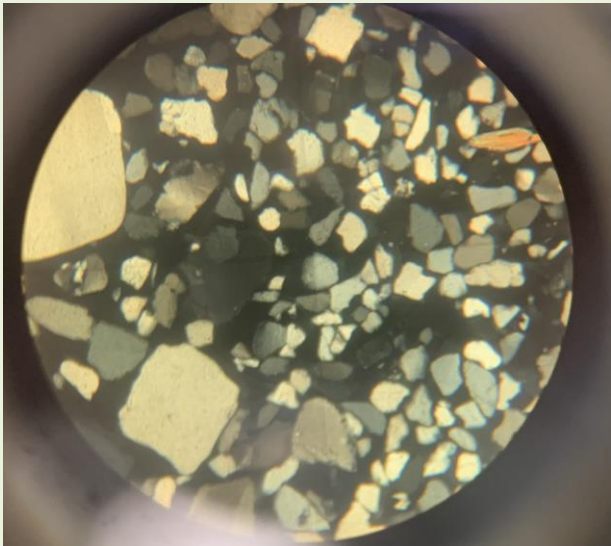
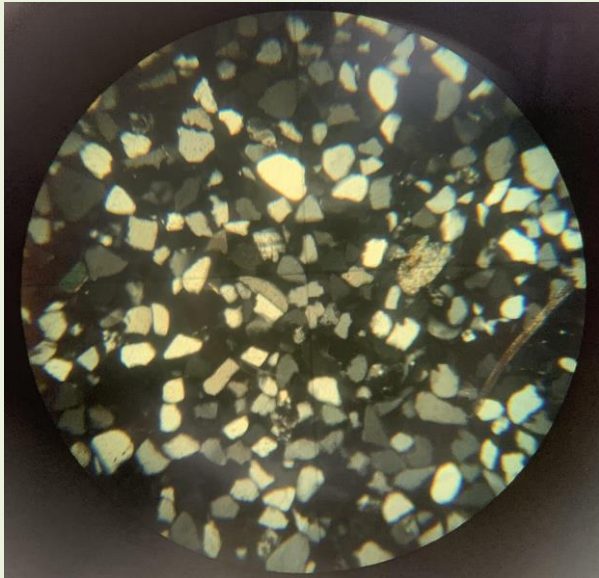
SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES
GQ2110222

| ANÁLISES | SiO2 | Al2O3 | Fe2O3 | CaO | MgO | TiO2 | P2O5 | Na2O | K2O |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MÉTODO | XRF79C | XRF79C | XRF79C | XRF79C | XRF79C | XRF79C | XRF79C | XRF79C | XRF79C |
| UNIDADE | % | % | % | % | % | % | % | % | % |
| LIMITE DETECÇÃO | 0,10 | 0,10 | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 0,01 |
| BRANCO_PREP | 98,0 | 0,14 | 0,92 | 0,02 | <0,1 | <0,01 | <0,01 | <0,1 | <0,01 |
| Areia Subauma | 96,8 | 1,07 | 1,32 | 0,04 | <0,1 | 0,25 | 0,16 | <0,1 | 0,42 |
| * REP Areia Subauma | 97,3 | 1,07 | 1,31 | 0,03 | <0,1 | 0,24 | 0,17 | <0,1 | 0,42 |
| * STD AMIS0140 | 96,4 | 1,43 | 2,22 | 0,24 | 0,17 | 0,08 | 0,01 | 0,22 | 0,33 |

| ANÁLISES | MnO | LOI |
|---------------------|--------|--------|
| MÉTODO | XRF79C | PHY01E |
| UNIDADE | % | % |
| LIMITE DETECÇÃO | 0,01 | -45,00 |
| BRANCO_PREP | <0,01 | 0,08 |
| Areia Subauma | 0,02 | 0,20 |
| * REP Areia Subauma | | 0,17 |
| * STD SG_241 | | 11,99 |
| * REP Areia Subauma | 0,01 | |
| * STD AMIS0140 | 0,16 | |

Descrição da Lâmina petrográfica

| PROJETO P21012 | |
|---|--|
| Amostra | Areia Subauma |
| Procedência | - |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Lâmina a nicóis cruzados</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Lâmina a nicóis cruzados</p> </div> </div> | |
| DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA | |
| Tipo de Material | Areia |
| Classificação granulométrica | Granulometria Variada |
| Seleção | Moderadamente selecionada, segundo estimativa visual. |
| Mineralogia | Quartzo (97%), Feldspato (1%) , Biotita (1%) e Minerais opacos (<1%) |
| Morfologia dos grãos | Os grãos de Quartzo predominam da forma sub-angulosa a sub-arredondado. Os grãos de Feldspato do tipo Microclina não apresentam fratura e são angulosos. A Biotita apresenta-se predominantemente com feição angulosa. |
| Outras Observações | É possível notar a presença de fragmentos de rocha na amostra. |

ANEXO II

Relatório da análise da amostra de carepa de Candiota



RELATÓRIO TÉCNICO

P21012 - Projeto AQ Pedro Hespanha

Carepa

Av. Presidente Antônio Carlos, 6627
CPDEE Sala 216 - Campus UFMG
Belo Horizonte - MG
CEP 31.270-901

+55 31 3409-1033
minasjr@minasjr.com.br
www.minasjr.com.br

RELATÓRIO TÉCNICO

PROJETO P21012 – Projeto AQ Pedro Hespanha

Cliente: Pedro Almeida Hespanha

Contato: Tel: (31) 97152 - 8598

E-mail: phespanha@hotmail.com

Equipe Técnica

Gerente do Projeto: Raquel Gomes Xavier

Diretor de Projeto: Raquel Gomes Xavier

Assessores de Projeto: Gabriela Oliveira Costa

Nathan Carlos Soares Martins

ATENÇÃO

O presente documento é propriedade intelectual da Minas Júnior Consultoria Mineral, sendo expressamente proibida qualquer forma de exposição das informações aqui apresentadas e/ou sua reprodução ou cópia, por qualquer meio ou instrumento, no todo ou em parte, sem a prévia e formal autorização da empresa avaliada e da Minas Júnior.

Belo Horizonte, 04 de fevereiro de 2022.

MINAS JÚNIOR CONSULTORIA MINERAL

A Minas Jr Consultoria Mineral é uma associação civil sem fins econômicos que busca aprimorar a formação acadêmica, cultural e social dos alunos dos cursos de Geologia e Engenharia de Minas da UFMG, desenvolvendo o espírito empreendedor dos futuros profissionais.

Atuando há mais de 10 anos no mercado, nossos serviços consistem na realização de estudos e elaboração de diagnósticos, pareceres, análises, relatórios, cursos e projetos sobre assuntos específicos da nossa área de atuação. Através destes estudos é possível assessorar a implantação de soluções indicadas para os problemas diagnosticados.

Buscamos sempre promover a integração social e profissional dos nossos membros segundo os princípios do Aprendizado, União, Coragem, Pessoas e Adaptabilidade. A valorização dos alunos e professores do curso de Geologia e Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais no mercado de trabalho e no âmbito acadêmico é nossa maior motivação.

Resumo

Este relatório teve como objetivo caracterizar uma amostra de Carepa de forma quantitativa. As metodologias utilizadas para a identificação do material foram a análises por DRX e FRX. Os resultados apresentados mostraram que o material contém uma substância (Fe_2O_3) que é utilizada na cadeia produtiva de produção dos Cimentos Portland, e possivelmente pode ser utilizada na indústria da Construção Civil.

A seguir encontram-se as tabelas com os resultados obtidos das análises por DRX (Tabela 1) e FRX (Tabela 2), respectivamente:

Tabela 1 - Caracterização e abundância das fases cristalinas identificadas (DRX). Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN

| Fases cristalinas identificadas | Grau de abundância | Fase cristalina presente em % |
|---------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Wustita | Abundante | 51,1 |
| Magnetita | Mediano | 37,7 |
| Hematita | Baixo | 11,2 |

Tabela 2 - Substâncias e teores percentuais (FRX). Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda

| Fe_2O_3 (%) | MnO (%) | Cr_2O_3 (%) | P_2O_5 (%) | SiO_2 (%) | TiO_5 (%) |
|-----------------------------|---------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|
| >100 | 0,555 | 0,165 | 0,025 | 0,375 | 0,015 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| Resumo | 4 |
| LISTA DE FIGURAS | 6 |
| LISTA DE TABELAS | 6 |
| 1. Introdução..... | 7 |
| 2. Objetivos | 9 |
| 3. Metodologia..... | 9 |
| 3.1. Fluxograma | 9 |
| 3.2. Recebimento da amostra | 11 |
| 3.3. Cominuição e amostragem..... | 11 |
| 3.4. Análise Química por Difractometria de Raios X (DRX) | 12 |
| 3.5. Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX) | 13 |
| 4. Resultados..... | 14 |
| 4.1. Resultados da análise por Difractometria de Raios X (DRX) | 14 |
| 4.2. Resultados da análise por Fluorescência de Raios X (FRX) | 17 |
| 5. Conclusão..... | 19 |
| 6. Referências Bibliográficas | 20 |
| 7. Anexos..... | 20 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Fluxograma dos processos desenvolvidos no Projeto | 10 |
| Figura 2 - Moinho Pulverizador de Painelas do LTDM. | 11 |
| Figura 3 - Painelas de pulverização..... | 12 |
| Figura 4 - Difratograma de raios X da amostra Carepa..... | 15 |
| Figura 5 - Refinamento para semiquantificação utilizando metodologia Rietveld para a amostra Carepa. | 16 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Caracterização e abundância das fases cristalinas identificadas (DRX). Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN | 4 |
| Tabela 2 - Substâncias e teores percentuais (FRX). Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda..... | 4 |
| Tabela 3 - Fases Cristalinas Identificadas da amostra de Carepa. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN | 14 |
| Tabela 4 - Identificação, grau de abundância e abundância percentual das fases cristalinas identificadas. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN..... | 16 |
| Tabela 5 - Compostos químicos com teores acima dos limites de detecção. Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda | 17 |
| Tabela 6 - Compostos químicos com teores abaixo dos limites de detecção. Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda | 18 |

1. Introdução

A carepa é um resíduo sólido gerado na fabricação do aço, produzida na oxidação da superfície do material quando este se encontra em elevada temperatura. O metal em alta temperatura reage com o oxigênio e forma óxidos de ferro com baixa aderência, os quais constituem a carepa.

Alguns resíduos provenientes de operações industriais de siderurgia e metalurgia possuem utilização na Construção Civil, como, por exemplo, as escórias granuladas de alto-forno provenientes da produção do ferro-gusa, comumente utilizadas na fabricação de cimentos do tipo Portland.

Alternativas para a utilização de subprodutos decorrentes da fabricação do aço, como a carepa, vêm sendo desenvolvidas a fim de viabilizar a redução do consumo de matérias-primas naturais, bem como os impactos decorrentes da sua exploração no meio ambiente.

A utilização da carepa de aço pode apresentar-se como alternativa relevante na produção de concretos de cimento, sendo necessário estudos de viabilidade técnica e do grau de potencialidade do emprego desse material.

O presente trabalho apresenta uma Análise Química por meio de técnicas laboratoriais de FRX, DRX de uma amostra de carepa. A finalidade do projeto é avaliar sua composição mineralógica e quantificação dos elementos químicos que a compõe, para melhor conhecer o material e, com isso, possibilitar ao cliente um melhor direcionamento para aplicação da Carepa na produção de cimento como aditivo de ferro.

PROPOSTA DE VALOR

No Projeto AQ Pedro Hespanha buscamos fazer o levantamento de dados para a amostra de carepa, com a finalidade de compreender as características do material que o cliente possui. Com base no trabalho desenvolvido, foi possível gerar valor nos seguintes pilares:

Assertividade



O conhecimento do seu produto, por meio do método de Análise Química (DRX e FRX), irá informar composição do material a fim de estudar a melhor forma de aproveitá-lo.

2. Objetivos

O presente relatório busca avaliar uma amostra de Carepa e identificar as principais características, tais como a composição mineralógica, composição química e as respectivas concentrações dos elementos.

Tal procedimento tem por finalidade verificar a possibilidade de aproveitamento econômico do material fornecido pelo cliente na produção de cimento.

3. Metodologia

A fim de melhor detalhar a série de métodos e técnicas que foram utilizadas ao longo da execução do projeto, dividiu-se cada etapa a fim de que se tenha uma melhor compreensão.

3.1. Fluxograma

A Figura 1 apresenta o fluxograma que esquematiza todas as etapas dos procedimentos realizados com a amostra analisada no projeto: recebimento da amostra, amostragem, cominuição, análise por DRX, análise por FRX até a fase final de elaboração do relatório técnico.

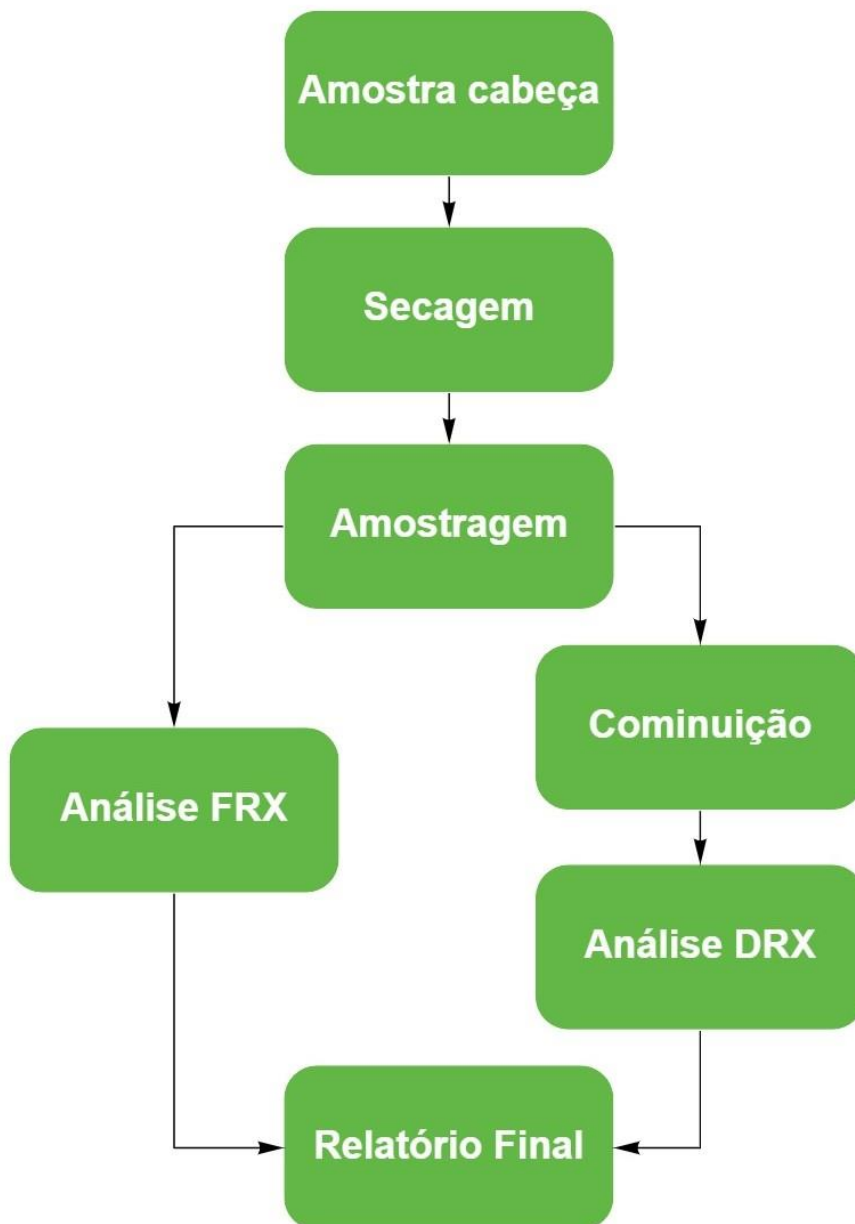


Figura 1 - Fluxograma dos processos desenvolvidos no Projeto

3.2. Recebimento da amostra

Ao ser recebida por um dos membros da empresa Minas Júnior Consultoria Mineral, a amostra de Carepa foi separada para ser direcionada para diferentes locais a fim de serem realizadas as análises requeridas.

A substância foi encaminhada para realizações dos ensaios e análises para laboratórios terceirizados.

3.3. Cominuição e amostragem

O processo de cominuição foi realizado a partir do Moinho Pulverizador de Painela, esse equipamento realiza a quebra dos materiais em dimensões menores em um recipiente semelhante a uma painela por intermédio de um cilindro central, como pode ser visto nas Figura 2 e 3.



Figura 2 - Moinho Pulverizador de Painelas do LTDM.



Figura 3 - Painéis de pulverização

A pulverização do material ocorre quando o cilindro do centro gira contra as bordas da panela, pulverizando os materiais ali presentes. O ensaio na amostra de Carepa durou 1 minuto e foi realizado no Laboratório de Tratamentos de Minérios (LTDM) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Após a pulverização a amostra passou por peneiramento para garantir que a granulometria atendesse aos critérios das análises posteriores.

3.4. Análise Química por Difractometria de Raios X (DRX)

A Difractometria de Raios X é um método semiquantitativo que consiste em bombardear uma amostra com um feixe de Raios X, considerando que cada mineral possui uma estrutura cristalina específica e irá responder de forma particular.

Os Raios X ao entrarem em contato com o material são difratados em ângulos e em intensidades específicas, que são os indicadores diretos de qual estrutura cristalina está sendo bombardeada. Os picos nos difratogramas são analisados com base em dados de difratometria padronizados e, dessa forma, os minerais presentes na amostra são identificados.

A amostra de Carepa foi submetida à preparação e à análise semiquantitativa por Difractometria de Raios X (DRX), realizada em um Difratorômetro da PANalytical, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ e cristal monocromador de grafita. Foi utilizada uma amostra de referência, com base no padrão do banco de dados do ICDD – International Centre for Diffraction Data.

Tais testes foram realizados pelo Laboratório de Raios X do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) e, portanto, a metodologia empregada é de responsabilidade do laboratório terceirizado. O laudo obtido após o ensaio encontra-se no Anexo desse Relatório.

3.5. Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

A técnica de análise por Fluorescência de Raios X (FRX) é um método quantitativo que consiste em irradiar um material com um feixe de Raios X. As partículas são absorvidas pela amostra e excitam os elétrons deslocando-os entre as camadas eletrônicas dos elementos químicos, de forma que durante o processo ocorre a emissão de luz. O aparelho utilizado identifica essa emissão luminosa, que é particular para cada elemento químico, e consegue atestar os elementos que estão presentes na amostra em teor e proporção.

Os testes de FRX foram realizados pelo Laboratório da SGS GEOSOL Laboratórios Ltda e, portanto, a metodologia utilizada é de responsabilidade do laboratório terceirizado. O laudo obtido após o ensaio encontra-se no Anexo desse Relatório.

4. Resultados

4.1. Resultados da análise por Difractometria de Raios X (DRX)

Os resultados da análise semiquantitativa de Difractometria de Raios X estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Fases Cristalinas Identificadas da amostra de Carepa. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN

| Fases cristalinas identificadas |
|---------------------------------|
| Wustita |
| Magnetita |
| Hematita |

Os diagramas indexados da amostra são apresentados nas Figuras 3 e 4, ilustrando, respectivamente, o Difratograma da amostra e o refinamento utilizando o Método de Rietveld.

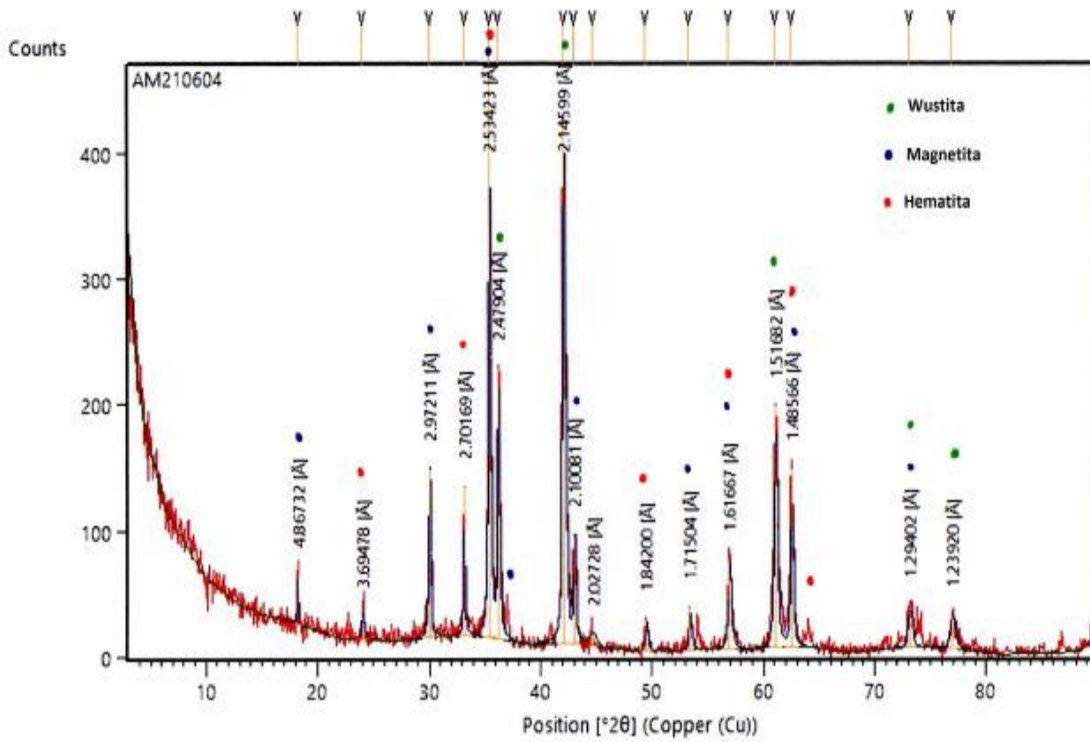


Figura 4 - Difratoograma de raios X da amostra Carepa. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN

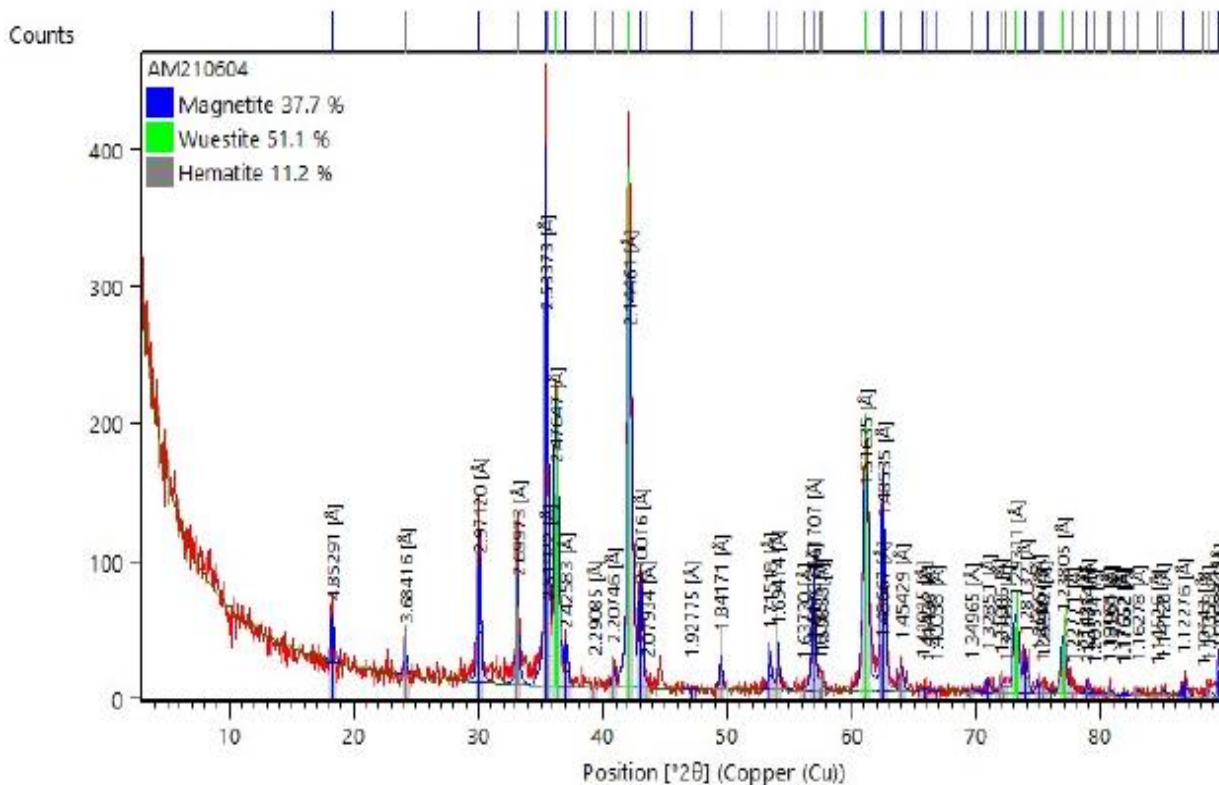


Figura 5 - Refinamento para semiquantificação utilizando metodologia Rietveld para a amostra Carepa. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN

Na Tabela 4 estão apresentadas as informações correspondentes ao grau de abundância mineralógica da amostra obtidas por meio do DRX.

Tabela 4 - Identificação, grau de abundância e abundância percentual das fases cristalinas identificadas. Fonte: Laboratório de Raios X do DEMIN

| Fases cristalinas identificadas | Grau de abundância | Fase cristalina presente em % |
|---------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Wustita | Abundante | 51,1 |
| Magnetita | Mediano | 37,7 |
| Hematita | Baixo | 11,2 |

Pode-se observar que, os minerais identificados pela Difractometria de Raios X estão coerentes em relação à paragênese da Carepa, por se tratar de um resíduo da fabricação do aço.

A Difractometria identifica a presença de Wustita (FexO), Magnetita (Fe₃O₄) e Hematita (Fe₂O₃), que são três diferentes óxidos de ferro.

4.2. Resultados da análise por Fluorescência de Raios X (FRX)

O processo de preparação da amostra realizada pelo laboratório terceirizado, consistiu em:

- Secagem da amostra.
- Britagem a 3 mm.
- Homogeneização.
- Quarteamento em Jones.
- Pulverização da amostra.

A composição química detectada pelo ensaio que apresenta teores acima dos limites de detecção encontra-se na Tabela 5. Os compostos químicos com teores abaixo dos limites de detecção podem ser localizados na Tabela 6:

Tabela 5 - Compostos químicos com teores acima dos limites de detecção.
Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda

| Substância | Fe ₂ O ₃ | MnO | Cr ₂ O ₃ | P ₂ O ₅ | SiO ₂ | TiO ₅ |
|-----------------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|
| Limite detecção | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 0,01 |
| Unidade | % | % | % | % | % | % |
| Valor | >100 | 0,555 | 0,165 | 0,025 | 0,375 | 0,015 |

Tabela 6 - Compostos químicos com teores abaixo dos limites de detecção.

Fonte: SGS GEOSOL Laboratórios Ltda

| Substância | Al ₂ O ₃ | BaO | K ₂ O | MgO | Na ₂ O | V ₂ O ₅ |
|-----------------|--------------------------------|-------|------------------|------|-------------------|-------------------------------|
| Limite detecção | 0,10 | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 0,10 | 0,01 |
| Unidade | % | % | % | % | % | % |
| Valor | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,1 | <0,1 | <0,01 |

Por meio dos resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6, pode-se observar que a análise por FRX apresentou um elevado teor em Óxido de Ferro (Fe₂O₃) que corresponde, segundo o certificado de análise, a mais de 100% da amostra avaliada. Cabe salientar que durante o processo de preparação da amostra, a mesma pode ter sofrido contaminação, já que na etapa de pulverização, é utilizado um moinho de aço 95%. Tal fato pode ter contribuído para o incremento do teor de ferro na amostra.

Nenhum dos outros componentes do material assumiu teores maiores que 0,55% e os compostos químicos MnO, Cr₂O₃, SiO₂, P₂O₅ e TiO₅ foram os únicos que assumiram percentual superior aos limites de detecção estabelecidos na análise por FRX. Sendo o MnO (0,55%), Cr₂O₃ (0,17%), SiO₂ (0,39%), P₂O₅ (0,025%) e TiO₅ (0,015%).

A elevada concentração de óxidos de ferro se deve, majoritariamente, à presença exclusiva de óxidos de ferro na composição mineral, detectados pelo DRX: Wustita, Magnetita e Hematita.

As outras substâncias químicas que apresentam um percentual superior ao limite de detecção podem estar relacionadas a algum tipo de impureza na amostra. Entretanto, a concentração das mesmas não é significativa ao se comparado com percentual de Fe₂O₃.

No processo de análise por FRX é obtido informações de perda ao fogo (LOI) da amostra. Essa etapa foi realizada até a temperatura de 1000 °C e gerou como resultado um valor de -6,13% da massa. Esse resultado negativo representa um incremento na massa da amostra, isso ocorre devido à oxidação dos óxidos de ferro ao longo do processo de perda ao fogo (MARTINS, 2006).

5. Conclusão

Por meio da análise de DRX obteve-se, em ordem decrescente de abundância, os seguintes minerais: Wustita (51,1%), Magnetita (37,7%), Hematita (11,2%).

Já com análise de FRX retornou, em ordem decrescente e acima do limite de detecção estipulado, as seguintes substâncias químicas: Fe_2O_3 (>100%), MnO (0,55%), Cr_2O_3 (0,17%), SiO_2 (0,39%), P_2O_5 (0,025%) e TiO_5 (0,015%).

O objetivo inicial da realização do trabalho foi avaliar a amostra de Carepa e identificar suas principais características, observando sua possível aplicação na produção de cimento. Cabe salientar que é importante expor que o Clínquer (mistura homogênea de diversos componentes químicos) é um dos materiais mais importantes para a produção do cimento do tipo Portland.

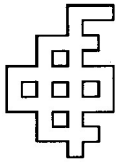
Como um dos componentes do Clínquer (GOBBO, 2003) é o óxido de ferro (Fe_2O_3) e, observando que a amostra analisada possui significativa concentração de Ferro, a utilização da Carepa no processo de produção do Clínquer pode ser uma alternativa viável. A principal ressalva quanto a essa utilização é que a amostra analisada é composta por três fases diferentes de oxidação do Ferro e a fase Fe_2O_3 , utilizada na produção do Clínquer, é a menos abundante.

6. Referências Bibliográficas

MARTINS, Fernanda Machado. Caracterização Química e Mineralógica de Resíduos Sólidos Industriais Mineraiis do Estado do Paraná. Orientador: Carlos Jorge da Cunha. 2006. 158 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Setor de Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

GOBBO, Luciano de Andrade. Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld. 2003. Dissertação (Mestrado em Recursos Mineraiis e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. doi:10.11606/D.44.2003.tde-09102003-112552. Acesso em: 2022-01-29.

7. Anexos



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Departamento de Engenharia de Minas
FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI

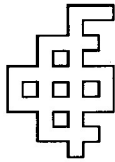


RELATÓRIO TÉCNICO 031/2021

Caracterização das fases cristalinas

Dezembro de 2021

Departamento de Engenharia de Minas – EE.UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627 – Escola de Engenharia Bloco 2 – Pampulha – 31270-901 - Belo Horizonte, MG
Tel: 31 3409-1860 Fax: 31 3409-1966 www.demin.ufmg.br



Relatório: 031/2021

Material: Amostra de oxidação

Interessado: Minas Jr.

1. INTRODUÇÃO

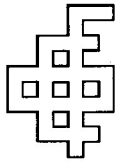
O presente relatório apresenta os resultados obtidos na caracterização das fases cristalinas, através da técnica de difratometria de raios X, de 01 amostra de oxidação.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A amostra foi submetida à preparação e à análise semiquantitativa por Difratometria de Raios X (DRX), realizada em um Difratômetro da PANalytical, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ e cristal monocromador de grafita. O método de análise se baseia na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 do ICDD – International Centre for Diffraction Data.

Os padrões do banco de dados PDF-2 do ICDD utilizados para a identificação das fases cristalinas foram:

| Fases Identificadas | Fórmula | Código |
|---------------------|-------------------------|---------|
| Wustita | FeO | 89-0687 |
| Magnetita | Fe_3O_4 | 89-0691 |
| Hematita | Fe_2O_3 | 89-0599 |



3. RESULTADOS

3.1. Difratometria de Raios X

Os resultados da análise semiquantitativa por Difratometria de Raios X da amostra são apresentados na Tabela I. Os difratogramas indexados da amostra são mostrados nas Figuras 1 e 2.

Tabela I: Identificação de fases cristalinas por difração de raios X

| Amostra | Fases Cristalinas Identificadas |
|---------|---------------------------------|
| Carepa | Wustita, Magnetita, Hematita |

Amostra Carepa

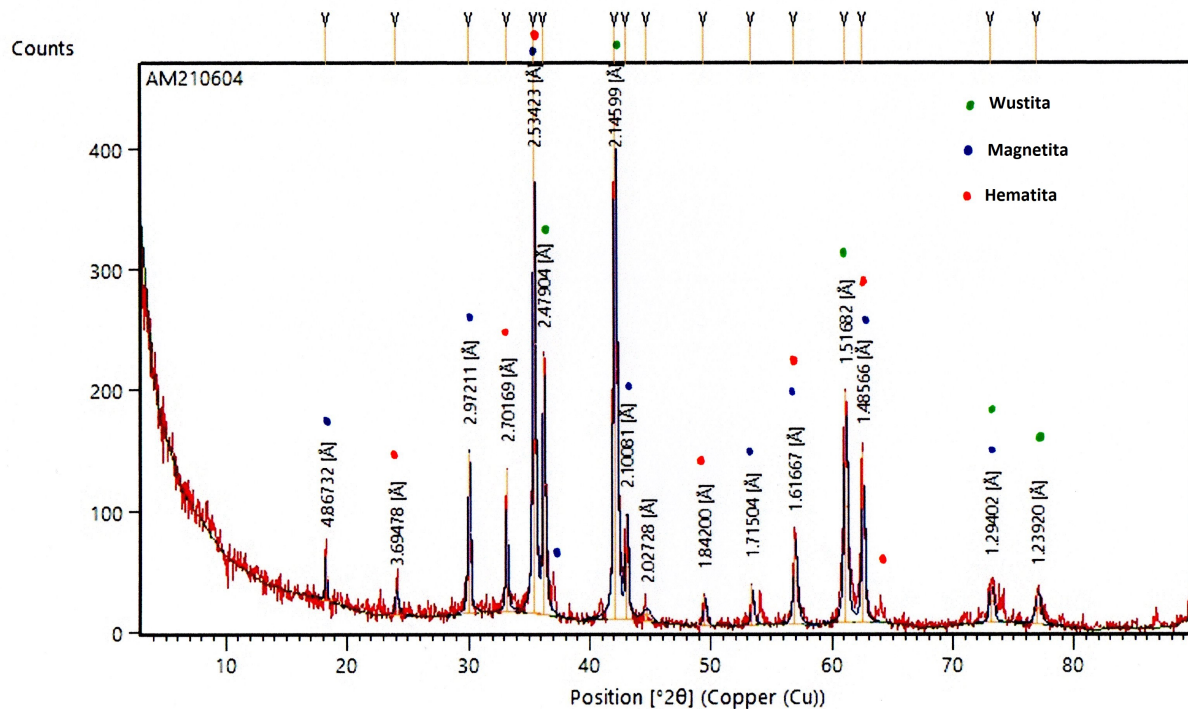
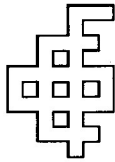


Figura 1: Difrátograma de raios X da amostra Carepa.



Semi-quantificação de fases pelo método Rietveld:

Difração de raios-X – DRX – fases cristalinas presentes:

| | % |
|-----------------------|------|
| • Wustita (abundante) | 51,1 |
| • Magnetita (mediana) | 37,7 |
| • Hematita (baixa) | 11,2 |

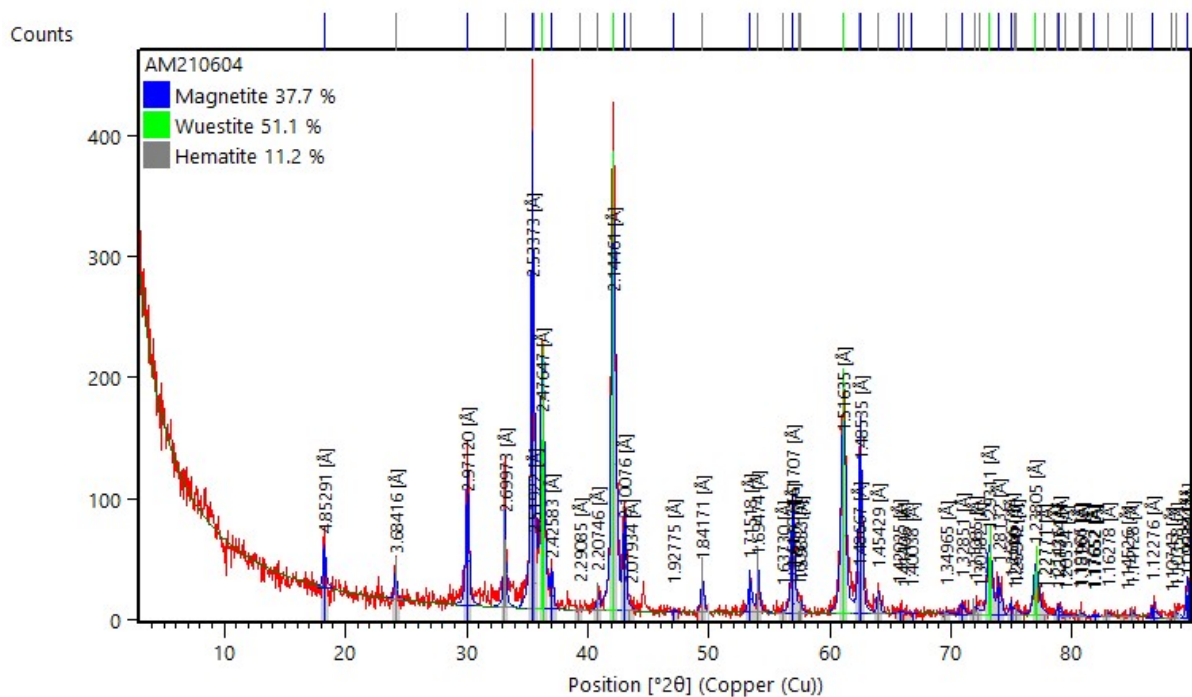


Figura 2: Refinamento para semi-quantificação utilizando metodologia Rietveld para a amostra Carepa.

Belo Horizonte, 28 de dezembro de 2021.

Andréia Bicalho Henriques

Andréia Bicalho Henriques
Professora Adjunta
Doutora em Tecnologia Mineral



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES
GQ2110221

INFORMAÇÕES DO CLIENTE

NOME
MINAS JUNIOR CONSULTORIA MINERAL

ATTN.
Gabriel Araujo

ENDEREÇO:
AV PRESIDENTE ANTONIO CARLOS 6627 6627 EDIF: ESCOL ENG PRED INOVA; PAMPULHA 31270901 MG BELO HORIZONTE

CPF/CNPJ
07.680.897/0001-90

REFERÊNCIA DO LOTE DE AMOSTRAS

REF. CLIENTE
Pedido 17/12/2021

QTE. AMOSTRAS
1

RECEBIDO
17/12/2021

PRODUTO
CAREPA

COMPLETADO
18/01/2022

PROJETO
Default

EMITIDO
18/01/2022

REFERÊNCIA ANALÍTICA

PREP

DRY105: Secagem de amostras à 105°C

PREPQC: Controle de Qualidade - Preparação Física

PRP102_E: Secagem, britagem de 75% a 3 mm, homogeneização, quarteramento em Jones, pulverização de 250 a 300 g de amostra em moinho de aço 95% a 150#

XRA

PHY01E: Determinação de Perda ao Fogo (LOI) por Gravimetria - 1000°C

XRF72RI: Fusão com Tetraborato de Lítio - XRF - Resíduos Industriais

LEGENDA: SIGLAS

L.D.= Limite de Detecção

BLK = Branco

REP = Replicata

DUP = Duplicata

L.N.R. = Listado e não Recebido

I.S. = Amostra Insuficiente

N.A. = Não Analisado

STD = Padrão

I.N.F. = Não reportado devido a interferentes

OVR = Não Analisado devido ao alto teor


Marcos Filipe Gonçalves Silva
CRQ II 02202046
Responsável Técnico

Os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespasiano - MG - Brasil - CEP: 33.200-000
Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br
Certificados ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015 (ABS 32982 e ABS 39911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES

GQ2110221

| ANÁLISES | Al2O3 | BaO | CaO | Cr2O3 | Fe2O3 | K2O | MgO | MnO | Na2O |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| MÉTODO | XRF72RI | XRF72RI | XRF72RI | XRF72RI | XRF72RI | XRF72RI | XRF72RI | XRF72RI | XRF72RI |
| UNIDADE | % | % | % | % | % | % | % | % | % |
| LIMITE DETECÇÃO | 0,10 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 0,01 | 0,10 |
| BRANCO_PREP | <0,1 | <0,01 | 0,02 | <0,01 | 0,88 | <0,01 | <0,1 | <0,01 | <0,1 |
| P21012 - AQ Pedro Hespanha | <0,1 | <0,01 | 0,06 | 0,17 | >100 | <0,01 | <0,1 | 0,55 | <0,1 |
| * REP P21012 - AQ Pedro Hespanha | <0,1 | <0,01 | 0,07 | 0,16 | >100 | <0,01 | <0,1 | 0,56 | <0,1 |
| * STD SG_209 | 1,20 | 0,12 | 0,03 | 0,02 | 91,7 | 0,02 | <0,1 | 0,67 | <0,1 |

| ANÁLISES | P2O5 | SiO2 | TiO2 | V2O5 | LOI |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|
| MÉTODO | XRF72RI | XRF72RI | XRF72RI | XRF72RI | PHY01E |
| UNIDADE | % | % | % | % | % |
| LIMITE DETECÇÃO | 0,01 | 0,10 | 0,01 | 0,01 | -45,00 |
| BRANCO_PREP | <0,01 | >98 | <0,01 | <0,01 | 0,19 |
| P21012 - AQ Pedro Hespanha | 0,02 | 0,39 | 0,01 | <0,01 | -6,13 |
| * REP P21012 - AQ Pedro Hespanha | | | | | -6,14 |
| * STD AMIS0599 | | | | | 0,59 |
| * REP P21012 - AQ Pedro Hespanha | 0,03 | 0,36 | 0,02 | <0,01 | |
| * STD SG_209 | 0,06 | 1,04 | 0,09 | <0,01 | |