



---

**RELATÓRIO TÉCNICO:**

**AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS  
OBTIDOS NO PROGRAMA DE  
CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DA  
ANGLOGOLD ASHANTI PARA O ANO  
DE 2022 – PLANTA DO QUEIROZ**

---

RT-MIN-AG-CPR-01-23-RV0A

ELABORADO PARA:



Agosto de 2023

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	5
2. ASPECTOS LEGAIS E NORMATIVOS.....	6
2.1. Ensaios para avaliação do Potencial de Geração de Drenagem Ácida (DAM).....	6
2.2. Norma ABNT NBR 10.004/2004 e Background de seus critérios .....	10
3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	13
a) Rejeitos: Potencial de Geração de Drenagem Ácida .....	13
b) Classificação de Resíduos ABNT NBR 10004:2004 .....	136
c) Conclusões e recomendações .....	18
4. REFERÊNCIAS .....	19
5. ANEXO I: LAUDOS ANALITICOS .....	20

## FIGURAS

Figura 1: Critérios de classificação quanto ao potencial de geração de ácido para diferentes valores de NPR (Fonte: MEND, 2009). .....	9
Figura 2: Critérios de avaliação do potencial de geração de ácido para valores de NAGpH e NPR segundo MEND, 2009.....	10
Figura 3: Caracterização e classificação de resíduos sólidos. ....	11
Figura 4: Avaliação gráfica do potencial de geração de ácido para valores de NPR para amostras de rejeito (Fonte: MEND, 2009).....	14
Figura 5: Critérios de avaliação do potencial de geração de ácido para valores de NAGpH e NPR para amostras de rejeito (Fonte: MEND, 2009). ....	15

## **Tabelas**

Tabela 1: Classificação das amostras de rejeito analisadas em ensaios de classificação de resíduos .....	17
--	----

## 1. INTRODUÇÃO

Conforme Mend (2009), a demanda ambiental mais dispendiosa e tecnicamente desafiadora para a indústria minerária é a prevenção de impactos ambientais aos solos e às águas naturais provocados por drenagens oriundas de materiais geológicos. Estes, por sua vez, podem se constituir em diversas estruturas de uma mina como pilhas de materiais estéreis (*waste rocks*) e de minérios, depósitos de rejeitos, cavas e mina subterrânea, dentre outras.

O paradigma da atividade minerária atual, e dos órgãos reguladores, requer “medidas proativas” para prevenir impactos causados pelas drenagens de materiais geológicos com potencial para contaminar solos e águas. Neste contexto, os estudos de predição da reatividade ambiental destes materiais constituem a principal parte da “boa gestão financeira” e são muito importantes na garantia de que “... a exploração de recursos minerais ocorra de forma a minimizar os impactos” causados ao meio ambiente (MEND, 2009).

A predição do potencial de lixiviação de metais e de geração de acidez é, portanto, ferramenta fundamental que se traduz na forma de ensaios geoquímicos de curta e/ou longa duração, e permite a identificação prematura do potencial dos materiais geológicos em gerar águas contaminadas. Em última instância, essa ferramenta permite incorporar nos planejamentos de lavra e de gerenciamento de minérios, estéreis e rejeitos, medidas de prevenção e controle da geração de acidez.

Resíduos sólidos provenientes das operações de lavra e processamento mineral podem ser classificados preliminarmente em estéreis e rejeitos.

Estéreis são materiais de cobertura, camadas intermediárias ou circundantes do mineral de interesse, extraídos fisicamente através do uso de explosivos ou escavadeiras e muitas vezes dispostos em pilhas sem estruturas de contenção. As pilhas deste resíduo são, em geral, de granulometria bastante variada e, na ausência de compactação, apresentam elevada porosidade, o que facilita a penetração de oxigênio gasoso e águas pluviais em seu interior.

Rejeitos são resíduos sólidos resultantes das operações de beneficiamento e metalurgia extrativa. Uma vez que estas implicam em cominuição e classificação do minério, os rejeitos apresentam distribuição granulométrica pouco dispersa e usualmente mais fina que os estéreis. São frequentemente depositados em áreas confinadas (barragens ou bacias) dotadas de estruturas de contenção

Os objetivos do presente programa são: (i) estabelecer a classificação dos principais rejeitos produzidos na unidade operacional Planta do Queiroz da Anglogold; (ii) coletar amostras dos principais rejeitos da unidade operacional Planta do Queiroz da Anglogold.

## **2. ASPECTOS LEGAIS E NORMATIVOS**

Sob o enfoque jurídico, e considerando o contexto nacional, e as características da área, o estudo de caracterização geoquímica foi desenvolvido em consonância com as normas técnicas relacionadas à caracterização e disposição final de resíduos industriais. Passando também pelas normas relacionadas ao gerenciamento de áreas com potencial de contaminação, a saber:

- Lei n.º 12.035/2010 – Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos;
- Resolução CONAMA n.º 420/2009 – Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas;
- Resolução CONAMA n.º 396/2008 – Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências;
- Resolução CONAMA n.º 357/2005 – Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.
- ABNT NBR 10004:2004 – Procedimento para classificação de resíduos sólidos:
  - ABNT NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos;
  - ABNT NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos;
  - ABNT NBR 10007:2004 – Amostragem de resíduos sólidos.

### **2.1. Ensaios para avaliação do Potencial de Geração de Drenagem Ácida (DAM)**

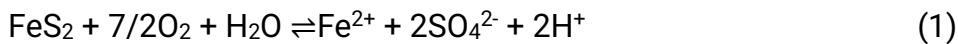
A ocorrência de drenagem ácida de mina (DAM) está diretamente associada à presença de sulfetos na litologia local e ocorre quando são satisfeitas simultaneamente as seguintes condições:

- O resíduo (estéril ou rejeito) contém sulfetos em quantidades suficientes para reagir química e biologicamente, gerando ácido em volume e velocidade maior que aquela pela qual pode ser neutralizado pelos álcalis presentes no meio;
- As propriedades físicas dos resíduos são tais que permitem a infiltração de água e oxigênio em quantidade suficiente para promover a ocorrência de reações químicas e biológicas;

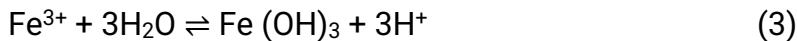
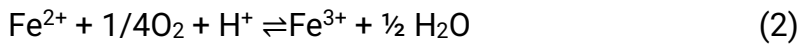
- O clima é úmido o bastante para que a água da chuva se infiltre e percole através do resíduo e/ou o resíduo esteja localizado em uma área exposta às águas que o atravessam, transportando a drenagem ácida ao meio ambiente.

A DAM se caracteriza pela formação de ácido sulfúrico e elevadas concentrações de metais dissolvidos. O processo de geração ocorre através da dissociação do mineral na presença de água e oxigênio, produzindo a acidez. As principais reações químicas atuantes nos ambientes potencialmente geradores de DAM são:

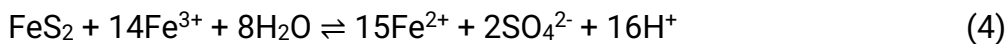
- a) Oxidação de sulfeto pelo O<sub>2</sub> atmosférico com produção de sulfato, Fe ferroso e íons H<sup>+</sup> em solução [eq.(1)]:



- b) Oxidação do Fe ferroso gerando Fe férrico [eq.(2)], o qual sofre hidrólise produzindo hidróxido de ferro e aumento da acidez [eq.(3)]:



- c) Oxidação de sulfetos por Fe<sup>3+</sup> com produção de acidez e redução do Fe férrico para Fe ferroso [eq.(4)]:



Em geral o processo de geração de DAM inicia-se quando minerais sulfetados, tais como a pirita (FeS<sub>2</sub>), calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) e pirrotita (Fe<sub>11</sub>S<sub>12</sub>) são expostos às condições atmosféricas devido às atividades de escavação, desmonte e beneficiamento de minérios.

Nem todos os minerais sulfetados, ou rochas, que contém enxofre são causadores de drenagem ácida. O potencial de geração de acidez depende da quantidade total e do tipo de sulfetos presentes. A reatividade dos sulfetos é um fator importante na cinética de oxidação.

Sabe-se que determinados elementos-traço estão associados a certos tipos de minerais. Quando na presença de DAM, esses elementos podem ser solubilizados e mobilizados, aumentando os impactos sobre os recursos hídricos. Com um efeito contrário, a dissolução e a capacidade de troca de cátions dos argilo-minerais presentes no substrato também podem afetar a geração da DAM, no entanto a neutralização pelos argilominerais é reconhecidamente lenta e pode manter o pH próximo a condições de neutralidade apenas se existir uma velocidade muito lenta de geração de acidez. (MEND, 2009).

O ensaio “MABA” (*Modified Acid Base Accounting*), comumente empregado na avaliação do potencial estático de geração de drenagem ácida, objetiva determinar o balanço entre a produção e o consumo de ácido a partir dos componentes minerais de determinada amostra. O teste consiste em determinar principalmente os seguintes parâmetros:

- O Potencial de Neutralização (PN), a partir do Método Sobek modificado (Sobek et. al., 1978; EPA, 1994);
- O Potencial de Acidez (PA) através da determinação das espécies de enxofre: enxofre total, S(T); enxofre sulfeto, S(S<sup>2-</sup>); e sulfato, S(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

A determinação do parâmetro PN é realizada pelo ataque da amostra com excesso de ácido clorídrico à temperatura ambiente, durante 24 horas, para consumir minerais neutralizantes. Segue-se a titulação com solução alcalina (NaOH), até pH 8,3. O cálculo do PN é realizado pela seguinte equação:

$$NP \text{ (kg CaCO}_3\text{/t)} = (\text{g HCl consumido/g amostra}) \times (50/36,5) \times 1000$$

O cálculo do potencial de acidez (AP) é realizado através dos teores de enxofre, conforme a seguinte equação:

$$AP \text{ (kg CaCO}_3\text{/t)} = (1000/32,064) \times \text{massa \% S}$$

Alternativamente, o parâmetro PA é calculado através do teor de sulfeto (“enxofre pirítico”) obtido através de via úmida, assumindo que ocorre a conversão total de enxofre-sulfeto a sulfato, e que 4 moles de H<sup>+</sup> são produzidos por mol de pirita (FeS<sub>2</sub>).

Para caracterizar uma amostra como potencialmente geradora de acidez, ou não geradora de acidez, são propostas uma série de critérios, tendo como base os resultados dos ensaios MABA. Uma das abordagens mais comuns é baseada no uso do Potencial Líquido de Acidificação (NPR= NP/AP), além do Potencial Líquido de Neutralização (NNP= NP-AP). O NNP não é atualmente recomendado para ser utilizado como indicador de predição futura de drenagem ácida. Para facilitar a comparação de PN, PA, os valores dessas variáveis são expressos na mesma unidade (kg de CaCO<sub>3</sub> por tonelada de estéril).

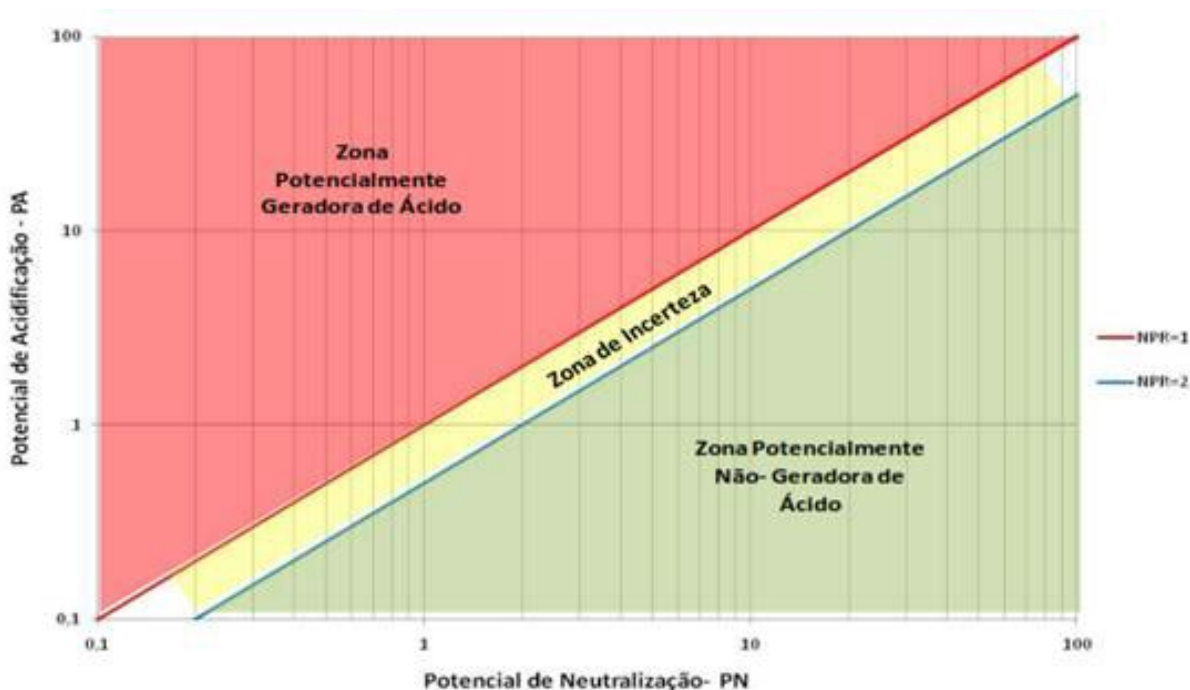
Os critérios de avaliação do potencial estático de geração de drenagem ácida a serem adotados no presente trabalho são previstos pelo guia MEND (2009) assim definidos:

- NPR=PN/PA < 1: Potencialmente Gerador de Acidez;
- 1 < PN/PA < 3: Potencial Incerto de Geração de Acidez;
- NPR=PN/PA > 3: Baixa Probabilidade de Gerar Acidez.

Em outras palavras um potencial de neutralização duas vezes superior à capacidade de geração de acidez é o critério utilizado para predizer se uma amostra é ou não geradora de acidez. Algumas literaturas e países, no entanto adotam um critério igual a DOIS para esta definição. Neste relatório, ambas as referências foram utilizadas e discutidas. Várias abordagens gráficas são



comumente utilizadas na interpretação dos dados obtidos, sendo para este trabalho adotada a Figura 1.

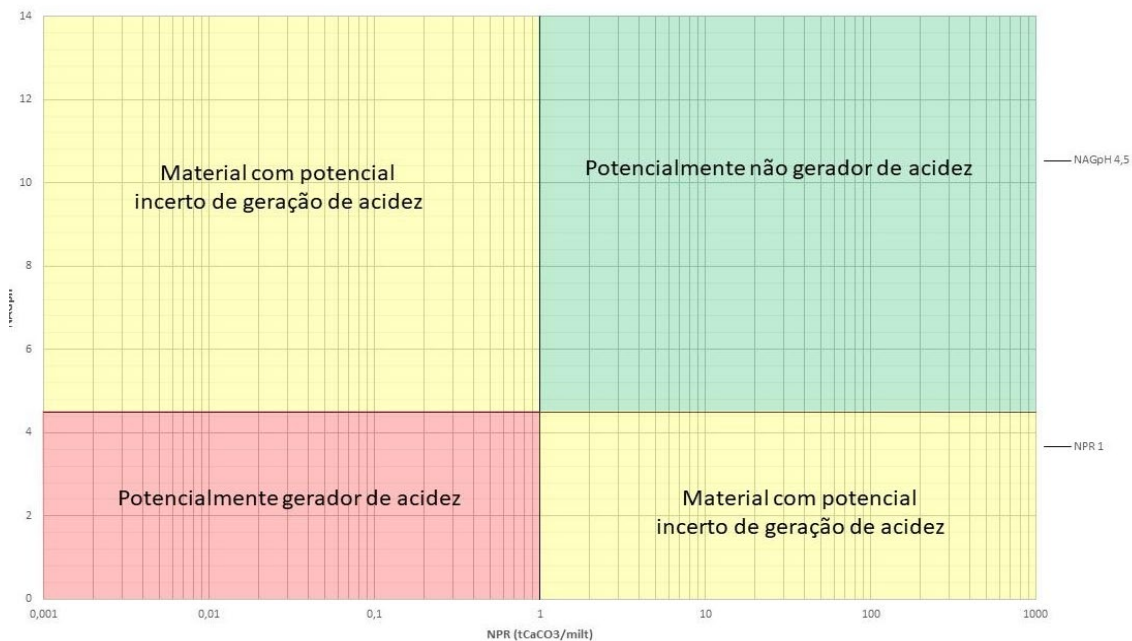


**Figura 1: Critérios de classificação quanto ao potencial de geração de ácido para diferentes valores de NPR (Fonte: MEND, 2009).**

Os testes Net Acid Generation (NAG) também são ensaios estáticos realizados para avaliar o potencial de geração de ácido, e são geralmente aplicados em associação com os testes MABA. O ensaio envolve a reação com peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), um forte agente oxidante, para oxidar rapidamente quaisquer minerais sulfetados presentes na amostra. A geração de ácido e as reações de neutralização ocorrem simultaneamente neste sistema e o resultado líquido representa uma medida direta da quantidade de ácido gerado.

Se a amostra apresentar um suficiente potencial NP, sua alcalinidade não será inteiramente consumida, e espera-se que o sistema tenha a capacidade de manter seu pH em torno da neutralidade. Se não existir um potencial NP satisfatório, então o pH da solução irá cair abaixo de 4,5, e haverá acidez líquida no lugar de alcalinidade líquida. Portanto, um pH final ácido ( $NAGpH < 4,5$ ) indicará que a amostra será potencialmente geradora de ácido, e a quantidade deste ácido poderá ser determinada por titulação, sendo expressa na mesma unidade dos ensaios MABA. Quando a amostra apresentar um valor de  $NAGpH$  superior a 4,5, ela será classificada como potencialmente não geradora de ácido.

A Figura 2 abaixo correlaciona os critérios utilizados pelo guia de MEND (2009) estabelecidos para valores de NAGpH e NPR e apresenta as zonas de classificação para essa metodologia.



**Figura 2: Critérios de avaliação do potencial de geração de ácido para valores de NAGpH e NPR segundo MEND, 2009.**

Em função da evolução do programa de caracterização geoquímica houve a necessidade do agrupamento das amostras em função dos litotipos.

## 2.2. Norma ABNT NBR 10.004/2004 e Background de seus critérios

No Brasil, coube à Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT propor um conjunto de normas para padronizar, em nível nacional, a classificação dos resíduos.

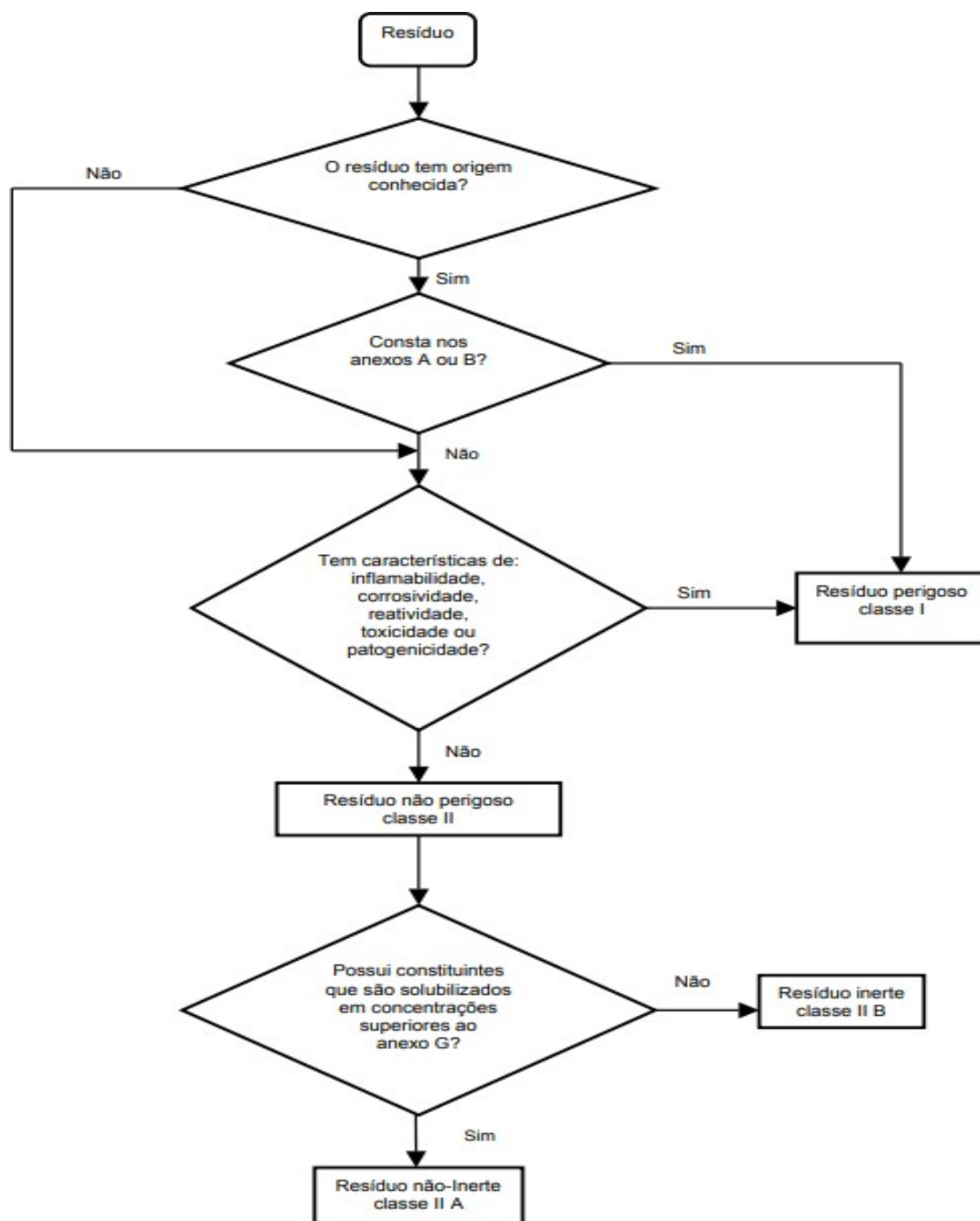
A classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados.

A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem.

A Figura 3 ilustra a classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente. Os resíduos sólidos são classificados em dois grupos

perigosos e não perigosos, sendo ainda este último grupo subdividido em não inerte e inerte.



**Figura 3: Caracterização e classificação de resíduos sólidos.**

Os “resíduos” de mineração por suas particularidades, no que se refere a volumes, reatividade ambiental e potencial de reaproveitamento, têm sido tratados como classe especial de resíduos sólidos em outros países, onde existem normas e regulamentações específicas.

No Brasil, essa separação não está clara e não é, na verdade, prevista dentro da lei nacional de resíduos sólidos, fazendo com que exista certa subjetividade na definição de critérios de construção, operação e fechamento de depósitos de resíduos da mineração.

Neste contexto, a avaliação do potencial de contaminação a partir de materiais geológicos e rejeitos de mineração tem sido realizada, na maioria dos casos, única e exclusivamente por meio de normas de classificação de periculosidade de resíduos sólidos.

Conforme destacado anteriormente, originalmente as normas brasileiras foram desenvolvidas como critérios de aceitação de resíduos sólidos em aterros, em função disso, em geral é sugerido a combinação da caracterização pelas normas brasileiras com outras normas internacionalmente aceitas. Esta estratégia visa melhorar o entendimento do comportamento geoquímico dos materiais investigados.

### **3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS**

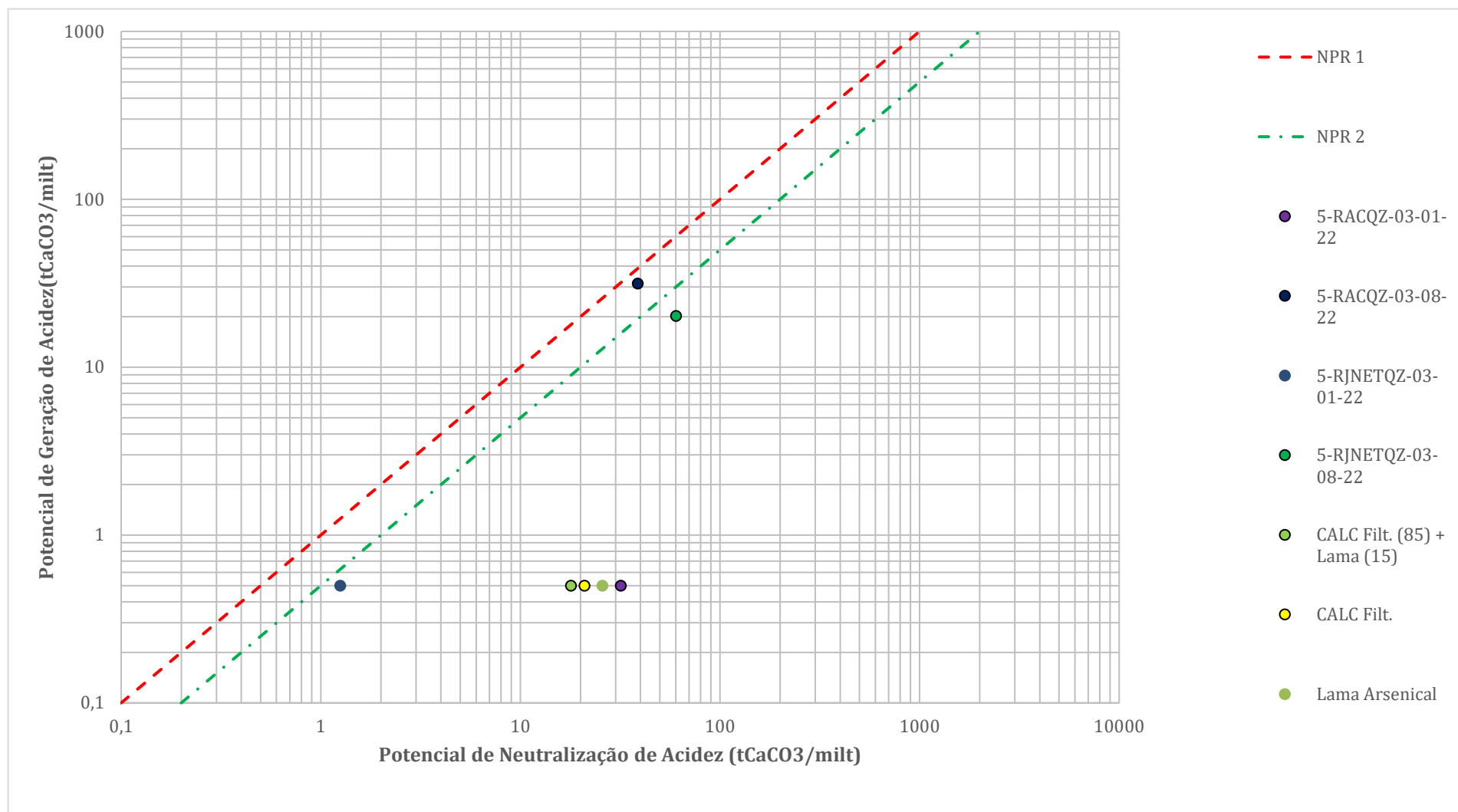
#### **a) Rejeitos: Potencial de Geração de Drenagem Ácida**

Tipologias de rejeitos avaliadas para o período correlacionado.

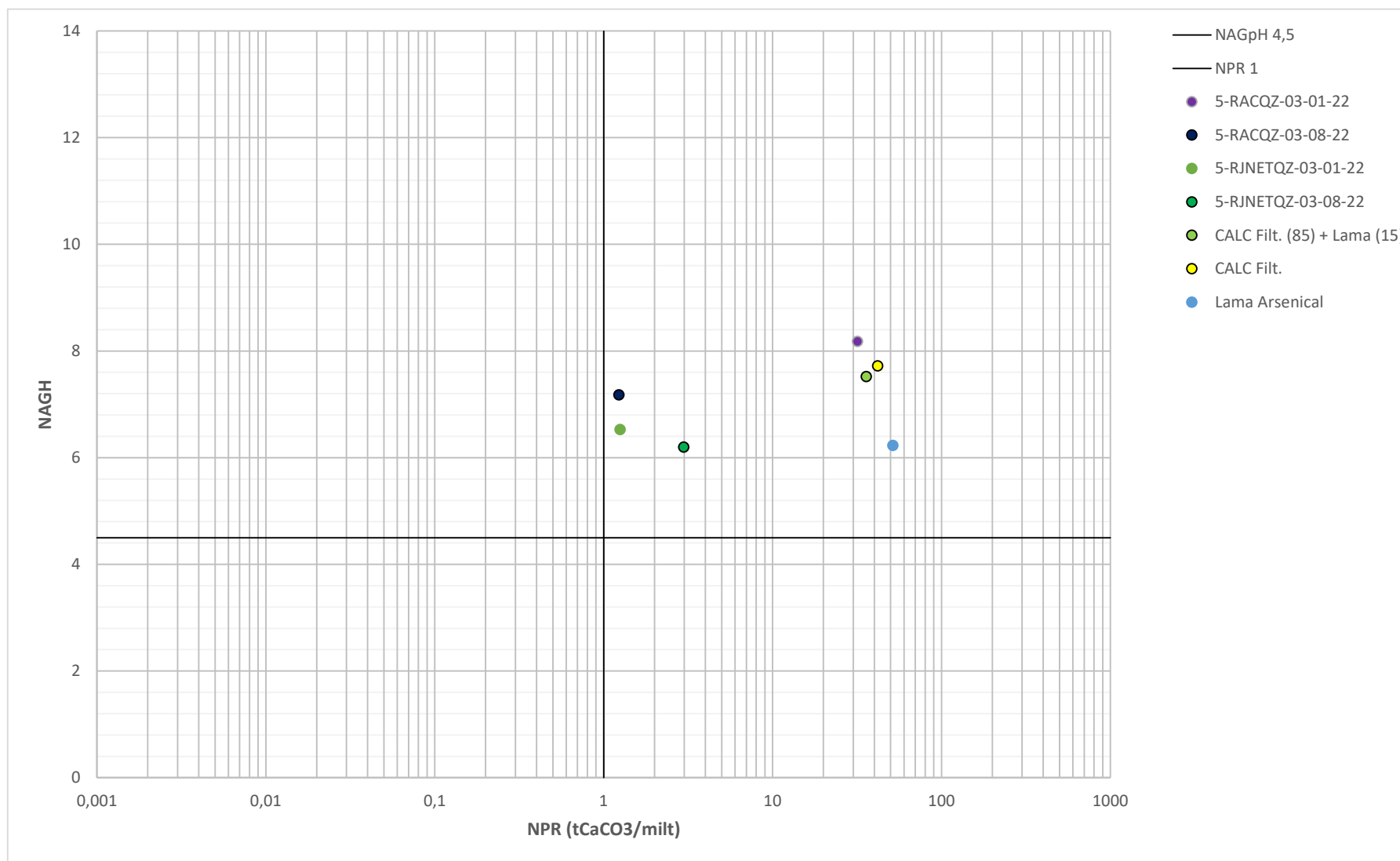
- NET
- RACQZ

Os resultados obtidos no ensaio de avaliação do potencial de geração de drenagem ácida pelo ensaio “MABA” (Modified Acid Base Accounting) estão na Figura 18. Por sua vez, os resultados obtidos no ensaio “NAG” (Net Acid Generation) estão apresentados na Figura 19.

Todos os laudos analíticos correspondentes estão apresentados no ANEXO I.



**Figura 4: Avaliação gráfica do potencial de geração de ácido para valores de NPR para amostras de rejeito (Fonte: MEND, 2009).**



**Figura 5: Critérios de avaliação do potencial de geração de ácido para valores de NAGpH e NPR para amostras de rejeito (Fonte: MEND, 2009).**

Pela Figura 4 que apresenta os resultados do ensaio MABA, pode-se observar que quase todas as amostras se situam na região do gráfico correspondente as amostras não geradoras de acidez. A Figura 5, que apresenta os resultados do ensaio NAG, corrobora com os resultados de MABA para a grande maioria das amostras, mostrando um bom grau de convergência entre os resultados de MABA e NAG.

De maneira geral, os resultados obtidos sugerem que a geração de drenagem ácida não é provável para todos os tipos de rejeitos da Planta do Queiroz. Os resultados ora obtidos, podem estar influenciados por mudanças de rotas de geração dos rejeitos que estão acontecendo na planta do Queiroz. Após estas alterações o programa de caracterização deverá ser revisitado para atualização das características e circuitos dos rejeitos produzidos.

#### **b) Classificação de Resíduos ABNT NBR 10004:2004**

Todas as amostras avaliadas em relação ao seu potencial de geração de acidez foram também avaliadas segundo a NBR ABNT 10.004/2004, e os resultados podem ser sumarizados conforme descrito nas próximas seções. Os laudos obtidos estão também apresentados no ANEXO I. Os parâmetros ou características que levaram cada amostra a receber a referida classificação constam na última coluna das tabelas apresentadas.



**Tabela 1: Classificação das amostras de rejeito analisadas em ensaios de classificação de resíduos:**

Mina	TIPO	Relatório	Nome da Amostra	Classificação	Argumentos e Observações
QZ	REJEITOS	CA 23507/22A1	5-RACQZ-03-08-22	Classe I (Resíduo Perigoso)	Resíduo Perigoso Classe I, pelas seguintes características: 1. O material em questão está contido no Anexo A da norma ABNT 10.004:2004 como Resíduos perigosos de fontes não específicas, com os códigos: a. F014: “Sedimentos de fundo de lagoa de descarga do tratamento de efluentes líquidos do processo de cianetação utilizado nas operações de extração de metais contidos em minérios”, possuindo como constituinte perigoso o Cianeto (complexo), o que lhe confere características de toxicidade; b. F015: “Soluções exauridas que contenham cianeto e sejam provenientes dos banhos utilizados nas operações de extração de metais contidos em minérios”, possuindo como constituinte perigoso o Cianeto (saís), o que lhe garante característica de toxicidade e reatividade. 2. Devido à toxicidade da amostra: O teor de arsênio no extrato lixiviado está acima do VMP. 3. Devido à reatividade da amostra: O teor de cianeto no resíduo está acima do VMP.
QZ	REJEITOS	CA 07922/22A	5-RJNETQZ-03-01-22	Classe I (Resíduo Perigoso)	Resíduo Perigoso Classe I, devido à presença de arsênio no extrato lixiviado acima do VMP.
QZ	REJEITOS	CA 31682/22A1	Lama Arsenical	Classe I (Resíduo Perigoso)	Resíduo Perigoso Classe I, devido à presença de arsênio no extrato lixiviado acima do VMP.
QZ	REJEITOS	CA 31684/22A1	85% Rejeito/Calcinado da Filtragem + 15% Lama	Classe I (Resíduo Perigoso)	Resíduo Perigoso Classe I devido a presença de arsênio no extrato lixiviado acima do VMP.
QZ	REJEITOS	CA 07921/22A	5-RACQZ-03-01-22	Classe I (Resíduo Perigoso)	Resíduo Perigoso Classe I, pelas seguintes características: 1. O material em questão está contido no Anexo A da norma ABNT 10.004:2004 como Resíduos perigosos de fontes não específicas, com o código: a. F015: “Soluções exauridas que contenham cianeto e sejam provenientes dos banhos utilizados nas operações de extração de metais contidos em minérios”, possuindo como constituinte perigoso o Cianeto (saís), o que lhe garante característica de toxicidade e reatividade; 2. Devido à toxicidade da amostra: O teor de arsênio no extrato lixiviado está acima do VMP.
QZ	REJEITOS	CA 23508/22A1	5-RJNETQZ-03-08-22	Classe I (Resíduo Perigoso)	Resíduo Perigoso Classe I, devido à presença de arsênio no extrato lixiviado acima do VMP.
QZ	REJEITOS	CA 31683/22A1	Rejeito/Calcinado da Filtragem	Classe I (Resíduo Perigoso)	Resíduo Perigoso Classe I, devido à presença de arsênio no extrato lixiviado acima do VMP.

### **c) Conclusões e recomendações**

A partir destes resultados obtidos até o momento pode-se concluir que:

- Em relação aos rejeitos, a geração de drenagem ácida, considerando os dados atuais, não é provável nos rejeitos atualmente produzidos na Planta do Queiroz.
- Em relação aos ensaios de classificação dos resíduos, todas as amostras coletadas foram classificadas como Resíduo classe I – Perigosos. Ressalta-se que o rejeito é gerido e controlado conforme sua característica.

#### **4. REFERÊNCIAS**

ABNT NBR 10004:2004 – Procedimento para classificação de resíduos sólidos;

Lei n.º 12.035/2010 – Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos;

MEND REPORT 1.20.1 - Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials - December 01, 2009;

Resolução CONAMA n.º 420/2009 – Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas;

Resolução CONAMA n.º 396/2008 – Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências;

Resolução CONAMA n.º 357/2005 – Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes;

## **5. ANEXO I: LAUDOS ANALITICOS**