

MINING
LAB
BEGINNINGS

IV Edição

DESAFIOS

DESAFIO 1

Novas Aplicações para o Rejeito de Aripuanã

DESAFIO 2

Novas Aplicações do rejeito de Pirita

DESAFIO 3

Produção de bio-briquetes

DESAFIO 4

Redução do efeito corrosivo do bio-óleo

nexa



Tema: Economia Circular

DESAFIO 1

Novas Aplicações para o Rejeito de Aripuanã

A Nexa tem em seu DNA a Economia Circular, a prova disso são os projetos desenvolvidos na unidade de Juiz de Fora, em que é feita a reciclagem de resíduos de outras empresas no processo Waelz para a recuperação de zinco. Em Vazante/Morro Agudo, onde é obtido o concentrado de zinco, tem-se como coprodutos os concentrados de Pb/Ag e o zinal para correção de acidez do solo.

Para este desafio é buscada uma solução para a unidade localizada em Aripuanã, onde o foco é a mineração, que transforma o minério em concentrado de zinco, cobre e chumbo. O ROM – “Run of mine”, minério antes do beneficiamento –, possui características de um depósito Volcanogenic Massive Sulfide (VMS), com recorrência de carbonatos e cherts (rocha sedimentar de sílica microcristalina, formada principalmente por quartzo).

O beneficiamento do ROM retirado da mina, deve passar pelas seguintes etapas: cominuição, flotação, espessamento e filtragem. A seguir serão descritas de forma simplificada as etapas demonstradas na Figura 1.

I - É feita a cominuição do material para se alcançar a granulometria homogênea das partículas, preparando para as etapas de flotação onde o diâmetro das partículas é um fator relevante para o processo de separação dos metais desejados. Primeiro, o ROM passa por um britador, depois em um moinho SAG e, por fim, em um moinho de bolas, onde é adicionado água no processo.

II - A primeira flotação acontece com o objetivo de separar a parte do ROM que contém talco (OF – overflow) da parte em que se encontram os metais pesados (UF – underflow). O OF é levado diretamente para o espessador e, em seguida, para o filtro-prensa. Estes dois processos são responsáveis pelo depósito a seco de resíduos. O UF gerado rico em metais pesados segue para a etapa III.

III - Na segunda flotação, o material de interesse é o cobre, que sai no OF do flotador presente na etapa III. Para realizar a concentração dele, utiliza-se um espessador e um filtro-prensa. O UF gerado no flotador, contendo outros metais, é direcionado para a etapa IV.

IV - Aqui, tem-se a terceira flotação, com o OF contendo maior concentração de chumbo, que também passam pelo espessador e filtro-prensa para retirar a umidade em excesso do material. O UF restante segue para o terceiro flotador que irá selecionar o zinco na etapa V.

V - Por fim, é feita também a flotação do material proveniente do UF da etapa anterior. No flotador mostrado em V se tem o OF com maior concentração de zinco, ele é conduzido para os próximos equipamentos que assim, como anteriormente, retiram a umidade. O UF dessa etapa é o rejeito dos metais pesados que é misturado no espessador (VI) e que contém o OF do talco. Assim, o UF desse espessador (VI) é levado para o filtro-prensa para a realização do depósito à seco do rejeito.

Ressalta-se que os efluentes gerados no overflow de todos os espessadores são direcionados para a estação de tratamento, onde parte da água tratada é reutilizada no processo ou para outras atividades na unidade.

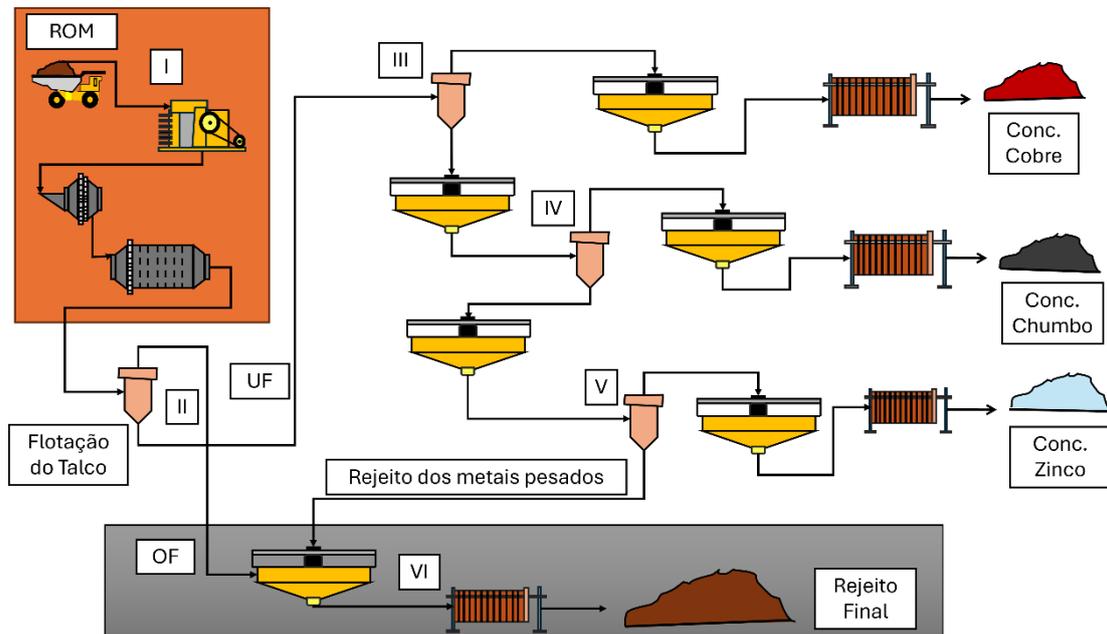


Figura 1: Fluxograma simplificado de Aripuanã.

O resíduo final gera cerca de 1,9 Mt/ano, sendo 90% da sua composição mássica proveniente do rejeito dos metais pesados, além disso, possui umidade entre 15-20%. A caracterização mineralógica do rejeito da flotação do talco demonstra que ele é formado, principalmente, por talco, galena, calcita, clorita, tremolita-actinolita e pirrotita. Já o rejeito dos metais pesados é formado, majoritariamente, por quartzo, mica, calcita, clorita, tremolita-actinolita, pirrotita e dolomita. Nas Tabelas 1, 2 e 3 tem-se a composição mineralógica e química aproximada do resíduo gerado em Aripuanã.

Tabela 1: Rejeito proveniente do overflow da flotação do talco.

Rejeito do talco	
Mineral	Composição mássica aproximada (%)
Talco	70
Galena	5

Calcita	2
Clorita	2
Tremolita-actinolita	10
Pirrotita	2

Tabela 2: Rejeito proveniente do underflow da flotação do zinco.

Rejeito dos metais pesados	
Mineral	Composição mássica aproximada (%)
Quartzo	40
Clorita	14
Mica	10
Dolomita	10
Tremolita-actinolita	5
Pirrotita	2

Tabela 3: composição química do rejeito final.

Elementos Químicos	Quantidades
SiO ₂ (%)	40-45
Fe (%)	10-14
Al ₂ O ₃ (%)	7-10
Mg (%)	5-8
S (%)	3-5
Pb (%)	0,20-0,40
Cu (%)	0,20-0,40
Ag (ppm)	6-8
Cd (ppm)	20-50

Assim, alinhado com suas práticas ESG a Nexa busca desenvolver novas rotas de tratamento para os três tipos de rejeito: o primeiro rico em talco; o segundo, obtido durante a flotação do zinco rico em quartzo e, o terceiro, a mistura de todos os resíduos do processo, rico em dióxido de silício.

Dificuldades e riscos envolvidos:

- Logística - unidade localizada em Aripuanã - Mato Grosso;
- Considerar restrições físico-químicas do material;
- Considerar problema de drenagem ácida que pode existir em função de características do material.



Tema: Economia Circular

DESAFIO 2

Novas Aplicações do rejeito de Pirita

A Unidad Minera de Cerro Lindo (a seguir designada por "U.M. Cerro Lindo") é uma mina subterrânea polimetálica propriedade da Nexa Resources Peru S.A.A. (a seguir designada por "NEXA"), localizada no distrito de Chavin, província de Chinchá, departamento de Ica, Peru, a cerca de 268 km a sudeste de Lima. Situa-se a uma altitude média de 1.825 metros acima do nível do mar.



Figura 2: Localização da U.M. Cerro Lindo

A U.M. Cerro Lindo desenvolve atividades de exploração mineira e de beneficiamento mineral, gerando como resíduos rejeitados, caracterizados principalmente pelo seu significativo teor de pirita, silicato e, em menor escala, de barita.

A **Figura 3** mostra o fluxo de processamento do minério desde a fase de flotação em massa até à produção de concentrados de Cu, Pb, Zn e os rejeitos finais.

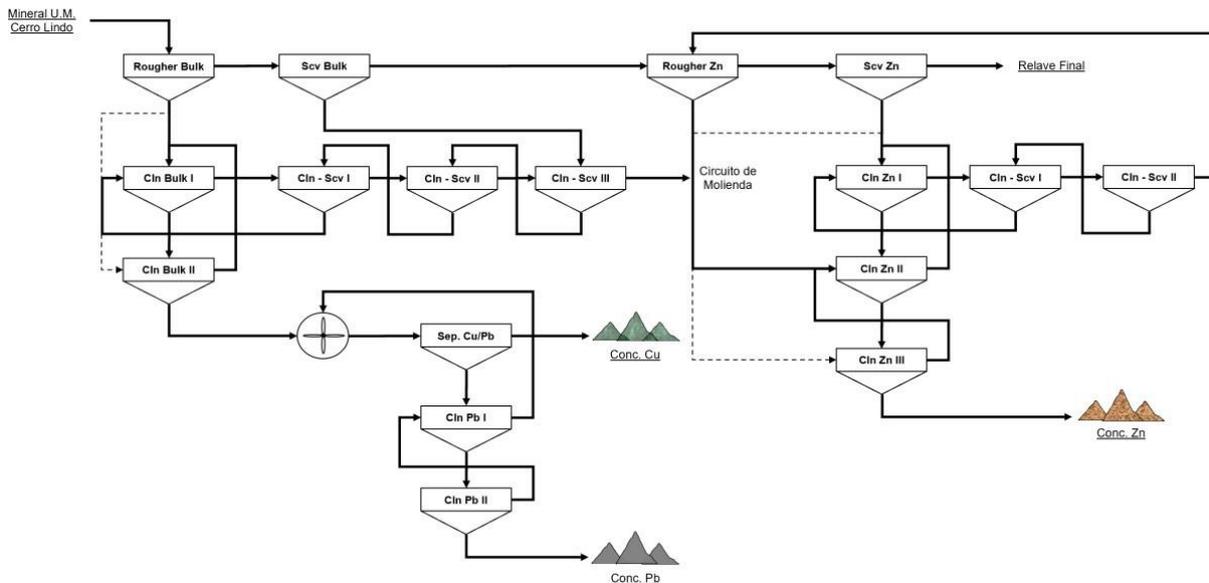


Figura 3: Diagrama do processo da U.M. de Cerro Lindo, fase de flotação

A tecnologia de disposição do rejeito é feita seco, ela envolve uma fase de espessamento e filtração para atingir níveis de umidade que variam entre 12% e 14%.

Cerca de 50% dos rejeitos filtrados são enviados para aplicação em aterro de mina (Backfill), sendo os restantes depositados em pilhas¹. Esses depósitos de rejeitos filtrados (DRF) necessitam periodicamente de obras para prolongar sua vida útil e garantir a continuidade do processo produtivo.



Figura 4: Depósito Pahuaypite II, U.M. Cerro Lindo

A **Tabela 4** mostra a caracterização química do minério principal da U.M. de Cerro Lindo, enquanto as tabelas **5, 6 e 7**² mostram as caracterizações químicas dos rejeitos.

Tabela 4: Análise química do minério principal da U.M. de Cerro Lindo

Fluxo	Oz/tn Ag	% Pb	% Cu	Zn	% Fe
Minério Principal	0.84	0.20	0.55	1.14	24.38

¹ São gerados mensalmente cerca de 461 kt de rejeitos, dos quais 230 kt são depositados no depósito de rejeitos filtrados (DRF).

² Todas as análises químicas apresentadas referem-se ao rejeito fresco da U.M. Cerro Lindo.

Tabela 5: Análise química dos rejeitos da U.M. de Cerro Lindo

Fluxo	Oz/tn Ag	% Pb	% Cu	Zn	% Fe
Rejeito	0.21	0.05	0.06	0.1	24.90

Tabela 6: Análise ICP - OES para o rejeito de Cerro Lindo

Fluxo	Ag, ppm	Al, %	As, ppm	Ba, ppm	Be, ppm	Bi, ppm	Ca, %
Rejeito	4.0-8.0	3.0-5.0	50.0-80.0	350.0-380.0	0.5-0.8	<5	0.4-0.7
Fluxo	Cd, ppm	Co, ppm	Cr, ppm	Cu, ppm	Fe, %	Ga, ppm	K, %
Rejeito	2.0-6.0	0.4-0.6	110.0-140.0	650.0-690.0	>15.0	<10	0.5-2.0
Fluxo	La, ppm	Mg, %	Mn, ppm	Mo, ppm	Na, %	Nb, ppm	Ni, ppm
Rejeito	<0.5	0.4-0.7	350-380	2.0-5.0	0.3-0.7	<1	9.0-13.0
Fluxo	P, %	Pb, ppm	S, %	Sb, ppm	Sc, ppm	Sn, ppm	Sr, ppm
Rejeito	0.01-0.05	560.0-580.0	>10.0	18.0-24.0	2.0-5.0	<10.0	60.0-90.0
Fluxo	Ti, %	Tl, ppm	V, ppm	W, ppm	Y, ppm	Zn, ppm	Zr, ppm
Rejeito	0.02-0.06	5.0-8.0	40.0-50.0	<10.0	2.0-5.0	700.0-1000.0	20.0-30.0

Tabela 7: Difração de raios X para os rejeitos da U.M. de Cerro Lindo

Nome do mineral	Fórmula geral	Resultado aproximado (%)
Pirita	FeS ₂	46
Quartzo	SiO ₂	
Mica (moscovite)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	
Plagioclásio (Oligoclásio)	(Na,Ca)(Al,Si) O ₄₈	10
Clorito (Clinochore)	(Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	
Feldspato - K (Ortoclásio)	KAlSi O ₃₈	
Barita	BaSO ₄	
Mica (Biotite)	K(Mg,Fe) ₃ [AlSi O ₃₁₀ (OH,F) ₂	
Gesso	CaSO ₄ .2(H ₂ O)	<L.D.
Calcite	CaCO ₃	<L.D.
Andaluzia	Al ₂ SiO ₅	<L.D.

Alinhado com os objetivos ambientais, sociais e de governança (ESG) da empresa, em que a economia circular é considerada um dos pilares fundamentais, a NEXA está à procura de soluções para a utilização dos rejeitos da bacia de Cerro Lindo, cujo principal componente é a pirita.

- I. Utilizar os rejeitos ou a pirita diretamente como matéria-prima para aplicações industriais;

- II. Acondicionar os rejeitos ou a pirita, por tratamento hidrometalúrgico, pirometalúrgico ou outro, de modo a poderem ser utilizados como matéria-prima numa aplicação industrial.

Trabalhos anteriores:

A Nexa tem procurado soluções para a reutilização da pirita no âmbito da economia circular. As soluções que têm sido trabalhadas são:

- **Tratamento de efluentes industriais através da aplicação da pirita como adsorvente de metais pesados advindos de rejeitos de flotação:**

Com o objetivo de reutilizar a pirita, tendo em conta as suas características adsorventes, foram realizados ensaios para a criação de um novo produto à base de pirita (uma formulação de pirita com carvão ativado) para o mercado da adsorção. A prova de conceito foi realizada para um efluente sintético (contendo uma mistura de íons de Cu^{2+} , Zn^{2+} e Mn^{2+}) e para um efluente da Nexa. A partir dos resultados com o efluente sintético, concluiu-se que a formulação (pirita/carvão ativado (CA)) a pH 9 consegue remover até 99% de cobre e zinco quando juntos e até 42% de manganês, presentes no efluente sintético.

Os resultados obtidos até ao momento são encorajadores, demonstrando a viabilidade da formulação (pirita/CA) para o tratamento de efluentes industriais e a identificação de condições adequadas para a sua implementação. No entanto, são necessários mais testes para demonstrar a estabilidade da formulação durante o tratamento de outros efluentes.

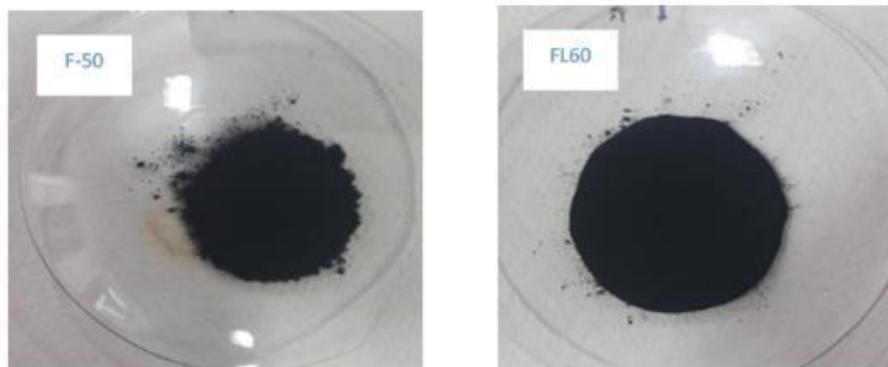


Figura 5: Formulação da pirita com carvão ativado, tipos F50 e F60

- **Sais de ferro:**

O objetivo é reutilizar a pirita dos rejeitos para produzir sulfatos férricos. O desenvolvimento do projeto começou com a avaliação química da pirita (FeS_2) para a sua conversão em pirrotita (FeS), seguida de ensaios de síntese hidrotérmica utilizando a pirrotita precursora (FeS) para obter sais de ferro como o sulfato de ferro (II) heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{SO}_4$), brometo de ferro (III) (FeBr_3), cloreto de ferro (III) (FeCl_3) e fosfato de lítio e ferro (LiFePO_4).

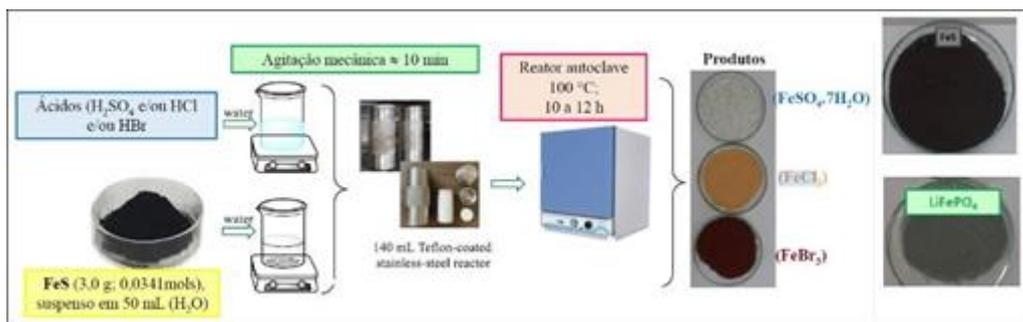


Figura 6: Processo de obtenção de sais de ferro a partir do precursor pirrotite (FeS) e de diferentes ácidos inorgânicos

Este é o desafio do Mining Lab Beginnings 2024! Procuramos soluções inovadoras que permitam a reutilização dos rejeitados da U.M. Cerro Lindo, transformando-o num insumo viável para a criação de um novo produto comercializável no mercado, promovendo assim a sua reutilização no âmbito da economia circular. Procuramos propostas que acrescentem valor, bem como outras estratégias que melhorem os trabalhos anteriormente estudados.

REFERÊNCIAS

1. http://www.scielo.org/bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602019000200002
2. https://www.researchgate.net/publication/7159507_Cu2_Cd2_and_Pb2_adsorption_from_aqueous_solutions_by_pyrite_and_synthetic_iron_sulphide
3. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91664>



Tema: Descarbonização

DESAFIO 3

Produção de bio-briquetes

A Nexa é uma empresa que atua na produção de zinco, desde a prospecção mineral à produção do zinco metálico. Suas unidades estão localizadas no Brasil e no Peru e são divididas entre minas e smelters (refinarias). Nas refinarias, ocorre o recebimento de minério e outras matérias primas que são utilizadas para a produção do zinco metálico e seus derivados. Além disso, há a necessidade de consumo de combustíveis gasosos, líquidos e sólidos. Dentre os combustíveis sólidos está o bio-briquete de carvão vegetal.

Tal material provê parte da energia e do carbono necessários para o processo de recuperação de zinco. Esta é uma etapa pirometalúrgica chamada de processo Waelz. Neste processo, a matéria prima contendo zinco é alimentada com combustível sólido, o coque grosso, para que haja aquecimento e reações de redução a temperaturas próximas à 1100 °C.

O processo baseia-se na redução do minério/resíduos e na volatilização do zinco e de outras substâncias. O material sólido final que não volatiliza, a escória, é resfriado na saída do forno e descartado. Os gases contendo o Zn são destinados pela depressão no forno a um sistema para tratamento, onde são resfriados para solidificação do material e posterior captação em filtros de manga. O material recuperado é o óxido Waelz (rico em zinco e chumbo).

O forno se divide em cinco seções distintas, onde a carga (chamado de mix ou de blend) passa por zonas de tratamento até a sua zona de reação. São elas: Zona úmida ou de Secagem do material, Zona de Pré-aquecimento e Combustão, Zona de Pré-reação, Zona de Reação Principal e Zona de Saída de Escória.

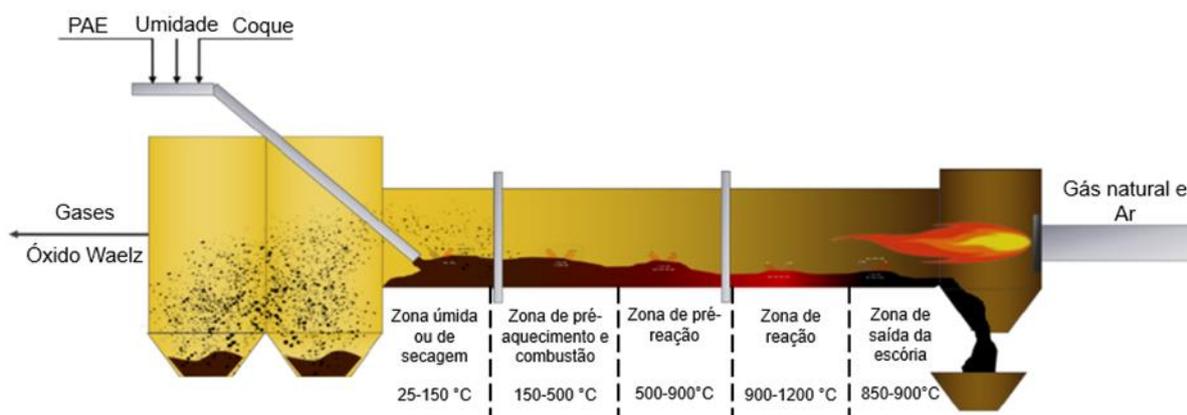


Figura 7: Forno Waelz

A zona úmida ou de secagem é a seção inicial do forno Waelz, onde são introduzidos o pó de aciaria (PAE) e o coque. Esta zona é caracterizada pelo seu maior teor de umidade, pois os materiais podem conter água ou outros componentes voláteis. A zona de secagem serve para remover a umidade da matéria-prima e prepará-la para processamento posterior. O aumento de temperatura da carga sólida vem do contato com os gases aquecidos vindos das zonas mais quentes do forno. A temperatura nesta zona sobe de 25 a 150 °C.

Após passar pela zona úmida, a matéria-prima entra na zona de pré-aquecimento e combustão. Nesta seção, a matéria-prima é aquecida gradativamente por meio de gases quentes gerados pela combustão do combustível advindo das zonas mais quentes. O processo de pré-aquecimento eleva a temperatura dos materiais, permitindo-lhes atingir a temperatura de reação desejada para as etapas subsequentes. A temperatura nesta zona sobe de 150 a 500 °C.

A zona de pré-reação segue a zona de pré-aquecimento e combustão e é onde a matéria-prima parcialmente aquecida sofre uma transformação térmica e química. Os halogênios e alguns sais começam a volatilizar devido à temperatura estar acima dos 500 °C. Nesta zona, os componentes voláteis, tais como os compostos orgânicos, são eliminados, enquanto os materiais contendo ferro e zinco começam a reagir com o presente material carbonáceo contido. Esta etapa de pré-reação prepara a matéria-prima para a reação principal na zona subsequente. A temperatura nesta zona sobe de 500 a 900 °C.

A zona de reação é a região principal do forno Waelz, onde ocorrem as principais reações químicas. Aqui, as altas temperaturas facilitam a redução do óxido de zinco a zinco metálico. Óxidos de ferro são reduzidos em grande parte nesta etapa. O material carbonoso e o CO atuam como agentes redutores, reagindo com o óxido de zinco para produzir vapor de zinco. Outros materiais, como chumbo e cádmio, também podem sofrer volatilização ou formar compostos estáveis. A temperatura nesta zona sobe de 900 a 1200 °C.

A seção final do forno Waelz é a zona de descarga de escória. Após as reações principais na zona de reação, os materiais restantes, incluindo as impurezas não voláteis e a escória solidificada, são descarregados do forno. Nesta etapa todas as reações de redução estão terminadas e há reoxidação do ferro. O ar que entra na boca do forno recebe muita energia das reações de reoxidação e da escória para aumento de temperatura. A escória sai do forno com a temperatura entre 850 e 900 °C.

Alinhada com as práticas ESG, a Nexa tem buscado combustíveis biogênicos para a substituição do coque grosso no processo Waelz. Uma alternativa promissora são os bio-briquetes, que podem ser produzidos a partir desses resíduos biogênicos. No entanto, o desenvolvimento de novos combustíveis biogênicos para o processo Waelz é bastante desafiador, devido as características inerentes ao processo e ao combustível utilizado, listadas abaixo, e a manutenção do rendimento do processo.

Características do Forno Waelz:

- Comprimento do forno
- Rotação
- Inclinação
- Zonas de reação
- Alimentação de Zn
- Zn presente na escória
- Rendimento metálico

Características do Combustível:

- Alto teor de carbono fixo
- Poder calorífico
- Reatividade do combustível
- Resistência mecânica

No decorrer dos últimos anos a Nexa desenvolveu o bio-briquete que veio como solução de processamento do carvão para sua alimentação. Tal briquete é composto por carvão vegetal moído aglomerado com alcatrão. A produção envolve a etapa de mistura, briquetagem e cura do material para garantir carbono fixo e dureza.

Este é o desafio do MLB 2024: novas sugestões para produção de bio-briquetes alternativos. Tal briquete precisa ter resistência térmica (ser pouco reativo para fornecer energia e carbono a 900-1000 °C). Além disso, precisa ter alta resistência à compressão comparado com o coque para resistir à rotação e às primeiras zonas do forno Waelz.

O bio-briquete foi desenvolvido de forma a ter as características apresentadas na **Tabela 8**.

Tabela 8: Características do coque grosso e do bio-briquete

Insumos	Carbono fixo (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Umidade (%)	Enxofre (%)	PCI (Gcal/t)	Resistência mecânica (kgf)
Coque grosso	90,7	9,3	1,4	12,8	6	8,2	20,4
Bio-briquete de carvão vegetal	70,0	28,3	1,7	1,6	0,034	7,12	19,3

Podem ser analisados briquetes com novas fontes de biomassa e com novos aglomerantes.

Sugestão de aglomerantes: Água, Dextrina, amido.

Sugestão de biomassa: Casca de vegetais (café, arroz), bagaço de cana.

A considerar:

Além dos aspectos técnicos, outros fatores devem ser avaliados no desenvolvimento das soluções, como:

- Viabilidade do custo de produção do bio-briquete proposto;
- Logística, disponibilidade e suprimento de matérias primas para a produção dos insumos energéticos;
- Considerar as possíveis adequações no processo existente que se façam necessárias;
- Regulamentações para transporte, armazenamento e manuseio de combustíveis sólidos.

REFERÊNCIAS

- Referência 1: Modelo Termodinâmico para o forno Waelz. Bruno Henrique Reis.

<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/134579/000986995.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Referência 2: Coque verde de petróleo. Petrobras

<https://petrobras.com.br/documents/2677942/3190768/Coque-Informacoes-Tecnicas.pdf/de752329-56f3-1910-9c7e-82d3b82b953a?version=1.0&t=1691773222000&download=true>

- Referência 3: Aglomerantes:

<https://professoralucianekawa.blogspot.com/2014/07/os-aglomerantes.html#:~:text=Os%20aglomerantes%20podem%20ser%20classificados,%2C%20o%20cimento%20Portland%2C%20etc>

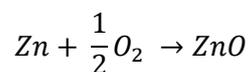


Tema: Descarbonização

DESAFIO 4

Redução do efeito corrosivo do bio-óleo

O ZnO, composto químico de cor branca amplamente utilizado na produção de tintas, produtos farmacêuticos, cerâmicos, dentre outros, é produzido pela Nexa. O processo é baseado na volatilização do Zn metálico e oxidação dos vapores formados, como descrito na **Equação 1**.



Equação 1: Síntese de óxido de zinco.

O processo produtivo de óxido de zinco é composto por 47 fornos tipo cadinho, podendo ser visto na **Figura 8**, dispostos em quatro baterias conforme mostra a **Figura 9**. Neste tipo de forno o material a ser aquecido não tem contato com os gases de combustão. A chama formada pela combustão envolve todo o cadinho e os gases de combustão gerados são removidos pela chaminé do forno, enquanto o material a ser vaporizado se encontra isolado dentro do cadinho. A temperatura interna na câmara de combustão pode atingir mais de 1.200°C. O óxido é formado pela reação do vapor de zinco com o oxigênio presente no ar ambiente e é captado por dois circuitos de despoeiramento (primário e secundário), sendo em seguida retido em filtros de mangas. A energia não utilizada diretamente para volatilização do zinco metálico é dissipada para atmosfera e o óleo combustível utilizado atualmente é, principalmente, o combustível fóssil.

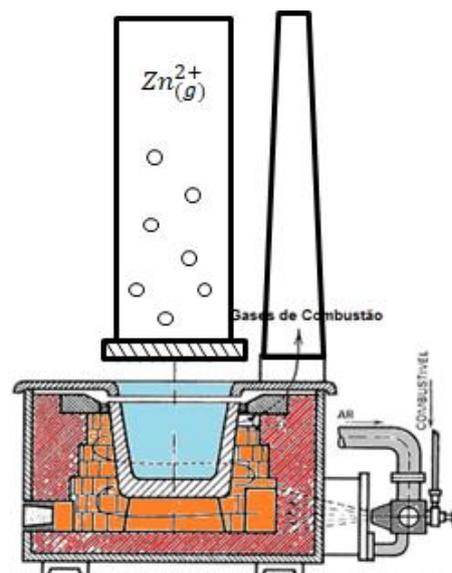


Figura 8: Forno de produção de ZnO



Figura 9: Bateria de fornos de produção de Oxido de Zinco

A Nexa, como parte de sua estratégia, está sempre buscando novos parceiros e oportunidades para flexibilizar sua matriz energética, testando novos óleos alternativos e visando uma operação mais eficiente, sustentável e segura. Um dos combustíveis utilizados como alternativa é o bio-óleo.

O bio-óleo é a fração líquida da pirólise rápida (< 2 segundos) de biomassa em um reator a temperatura média de 500 °C (degradação térmica). Os gases pirolíticos que saem junto com o material particulado (carvão vegetal ou bio-carvão) passam por um ciclone (recuperação dos sólidos = bio-carvão). Os gases limpos sem carvão são submetidos a um

condensador para precipitação da fração líquida da fumaça pirolítica, essa fração líquida divide-se em duas, uma leve (cadeias curtas) e outra pesada (cadeias pesadas).

O bio-óleo bruto é composto por mais de 200 componentes químicos, em geral, hidrocarbonetos ricos em oxigênio de cadeias curtas - ácidos carboxílicos, alcanos, alcenos, e de cadeias pesadas equivalentes aos óleos minerais (olefinas e parafinas). O alto teor de oxigênio em sua formulação química implica em duas características básicas:

- **Acidez** – Tem baixo pH exigindo instalações de armazenamento, bombeio e distribuição usando aço inox;
- **Estabilidade** – Com a elevação da temperatura, os componentes mais leves tendem a volatilizar em temperaturas menores que 100 °C e permitem reações que geram outros compostos químicos. Por isso, deve-se armazenar e utilizar o óleo em temperaturas menores que 90 °C.

Para este desafio são esperadas propostas que envolvam uma das duas rotas tecnológicas mencionadas a seguir e/ou uma medida adicional para atender a Nexa, sendo elas:

- **Rota 1: Planta de pirólise** – instalar planta de pirólise rápida de biomassa utilizando cavaco de eucalipto para geração de bio-carvão e bio-óleo. O primeiro pode ser utilizado no Forno Waelz na unidade Nexa Juiz de Fora. Já o bio-óleo bruto, após a destilação, se divide em bio-óleo pesado e leve. O que possui característica pesada, após aditivação, é enviado à fábrica de óxido de zinco. E o bio-óleo leve, após a destilação, se transforma em licor pirolenhoso podendo ser vendido ao mercado agrícola como herbicida, fungicida, ou ainda, pode ser beneficiado para se transformar em fumaça líquida para indústria de alimentos;
- **Rota 2: Uso do alcatrão vegetal da indústria siderúrgica** – Minas Gerais é o maior produtor de carvão vegetal do mundo. A maior utilização deste carvão é para a redução de óxido de ferro em alto-fornos, cujo maior polo é a cidade de Sete Lagoas. No processo de carvoejamento, tradicionalmente são utilizadas retortas horizontais de alvenaria que podem ou não ter várias unidades conectadas entre si por galerias de alvenaria até uma chaminé onde os gases pirolenhos são queimados ou descartados direto na atmosfera. Parte destes gases podem ser recuperados por centrifugas na base das chaminés se liquefazendo em forma de alcatrão vegetal. Nas galerias subterrâneas também existe decantação da fumaça formando o alcatrão que pode ser bombeado. O processo de carvoejamento é considerado tecnicamente como uma pirólise lenta a baixa temperatura (350 °C);
- **Medida Adicional** – apresentação de novas possibilidades de separação de finos presentes no bio-óleo utilizado atualmente.

Doravante, utilizaremos o termo bio-óleo (Ver **Figura 10**) tanto para o óleo de pirólise via pirólise rápida como para o alcatrão da carbonização (pirólise lenta) considerando o acréscimo de etanol visando a melhora da viscosidade e do pH.

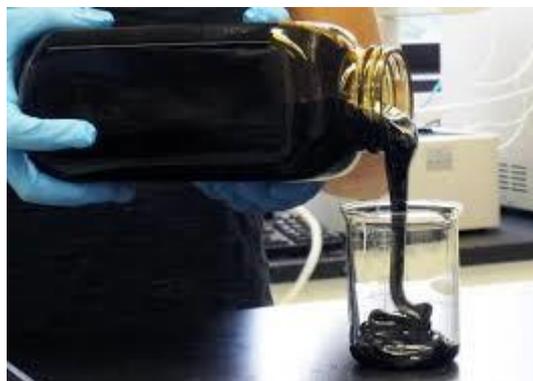


Figura 10: Bio-óleo de pirólise rápida de biomassa

Em ambos os processos, uma etapa de destilação e filtração pode ser incluída a fim de melhorar a qualidade do insumo. Já a transformação desta substância em bio-óleo, como visto, envolve duas etapas: filtração e aditivação de etanol.

As principais características do bio-óleo são vistas na Tabela 9, na qual é possível comparar suas propriedades em relação aos dois combustíveis derivados de petróleo utilizados atualmente no processo produtivo. Resultados de análises laboratoriais no Laboratório de Energia e Combustíveis (LEC) da UFMG.

Tabela 9: Características do bio-óleo e óleos derivados de petróleo

		Bio-óleo	BTE	BPF
Composição elementar (b.s.)		APERAM/WT	BRASKEM	PETROBRAS
C	%	56,5	81,6	77,1
H	%	6,6	12,3	18,2
O	%	35,8	0,0	2,8
N	%	0,4	1,5	1,9
Outros	%	0,9	0,3	0,0
Enxofre	<i>mg / kg</i>	0,170	0,610	5,787
Umidade	%	11,8%	0,12%	
Densidade	<i>kg / m3</i>	1.150	1.064	1.014
Poder Calorífico Inferior	<i>kcal / kg</i>	5.409	9.200	9.650

Rotas tecnológicas estudadas:

Desde 2018 a Gerência de Inovação em Energia da Nexa desenvolve projeto de P&D Testes Industrial na Bateria IV utilizando bio-óleo com amostras de várias características dos combustíveis como teor de águas, cinzas, poder calorífico, teor de aditivo e viscosidade.

Para isto se dispôs de um skid de combustão que dispõe de monitoramento e controle de temperatura (óleo, ar e chaminé), pressão (óleo e ar), medição de fluxo (óleo e ar), resistências de aquecimento em tanques e linhas de óleo, e tanques de armazenamento de óleo a frio e a quente.

Tipo de bio-óleo: Foram testados bio-óleos elaborados a partir da biomassa de eucalipto, como:

- **Bio-óleo bruto** – Óleo com frações leves e pesadas da pirolise rápida de biomassa, sem aditivos;
- **Bio-óleo destilado** – Óleo destilado a 200 °C, eliminando água e concentrando componentes pesados (mais carbono e hidrogênio) e maior poder calorífico, porém com mais viscosidade. Pode ser aditivado;
- **Bio-óleo pesado aditivado** – Fração pesada do bio-óleo sem destilação aditivado.

A opção escolhida nos testes é usar o bio-óleo pesado aditivado. Este combustível, atualmente, encontra-se em operação em uma bateria produtiva identificada como número IV da fábrica. Sua operação envolve o aquecimento do bio-óleo, transporte em tubulações pressurizadas e mistura com ar atmosférico a uma pressão do ar mínima de 800mmca.

O desafio do Mining Lab Beginnings envolve o desenvolvimento de soluções que reduzam o efeito corrosivo do biocombustível e permitam a utilização de equipamentos feitos ou revestidos com aço carbono. Além disso, poderá ser avaliado como medida adicional novas possibilidades de separação de finos presentes no bio-óleo.