



**XXXVII**  
**Plenária Ordinária**  
**Biomassas em risco**  
5 e 6 – dezembro/2019 – Aracaju/SE

**U F *m* G**

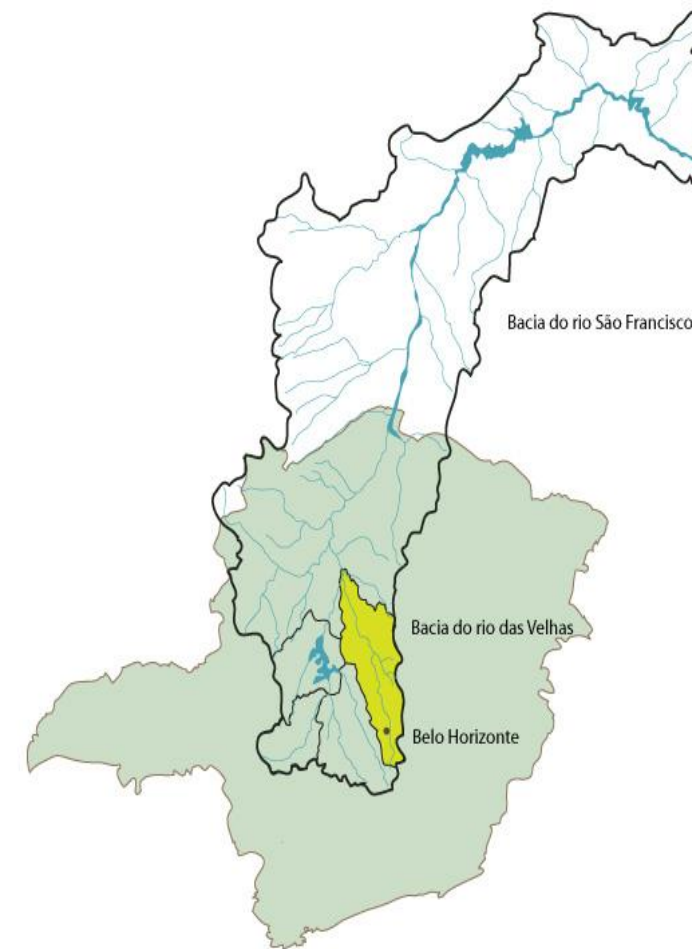
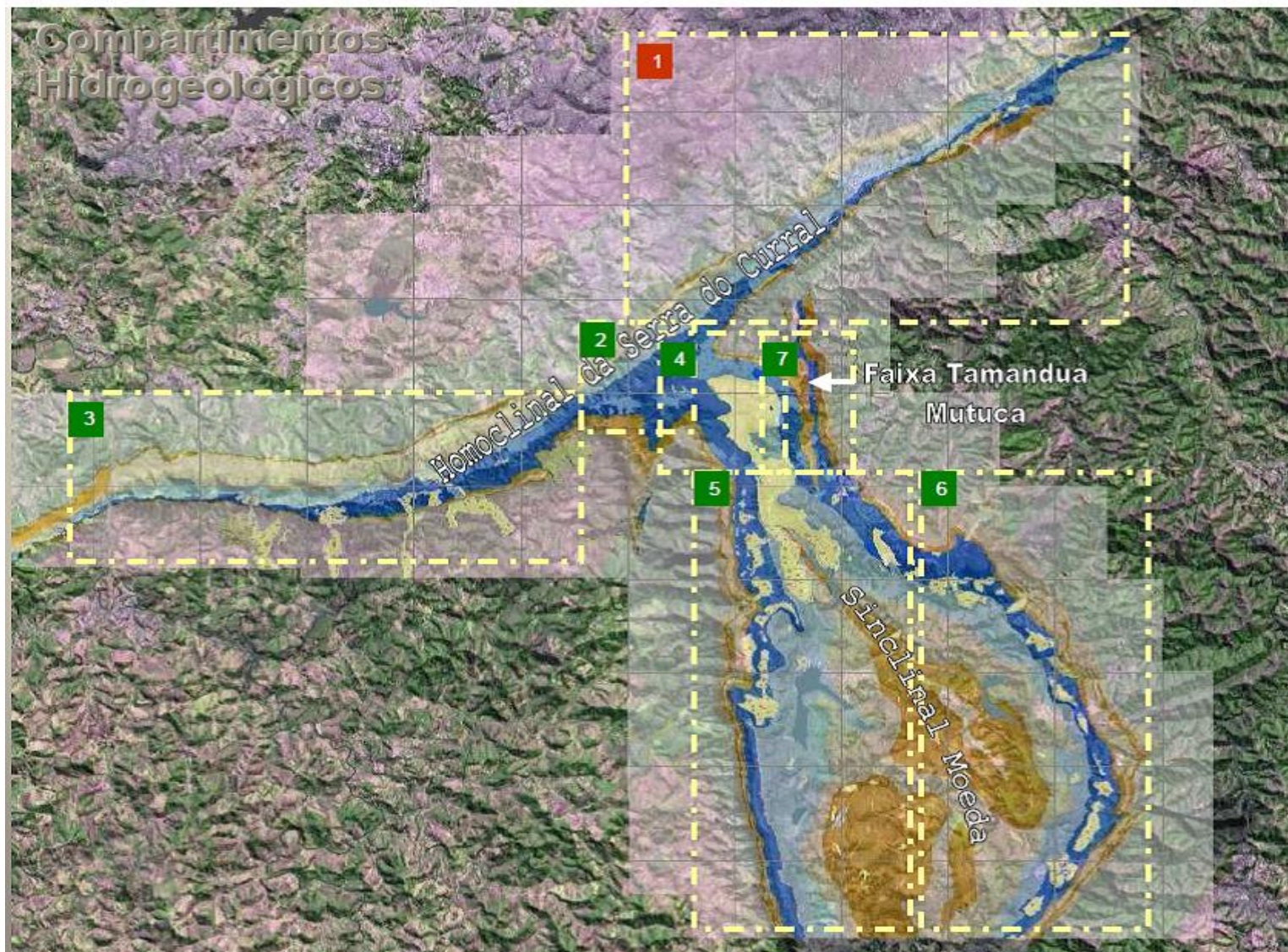
- Evandro Moraes da Gama Engenheiro de Minas formado na UFMG 1979 MSc- University of Minnesota - USA 1983 D Ing - Geol de Eng - INPL França - 1988 Pesquisador Senior V IPT - 1996 Pós DoC Kobe - Japão. (1997)
- Geólogo de Engenharia - Hidrogeólogo - Engenheiro de Minas
- Terra Viva Recuperação de rejeitos Minerais - Diretor Técnico
- Professor Titular do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG EEUFMG Professor na Graduação e Pós Graduação
- Autor de 289 artigos técnicos publicados no Brasil e Exterior
- Orientador de Mestrado e Doutorado

#### Patentes da UFMG

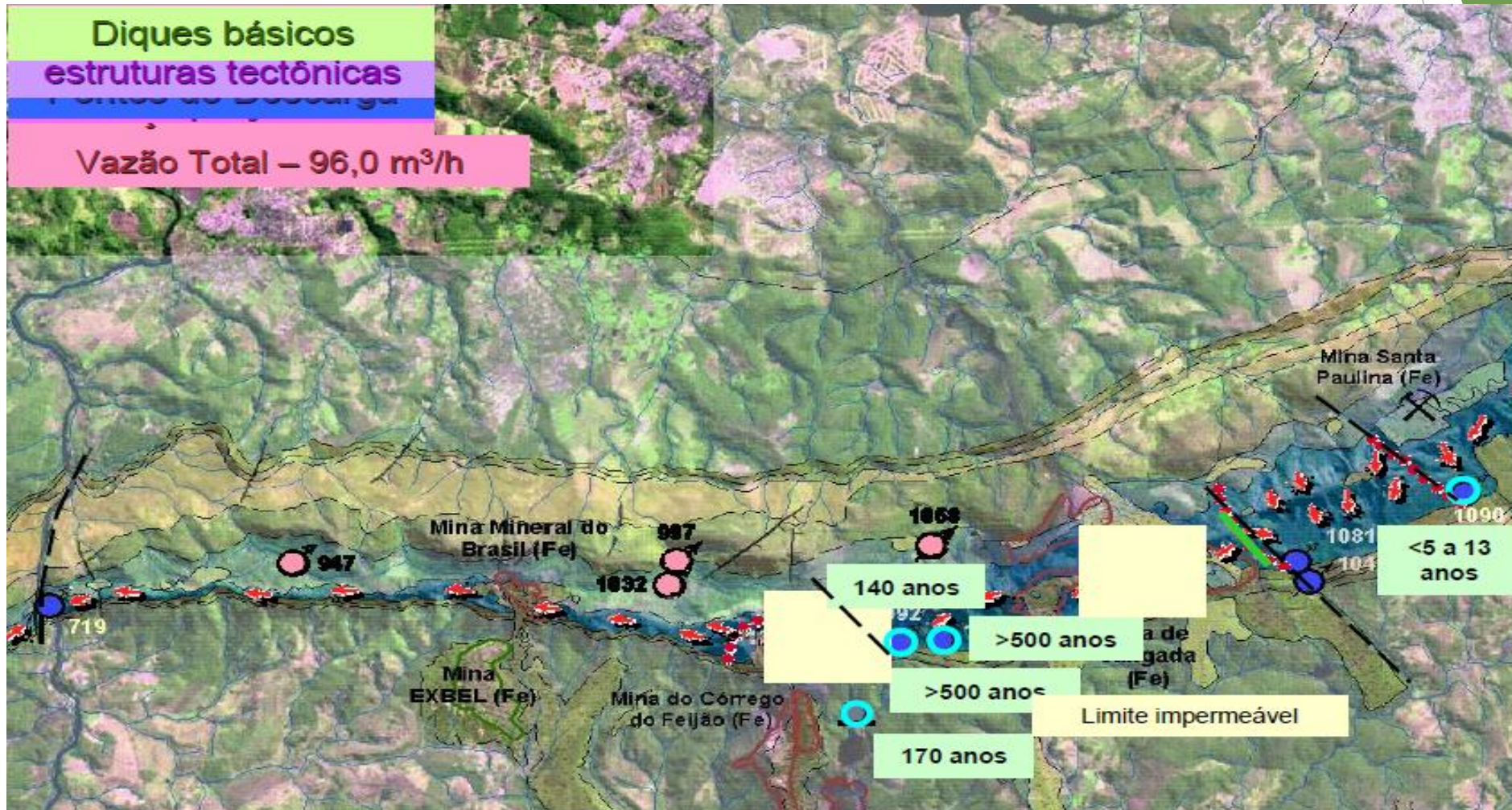
Monitoramento de barragens e escavações subterrâneas PI PATENTE PI0203210-4 Data: 07/05/2002. Processo de preparação de aglomerante de alta resistência a partir do tratamento de rejeitos e estéreis de mineração.: PI 0604142-6 Data: 31/08/2006. Produção de agregado artificial a partir de rejeitos pelotizados de barragens . BR 102016017627 28/-7/2016.

- Autor do Capítulo Hidrogeologia e os Geossistemas Ferruginosos. Livro . Geossistemas Ferruginosos do Brasil.2015
- Editor do livro - Os coprodutos da Mineração de ferro para uma economia sustentável - 2019.
- Autor do capítulo Tratamento de resíduos da mineração de ferro para produção de pozolana - Universidade de Campinas - 2019
- Consultor do MPF e ANM
- Pesquisador do INCT ÁQUA
- Autor de 289 artigos técnicos publicados no Brasil e Exterior
- Membro da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas ABAS

A possível substituição por empilhamento a seco prevê depósitos de rejeitos drenados em áreas de recarga em toda a região do município de Macacos. Depósitos com 200 metros de espessura vão impedir a recarga de aquífero.

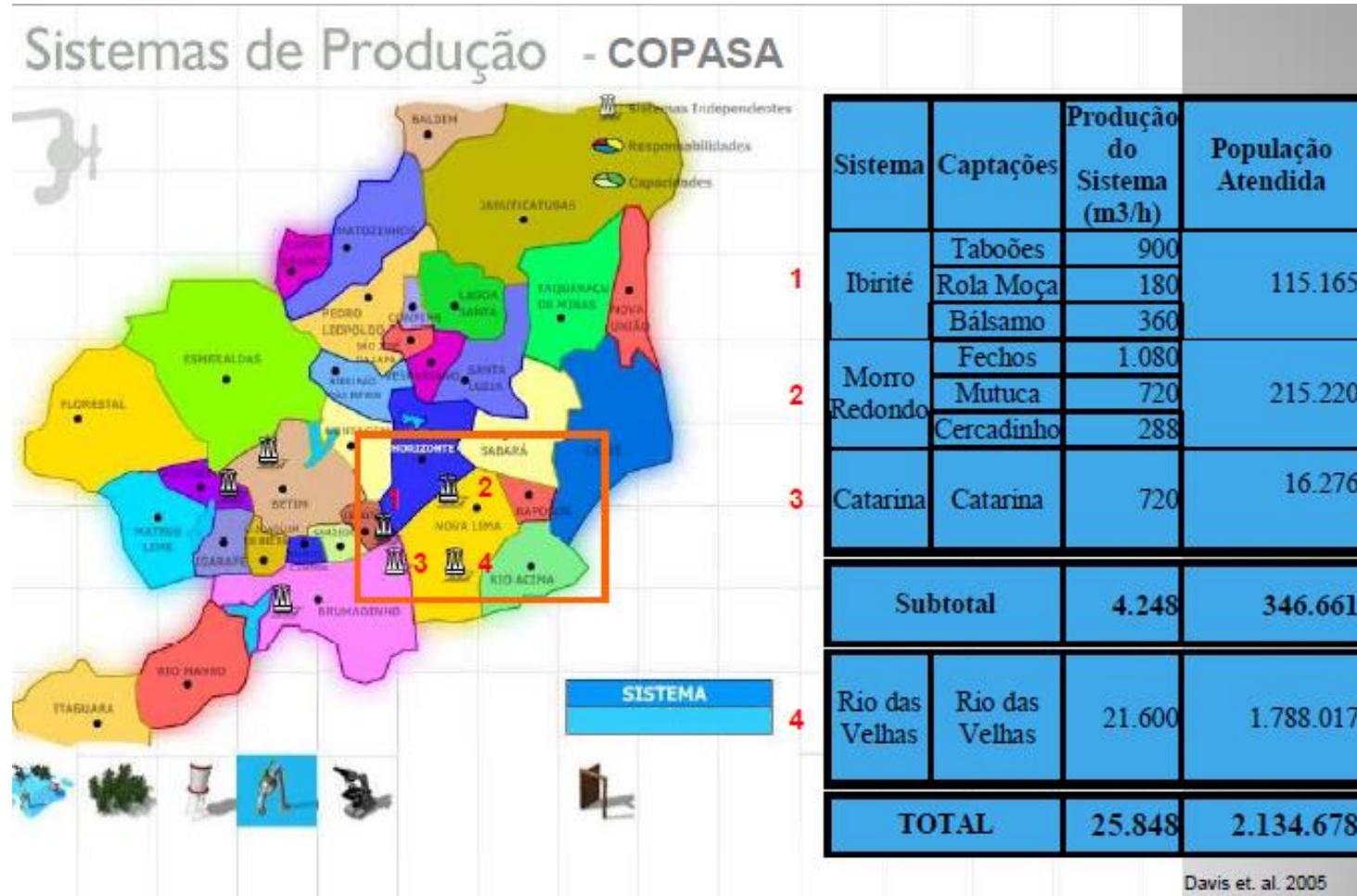


# Modelo Hidrológico para o aquífero cauê

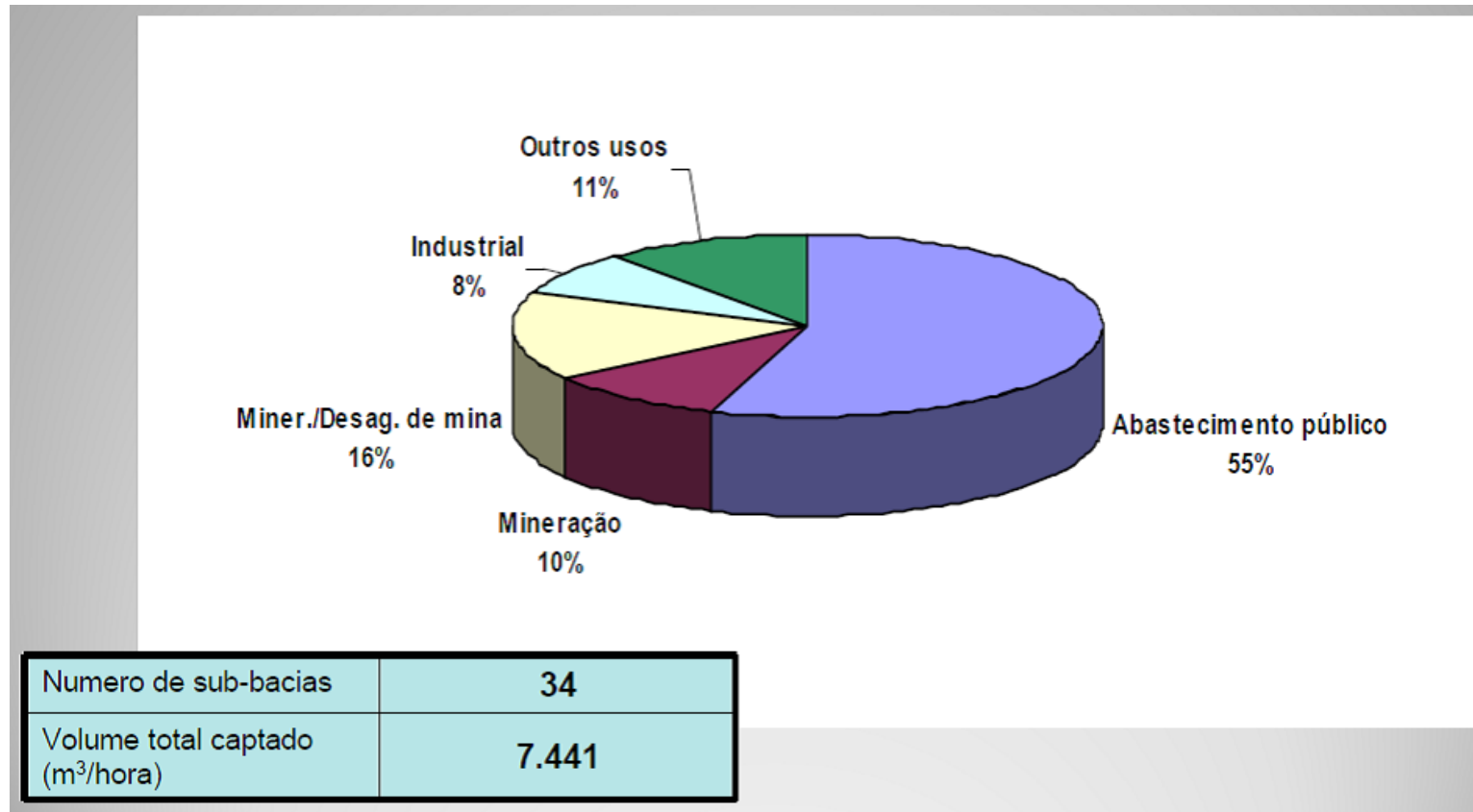


Segmento ocidental da Serra do Curral

# Modelo Hidrológico para o aquífero cauê



# Modelo Hidrológico para o aquífero cauê

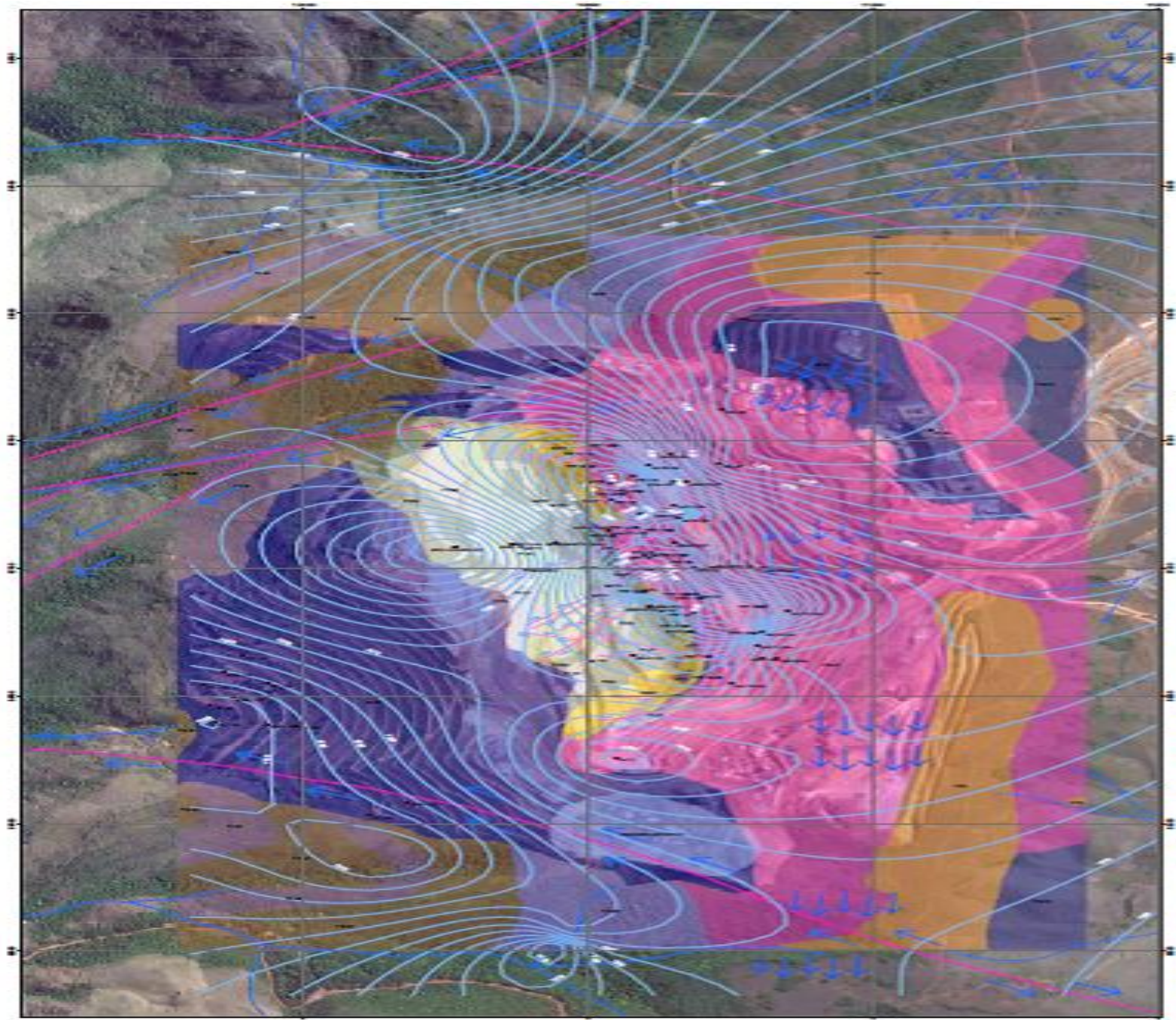


Captação e Usos da Água

# Estudo de caso: Mina Pau branco

- ▶ O resultado do balanço hídrico para o período de 12 meses dezembro de 2008 a dezembro de 2009 é mostrado no quadro abaixo

CONCEITOS	Pluviometria	Evapo transpiração	Defluvio	Infiltração	Varição da agua retida no sub solo
unidade	mm/dia	mm/dia	mm/dia	mm/dia	mm/dia
	680	2,94	1,14	255,00	420,92



1:5 000

0 50 100 150 200 metros

NUGEO - ESCOLA DE MINAS / UFOP  
Mestrado Profissional em Engenharia  
Geotécnica aplicada à Mineração

Dissertação de Mestrado  
**MODELO HIDROGEOLOGICO  
CONCEITUAL DO MACIÇO DE FILITOS  
DO TALUDE OESTE DA  
MINA PAU BRANCO**

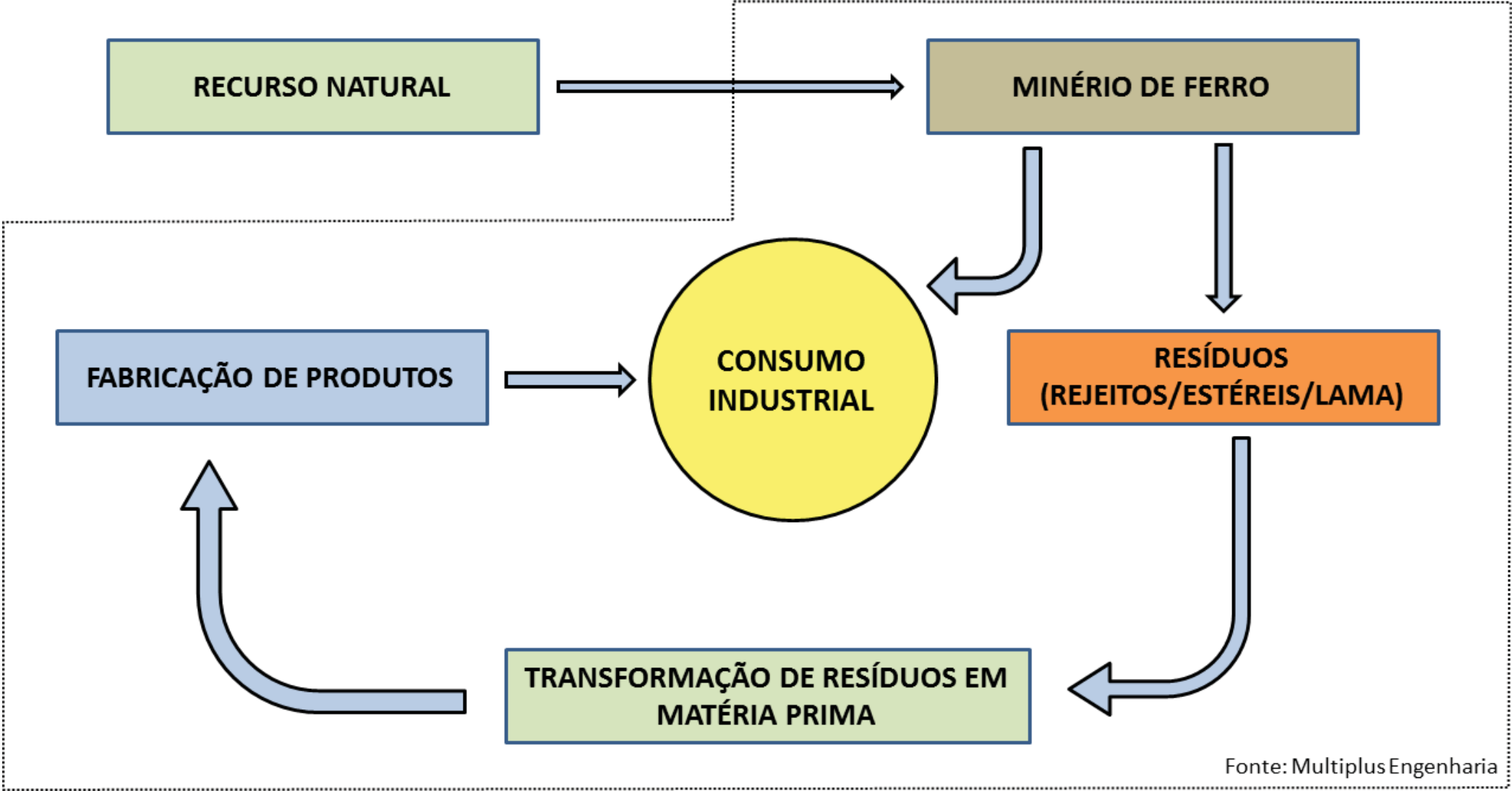
Autor: Flávio Leocádio da Anuniação  
Orientador:  
Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar

**Modelo Hidrogeológico Conceitual**  
Direção de fluxo subterrâneo no flanco oeste do  
Sítio/Macizo de Norte para Sul;  
Presença de falhas regionais que interceptam  
direções locais de fluxo;  
Descarga dos aquíferos geralmente associadas à  
falha regional;  
As camadas de Metachert intercaladas nos filitos  
de baixa permeabilidade formam zonas favoráveis  
ao armazenamento de água no interior do macizo;  
Trinca de fratura no topo do talude a desfecho do  
processo de deformação por empilhamento que  
favoreceu o armazenamento de água;  
Fluxo de infiltração de falhas com presença de brechas  
permeáveis com maior permeabilidade do que as  
camadas de filito interceptadas por estas falhas;  
Disposição de retilhos de beneficiamento sobre a  
falha Pau Branco favorecendo a recarga dos  
aquíferos interceptados pela falha regional;  
A lava escoada em forma de cavas, apresenta um  
aumento da recarga dos aquíferos, principal-  
mente os aquíferos da Formação Capão, que abrange a  
maior parte da cava, mas também pode ocorrer a  
recarga dos aquíferos na Formação Sapatá.

- Legenda:**
- Contorno FA Regional
  - Hidrografia**
  - Hidrografia
  - Hidrografia
  - Falhas e lineamentos**
  - Falhas regionais COORMIN 2005
  - Falhas mapeamento UFOP 2012
  - Velocidade de direção do fluxo subterrâneo**
  - Velocidade de Fluxo - Aquífero Capão
  - Velocidade de Fluxo - Falha Regional
  - Velocidade de Fluxo - Falha Local
  - Área do aquífero desativado
  - Litologia**
  - A10 - Areia
  - C01 - Canga Laterítica
  - C02 - Filito Colúrio
  - F01 - Filito Dourado / Metachert
  - F02 - Filito Escurecido
  - F03 - Filito Verde
  - F04 - Filito Sulfúreo
  - F05 - Formação Sapatá
  - F06 - Formação Capão
  - F07 - Formação Grandiosa
  - F08 - Formação Moeda
  - F09 - Filito Sulfúreo / Grafítico
  - H01 - Havereta Fina
  - M01 - Dique de rocha meta-óxica
  - M02 - Metachert
  - S01 - Sequência Transicional - Sapatá / Capão



# Economia circular - Terra Viva - Recuperação de rejeitos Minerais



Fonte: Multiplus Engenharia

Barragens e depósitos de estéreis existem pois são necessários a produção exemplo do aço e derivados, mas tratados de forma pouco produtiva, acabam sendo um risco para a vida humana e para o meio ambiente. Como podemos transforma-los em coprodutos , **produzindo a economia circular?**

- As barragens de lama e os depósitos de estéreis possuem substâncias em comuns, argila, areia e o ferro. As argilas podemos transformar em cimento, a areia podemos selecionar e usar para fabricação de vidros, concreto, argamassas, pavimentação de estradas o ferro podemos tratar para fabricação do aço.
- A nossa empresa possui tecnologia para fazer tratar estas substancias, a base está no conhecimento mineralógico profundo e na transformação mineralógica, através da utilização do calor a baixas temperaturas e as minúsculas partículas que compõem as lamas e os estéreis.
- O processo básico consistem em retirar a água da argila e do ferro , pois na forma que estão depositados não podem ser utilizados e não produziriam cimento nem o ferro para o aço.
- Nosso processo consiste em calcinar estes materiais a baixas temperaturas transformando a mineralogia original em mineralogia amorfa . Esse processo é feito a seco e intitulado de **CALCINAÇÃO FLASH** .

# Estimativa de perdas pelo rompimento da barragem de Fundão

Estima-se a que a Samarco tenha, até 2019, cerca de R\$ 37,6 bilhões

## Estimativa de Perdas - Samarco

Para mensurar o impacto do rompimento da barragem de resíduos de Fundão na Samarco, foram levantados: os prejuízos com os lucros cessantes decorrente da parada de operação de toda a empresa; as provisões, reversões e despesas com recuperação socioambiental e socioeconômica; as despesas e aportes na Fundação Renova, constituída para reparar os danos causados pelo rompimento da barragem; e as multas provenientes de recuperação ambiental e socioambiental.

Estima-se que, até 2019 a Samarco Mineração S.A. tenha perdido cerca de **R\$ 37,6 bilhões** por conta do rompimento da barragem de resíduos de Fundão. Os dados foram corridos pelo IPCA e ajustados a valor presente pela taxa de desconto de 10,24% a.a.

Estimativa do Impacto Financeiro pelo rompimento da barragem de Fundão – Samarco Mineração S.A.  
R\$'MM – Data base jun/2019

Estimativa de Perdas - Rompimento da Barragem do Fundão						
	2015 <sup>1</sup>	2016	2017	2018	2019	Total
Lucros Cessantes	(945,2)	(5.144,6)	(4.666,8)	(4.233,3)	(3.840,0)	(18.830,0)
Provisão (Reversão) para recuperação socioambiental e socioeconômica	(14.522,8)	4.605,0	(5.469,7)	3.191,2	-	(12.196,3)
Despesas com recuperação socioambiental e socioeconômica	(213,2)	(2.771,5)	(688,5)	(161,6)	-	(3.834,8)
Despesas Fundação Renova	-	(341,7)	(63,3)	(0,4)	-	(405,4)
Aporte Fundação Renova	-	-	-	(2.305,1)	-	(2.305,1)
Multas provenientes recuperação ambiental e socioambiental	-	-	(7,2)	-	-	(7,2)
<b>Total</b>	<b>(15.681,3)</b>	<b>(3.652,8)</b>	<b>(10.895,5)</b>	<b>(3.509,2)</b>	<b>(3.840,0)</b>	<b>(37.578,7)</b>

# Investimento em Barragens: Caso Forquilha V

Investimento de R\$718,81 milhões permite a disposição total de 88,2 milhões de toneladas de resíduos

## Investimento em barragem de resíduos

Visando conceituar o custo de uma barragem de resíduos, foram levantados os dados da barragem Forquilha V, localizada em **Ouro Preto, MG**, e propriedade da Vale S.A.

O dique inicial da barragem foi um investimento total de R\$ 238 milhões em 2010, equivalente **R\$ 398 milhões** em valor ajustado.

O projeto prevê a construção de 8 alteamentos. No total, esta barragem permite a disposição de 42MMm<sup>3</sup> de resíduos, que possuem densidade de 2,1 ton/m<sup>3</sup>, totalizando uma capacidade **de 88,2MM toneladas** de resíduos.

Considerando os custos com gestão de barragens e alteamentos (R\$ 3,63/ton), o investimento total na barragem de resíduos Forquilha V é de aproximadamente R\$ 718,81 milhões.

Investimento e característica da barragem Forquilha V

Barragem	Capacidade Total	Capex	Gestão de Barragens	Alteamentos	Investimento Total
• Forquilha V	• 88,2 MM ton	• R\$ 398 milhões	• R\$ 171,23	• R\$ 148,93	• R\$ 718,81 milhões

## **Custo de construção e manutenção dos depósitos de estéreis**

Os depósitos de estéreis ocupam áreas maiores que as barragens. Nesses depósitos os estéreis francos, como filito e metabasicas das minerações de ferro são depositados. Áreas 300 hectares a 3000 hectares onde temos matas, nascentes drenagens e áreas de recarga pluvial são tomadas por depósitos de estéreis. O risco de ruptura é controlado pois não temos água, porém o constante carregamento de finos dos depósitos para drenagens naturais e áreas de recarga, são uma ameaça a água subterrânea consequentemente às nascentes.

O custo para se manter um depósito de estéreis envolve

- Carga e descarga com retro escavadeiras
- Arranjo das pilhas de estéreis com trator de esteira
- Transporte de carga utilizando caminhões
- Manutenção e conformação constante das pilhas
- O custo para uma produção de estéril da ordem de 8 milhões t/ ano é da ordem de 12 milhões de reais

## Estéreis e Rejeitos – Definições e Desafios

**Rejeitos de mineração** : Materiais deixados após o processo de separação da fração valiosa da fração não-econômica de um minério. São compostos por materiais diversos como fragmentos de rochas, material arenoso, polpa argilosa, lamas e fluidos – Depositados em barragens

**Estéreis de Mineração** : Os estéreis, por outro lado, são rochas residuais que se sobrepõem, se intercalam ou hospedam o minério ou corpo mineral e devem ser removidas para liberar a extração (lavra) do corpo de minério, sendo necessariamente deslocadas durante a mineração sem serem processadas e obrigatoriamente depositadas em depósitos de estéreis.

### MINAS GERAIS

**2015 → 20 maiores mineradoras de ferro no QF ( produção > 800.000 t/ano )**

**Tonelagem estocada até 2015 em barragens e diques 112 Mm<sup>3</sup> ( 1,6 t/m<sup>3</sup>) = 295 MT**

**Tonelagem estocada até 2015 em depósitos de estéreis 183 MT**

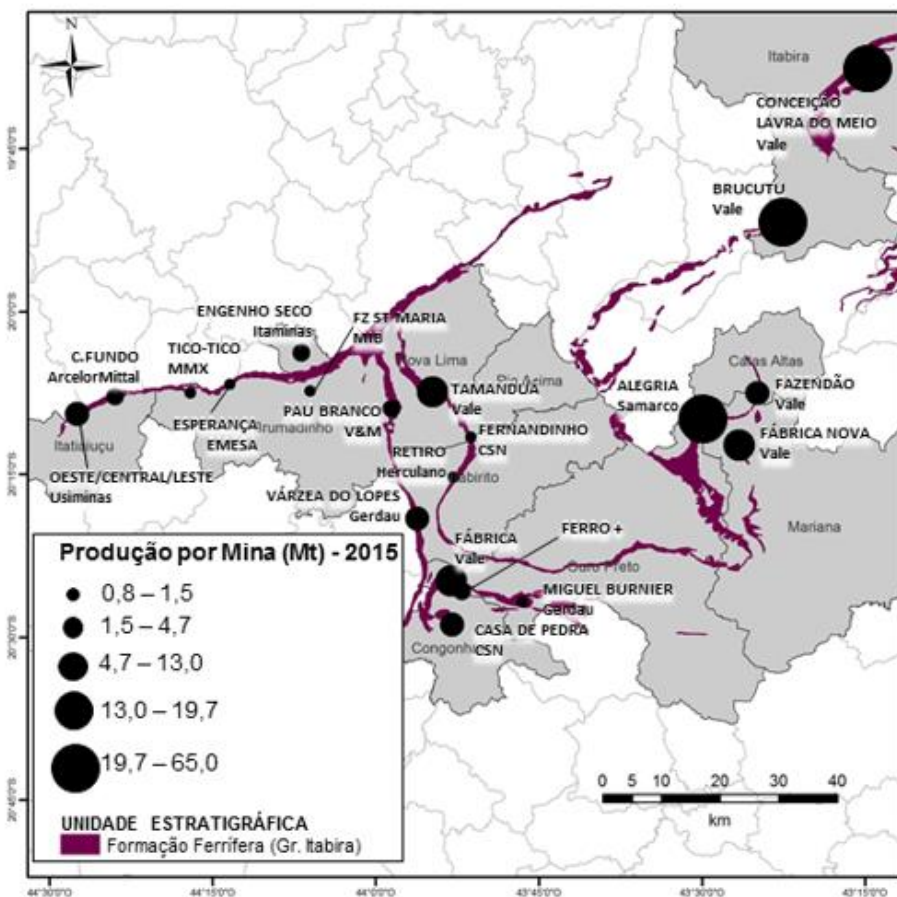
**DNPM – RAL**

### BRASIL

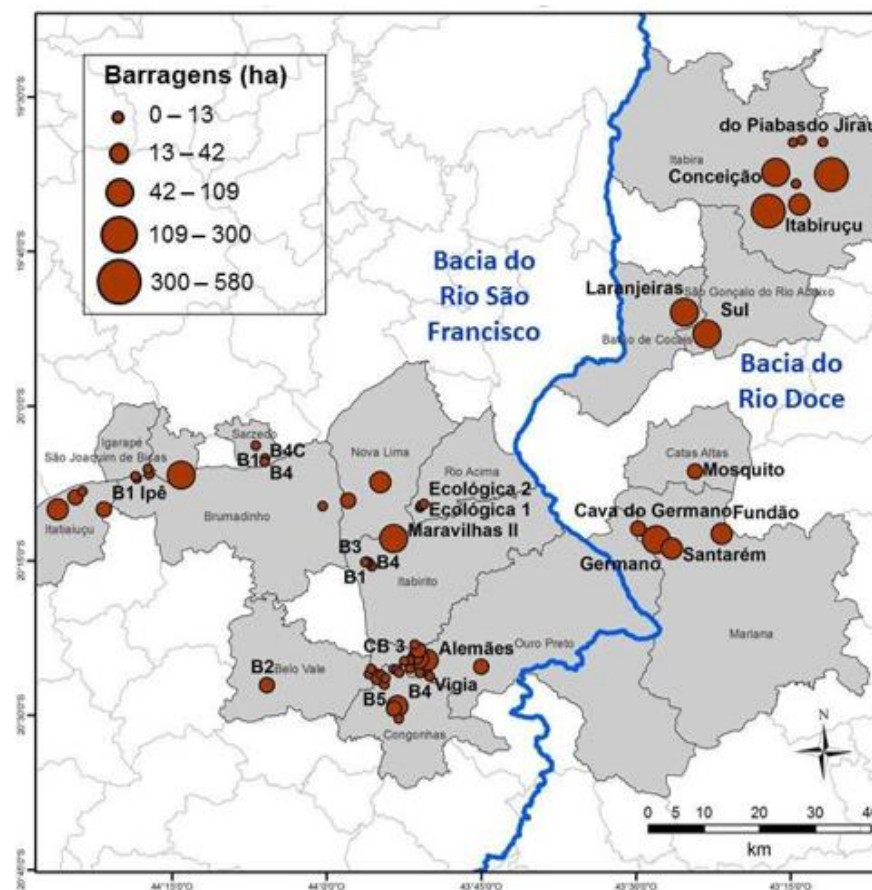
2010 a 2030 → Produção Rejeitos de Mineração de Ferro: 4,72 Bilhões de Toneladas

2010 a 2030 → Produção de Todos Rejeitos de Mineração: 11 Bilhões de Toneladas

## Principais Minas e Barragens no Quadrilátero Ferrífero (maiores)



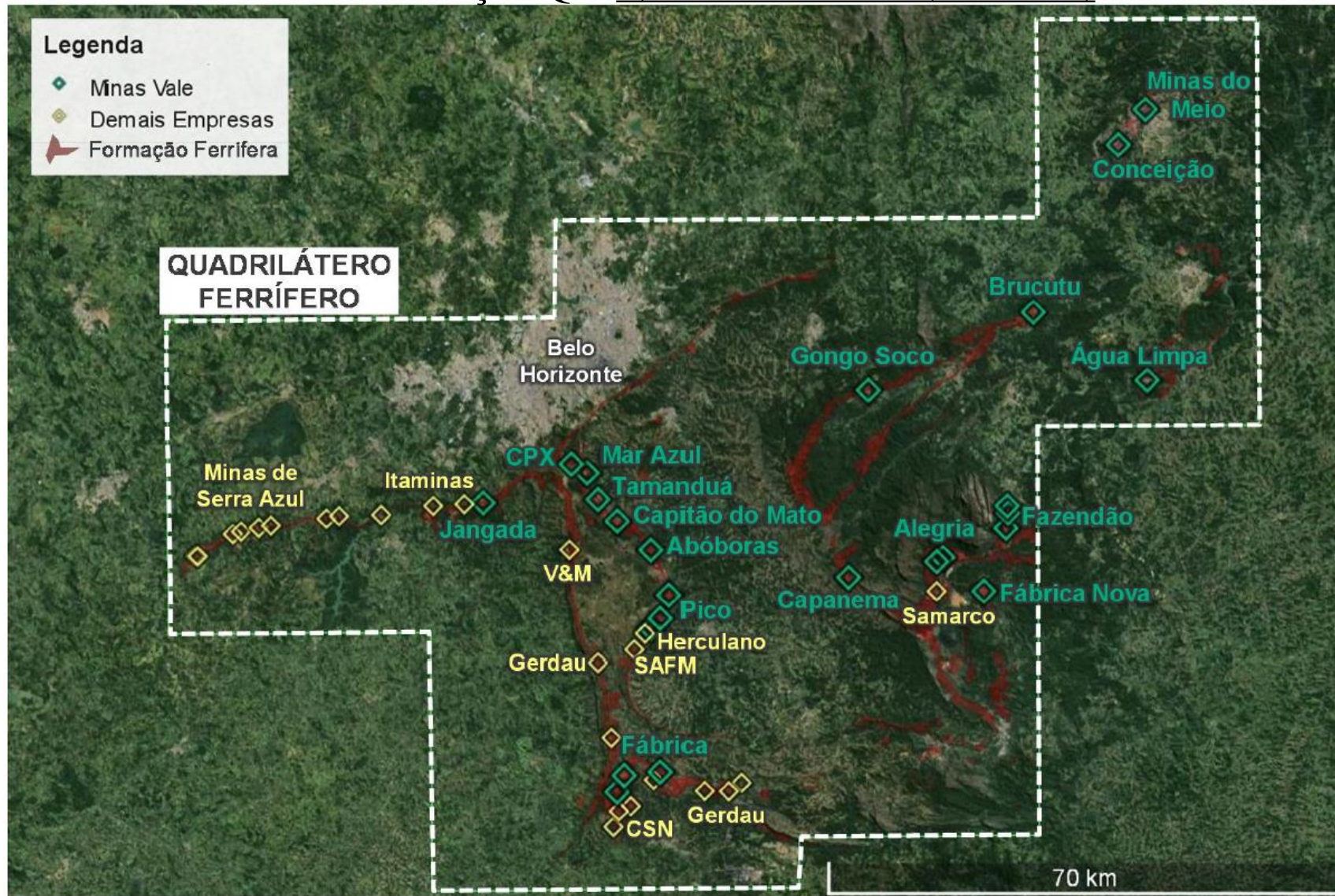
Principais minas – em Mt/ano



Barragens – em hectares

- Grande impacto pela proximidade de áreas urbanas
- Necessidade monitoramento das barragens e das pilhas
- Licença social → cada vez mais crítica (apoio da comunidade)
- Pressão ambiental
- Relacionamento mais complexo com os stakeholders (Governos, MPF, MPE, ONG's, órgãos de governo, comunidades)

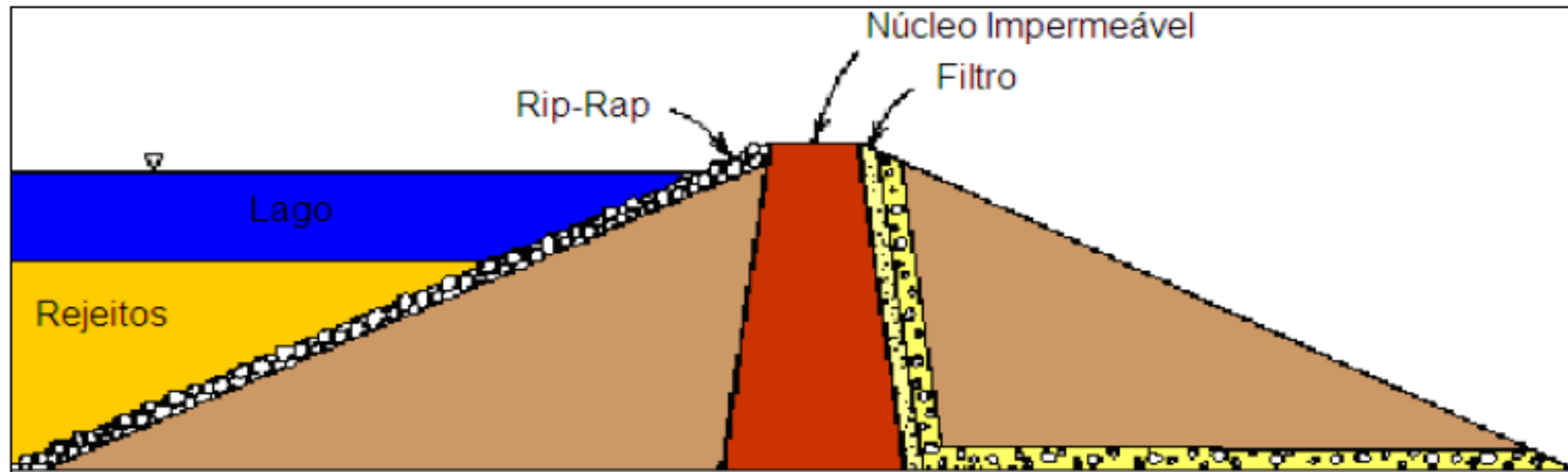
Área Mineração QF: 2,7% do território (780.000 ha)





## Segurança de barragens de rejeito – Realidade e pesquisa

Barragens de rejeito convencionais são obras de terra geotécnicas construídas sobre maciço terroso tratado geotecnicamente para uma melhor estabilidade , o corpo da barragem é construído com solo compactado e filtros para dar passagem a água. Armazenam material de fino e grosso com água constituindo uma polpa com até 90% de água. Este material é heterogeneo que não sedimenta de forma homogênea sempre sujeito a liquefação e entupimento dos filtros, apresentando erosão (piping ) É uma construção rustica que depende muito do construtor com tecnologia dos anos 60 . Sua construção se assemelha a construção de açudes para armazenamento de água.



Gomes 2009

Figura 3.2 – Barragem convencional para contenção de rejeitos

# Segurança de barragens de rejeito – Realidade e Pesquisa

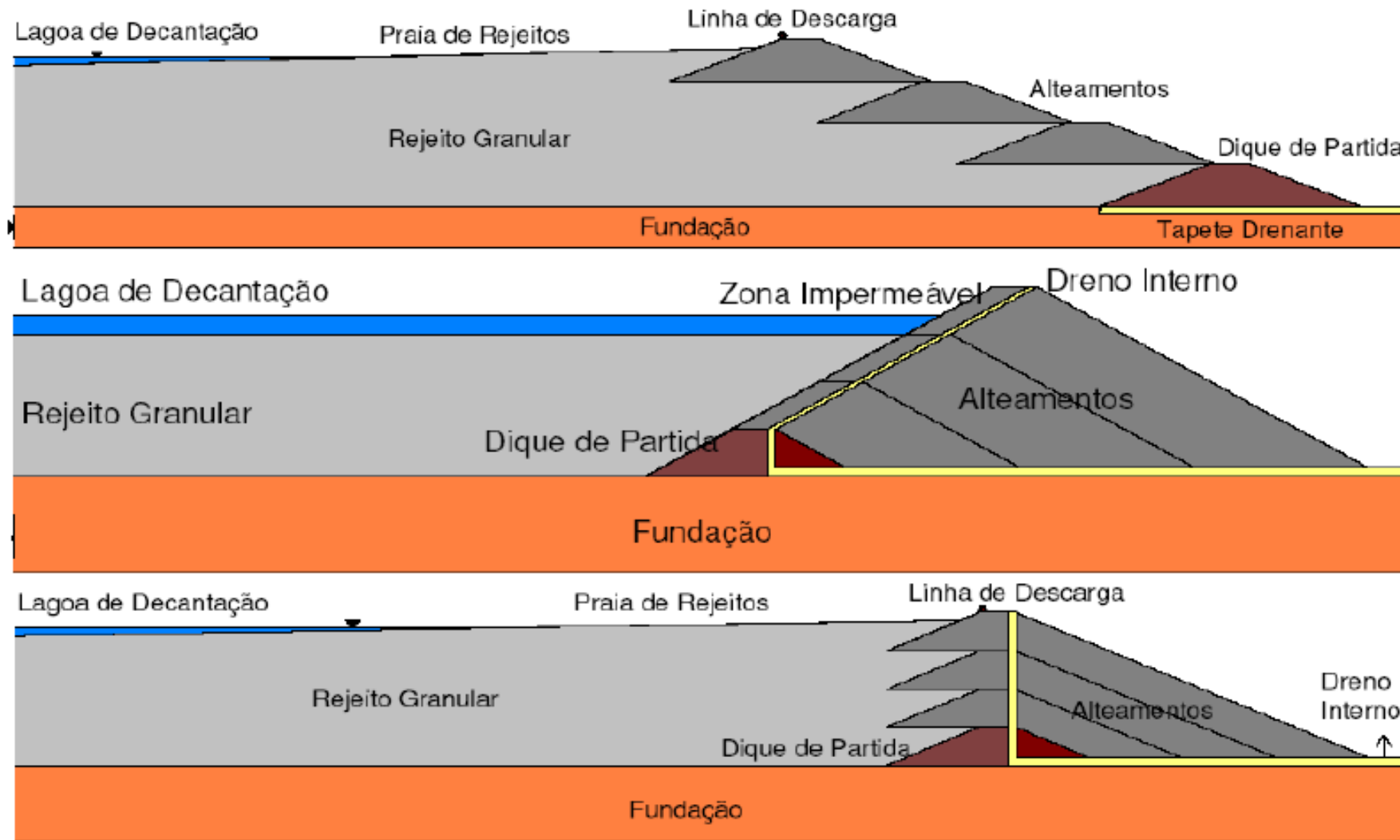


Figura 3.3 – Barragens de contenção de rejeitos com alteamentos sucessivos (Gomes, 2009)

# Barragens de rejeito armazenam qual tipo de material?

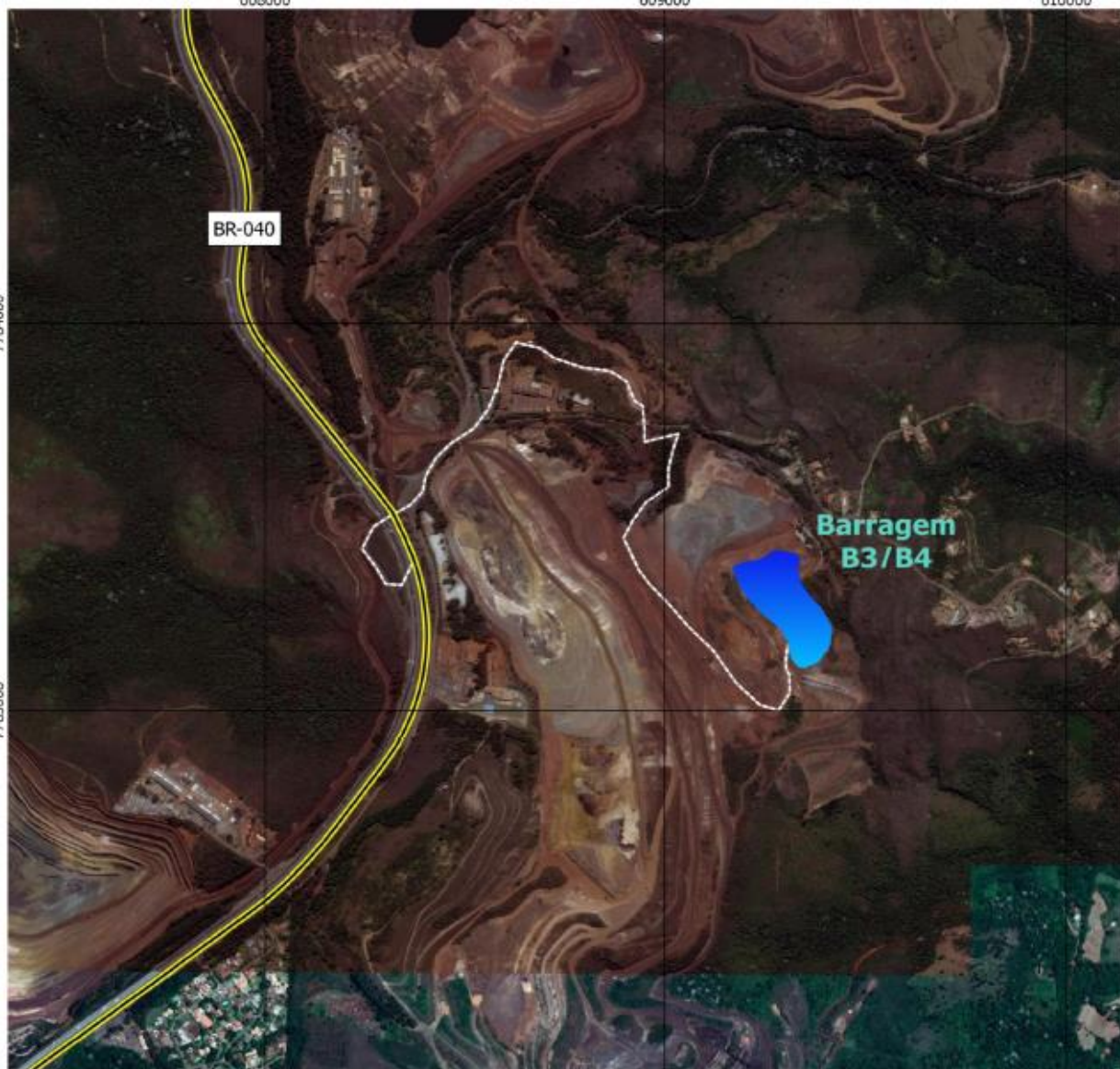




B1 - CAM1 - Barragem

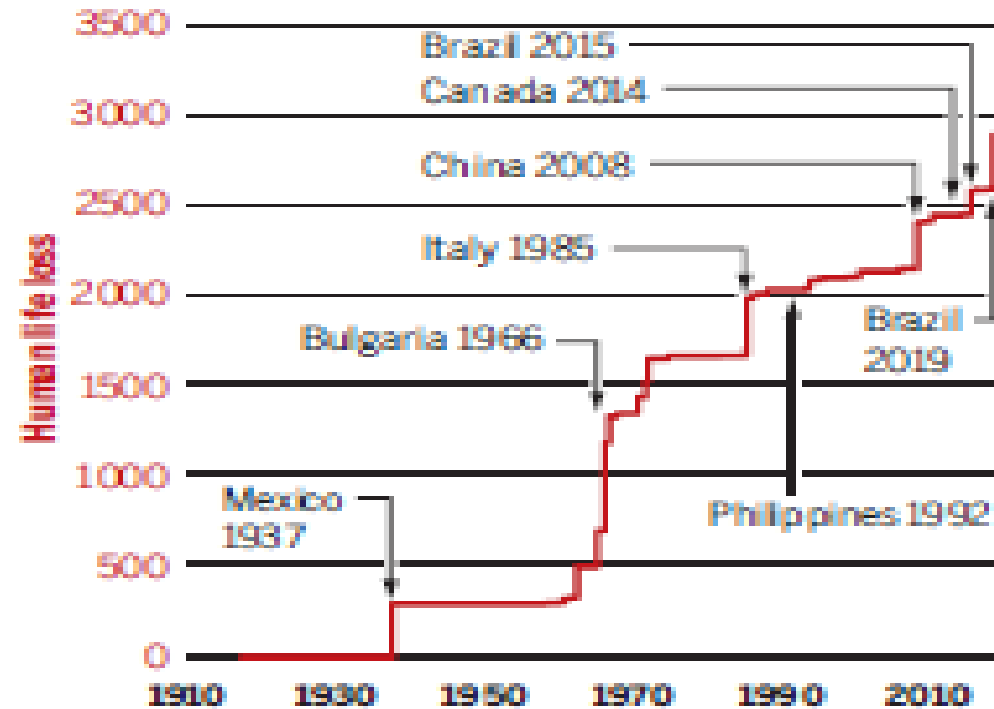
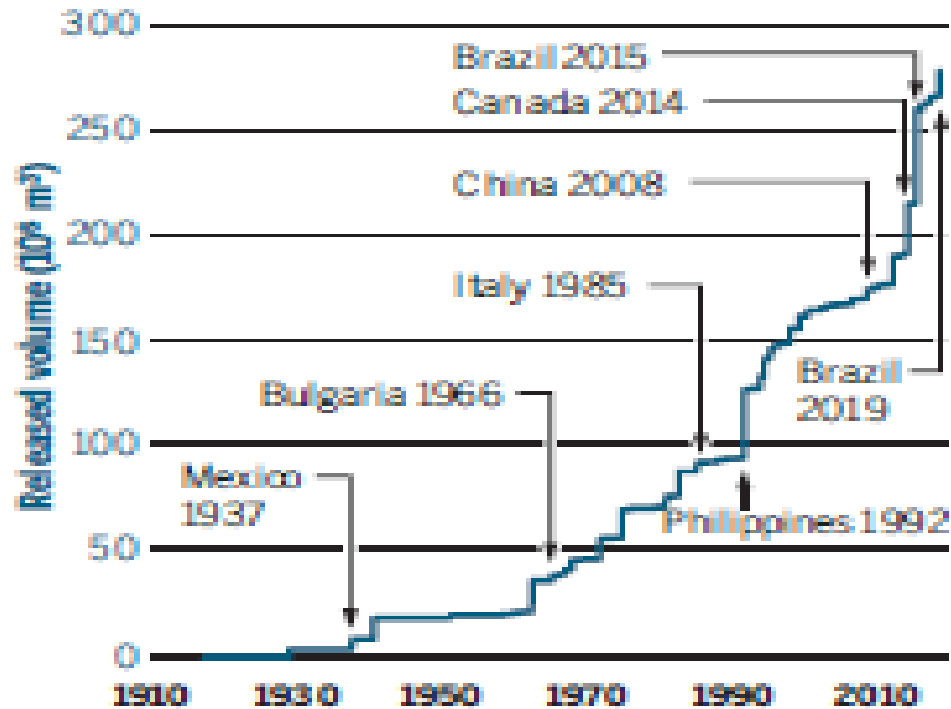
Barragens de contenção de rejeitos oriundos do processo de mineração que são construídas segundo a metodologia que configura, o dito alteamento a montante, implantadas/apoiadas sobre os próprios rejeitos depositados, mediante mecanismo de lançamento por via hidráulico, no entendimento de **Martin e McRoberts (Static Liquefaction of Tailings: Fundamentals and Case Histories, 2002)** são estruturas vulneráveis e sujeitas a fatalidades

## Localização barragens B3/B4 - Mancha de inundação ?



## Catastrophic dam failures

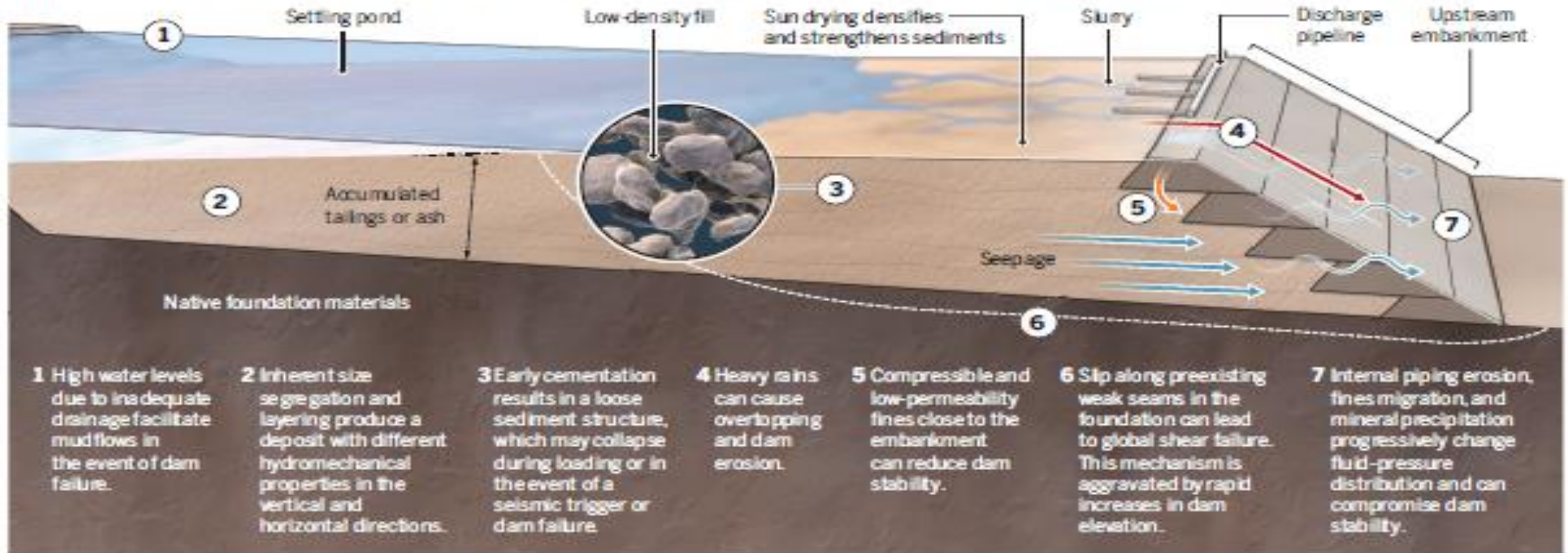
Over the past century, tailings dam and ash pond failures and the resulting fast-moving mudflows have led to a cumulative loss of almost 30 000 lives. Data from (3).



O conhecimento científico e tecnológico sobre ruptura de barragens ainda é muito limitado. Em recente artigo Why coal ash and tailings dam disasters occur, publicado em 14 maio 2019 por J.C. Santamarina et al na revista Science Science 10 May 2019: Vol. 364, Issue 6440, pp. 526-528 DOI: 10.1126/science.aax1927, vê-se claramente que os conhecimentos sobre os mecanismos de ruptura e previsão ainda estão em constantes estudos.

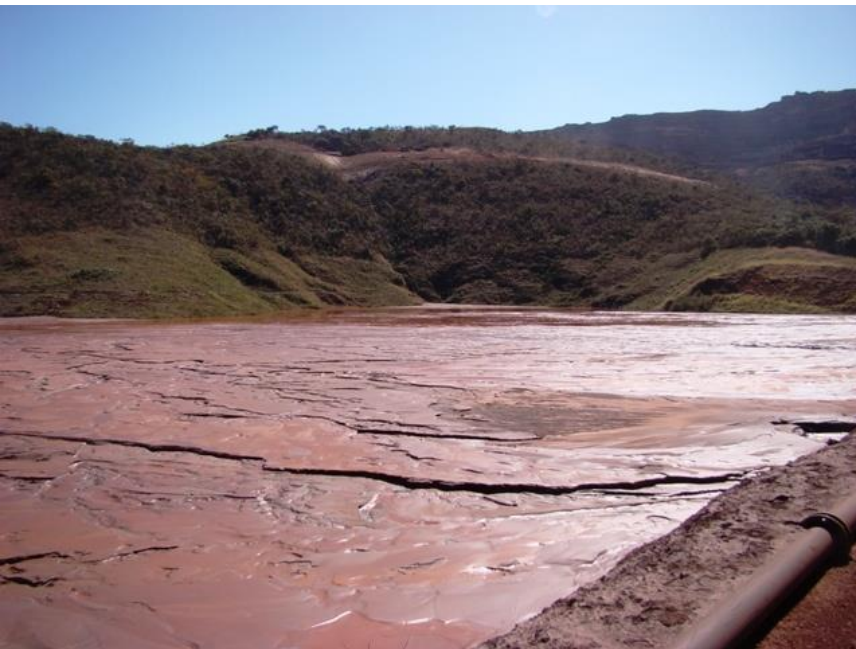
## Mechanisms and processes of tailings dam and ash pond failures

Many different aspects of impounded ash and mine tailings and the associated dams can contribute to dam failures and the resulting fast-moving mudflows. The figure shows upstream construction as an example; most processes and mechanisms shown also apply to centerline and downstream construction methods.



Em 17 de maio de 2017 o então Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM, atual Agência nacional de Mineração - ANM, criou o cadastro nacional de barragens através da portaria do MME 70.389. Essa portaria determina que todas as mineradoras façam o cadastro de suas barragens, assim como estabelece critérios para atribuir às barragens a categoria de riscos e danos potenciais associados. Entretanto esse cadastro não é um instrumento efetivo de engenharia e não permite uma avaliação das condições técnicas para a estocagem, descomissionamento e descaracterização da estrutura.

# Características físicas, químicas e mineralógicas das lamas estocadas em barragens de resíduo de minério de ferro



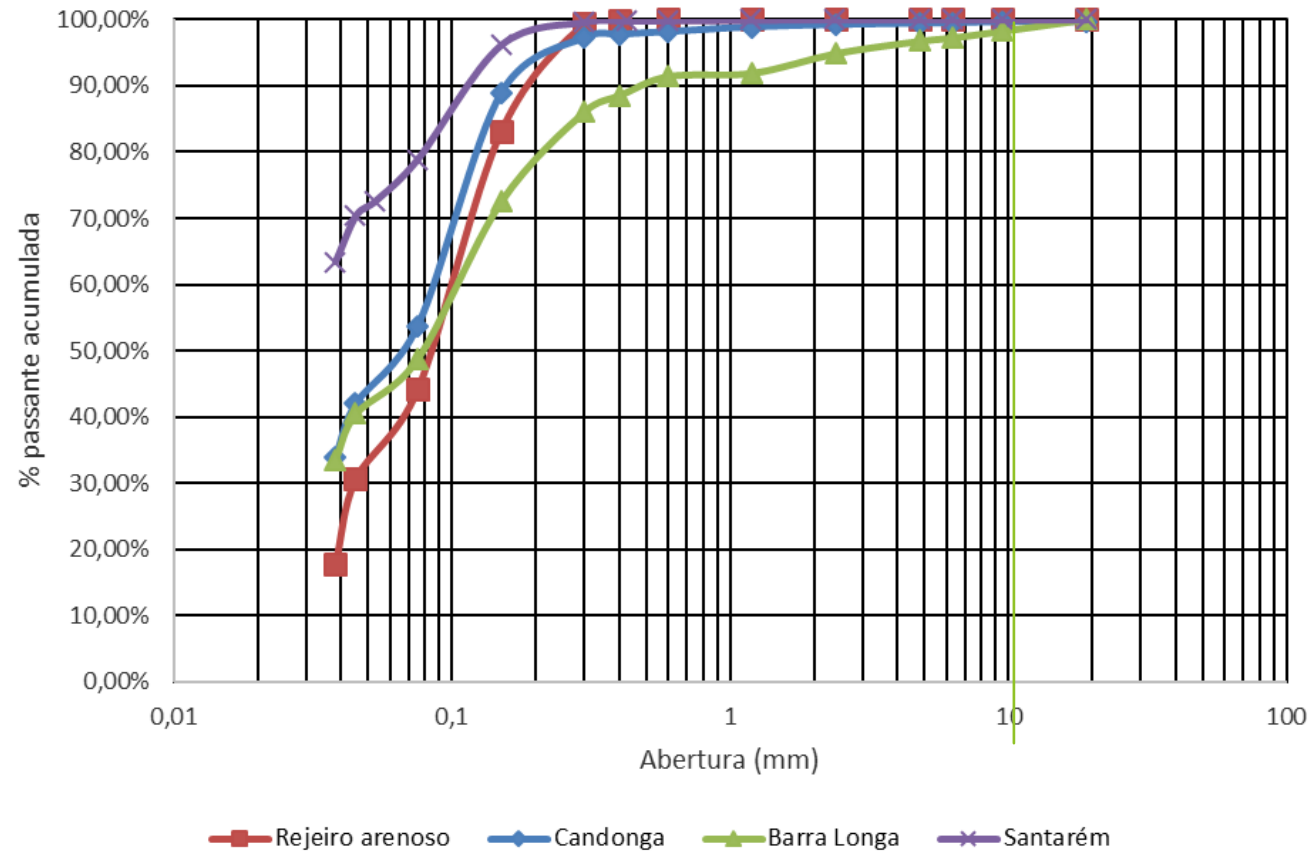
Partículas abaixo de 0,04 mm, areia (silica), argilo minerais (SiO<sub>2</sub>, Al, Fe, Na, P, Mn) = heterogêneo e com alto grau de aglutinação = Sólidos 40 a 20% Água 60 a 80% hematita; goethita; micas



# Características físicas, químicas e mineralógicas de rejeitos depositados na barragem de Candonga, Barra longa , Santarem



Análise comparativa - Granulometria



Amostra	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade real (g/cm <sup>3</sup> )
Candonga	1,07	
Barra Longa	1,11	
Santarém	1,29	

## Análises Químicas Candonga, Barra Longa, Santarém

	C	S	As	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	TiO2	Na2O
	%	%	ppm	%	%	%	%	%	%
<b>CANDONGA</b>									
<b>Limite superior</b>	0,13	0,02	-	64,93	2,23	0,07	-	0,09	<0,1
<b>Média</b>	0,13	0,01	<1	64,40	2,21	0,07	<0,1	0,09	<0,1
<b>Limite inferior</b>	0,13	0,01	<1	63,87	2,20	0,07	<0,1	0,09	<0,1
<b>BARRA LONGA</b>									
<b>Limite superior</b>	0,20	0,01	10,65	65,27	5,57	0,27	0,11	0,33	0,16
<b>Média</b>	0,19	0,01	8,00	65,10	5,56	0,27	0,11	0,33	0,15
<b>Limite inferior</b>	0,19	0,01	5,35	64,93	5,54	0,26	<0,1	0,32	0,15
<b>SANTARÉM</b>									
<b>Limite superior</b>	0,10	0,01	-	44,06	2,47	0,11	-	0,11	0,12
<b>Média</b>	0,10	0,01	<1	43,80	2,45	0,11	<0,1	0,10	0,12
<b>Limite inferior</b>	0,10	0,01	<1	43,54	2,44	0,11	<0,1	0,09	0,12

	K <sub>2</sub> O	Fe	P	Mn	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu	NiO	ZrO <sub>2</sub>	LOI
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>CANDONGA</b>									
<b>Limite superior</b>	0,17	21,49	0,04	0,05	0,01	-	0,02	-	2,38
<b>Média</b>	0,16	21,33	0,03	0,05	0,01	<0,01	0,02	<0,01	2,28
<b>Limite inferior</b>	0,15	21,18	0,03	0,05	0,01	<0,01	0,02	<0,01	2,19
<b>BARRA LONGA</b>									
<b>Limite superior</b>	0,48	17,40	0,04	0,07	0,03	-	0,03	-	3,38
<b>Média</b>	0,48	17,30	0,04	0,07	0,03	<0,01	0,02	<0,01	3,34
<b>Limite inferior</b>	0,48	17,20	0,04	0,07	0,02	<0,01	0,02	<0,01	3,29
<b>SANTARÉM</b>									
<b>Limite superior</b>	0,06	35,48	0,07	0,11	0,01	0,01	0,03	-	3,77
<b>Média</b>	0,06	35,23	0,07	0,11	0,01	0,01	0,03	<0,01	3,75
<b>Limite inferior</b>	0,06	34,98	0,07	0,10	0,01	0,01	0,03	<0,01	3,72

## Valores de Referência CONAMA 2009 e FEAM 2015

Valor Orientador Solo ( mg.Kg <sup>-1</sup> de peso seco)						
Substância	VQR	VP	VI			
Arsênio	8	15	Agrícola	Residencial	Industrial	
			5	10	25	

Amostra	Candonga			Barra Longa			Santarém		
Arsênio Mg.Kg <sup>-1</sup>	LI	M	LS	LI	M	LS	LI	M	LS
	<1			5,04	8,00	10,70	<1		

Amostra	Goethita (%)	Caulinita (%)	Ilita (%)	$\alpha$ (750 °C)
Candongá	12,4	6,4	3,4	0,93
Barra Longa	15,2	11,9	7,6	0,90
Santarém	22,2	9,2	5,6	0,93

# **Caracterização de resíduos de mineração depositados em barragens e depósitos de estéreis**

## **Objetivos –Produtos para : Indústria química, Indústria cimenteira , Construção civil e Meio Ambiente**

- Análises granulométricas - peneiramento e possivelmente distribuição granulométrica a laser
- Análises mineralógicas quantitativas
- Análises químicas raio X processadas através de difratometria, fluorescência de raio X e espectômetro a plasma
- Análises termo dinâmicas - termogravimetria
- Análises de superfície específica Método BET
- Testes de absorção de azul de metileno
- Testes de perda ao fogo escalonada
- Testes de calcinação em leito fixo e Flash
- Testes de resistência mecânica

## Propriedades técnicas e científicas dos estéreis e rejeitos

### ► Solos Brasileiros - Estéreis

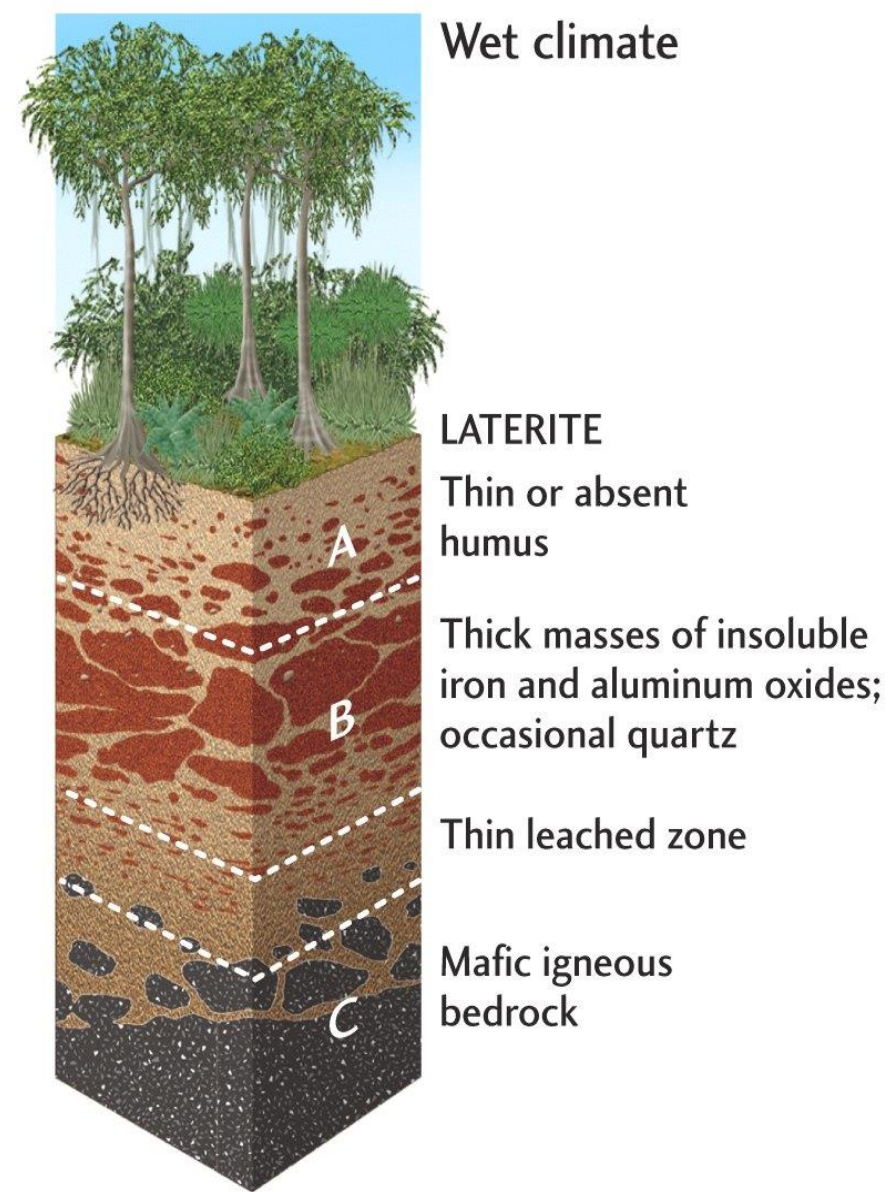
- Muito ricos em argilo-minerais em especial caulinita
- Solos residuais formados pela ação do intemperismo
- Solos transportados pela ação da gravidade
- As rochas quando intemperizadas geram solos

Rocha	Solo
Quartzitos(Itabiritos)	Areno/argiloso
Filitos	argiloso
Granitos	Argilo/arenoso
Calcário	Argiloso
Basalto	Argiloso

Mineração de minérios, metálicos, não metálicos, todas geram

: Depósitos de rochas estéreis - (filossilicatos)

: Barragens : areias e argilas (filossilicatos)





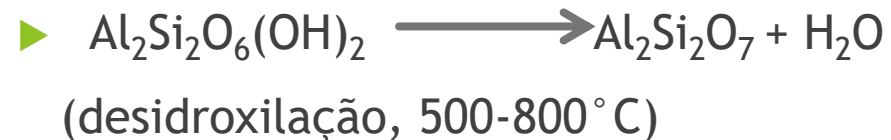
# CALCINAÇÃO FLASH - TECNOLOGIA LIMPA

## fabricação de pozolana artificial e óxido de ferro para metalurgia e siderurgia

Formação da pozolana artificial

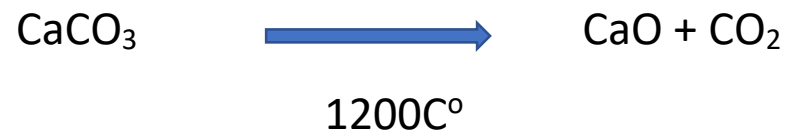


Promove a liberação de água para atmosfera não emite CO<sub>2</sub>



Óxido de ferro metalúrgico - siderúrgico

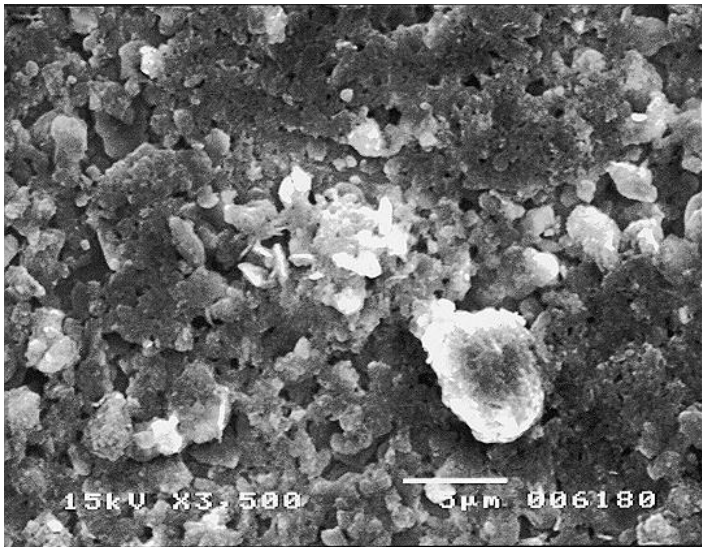
### Calcinação tradicional de calcário para fabricação de cimento e cal



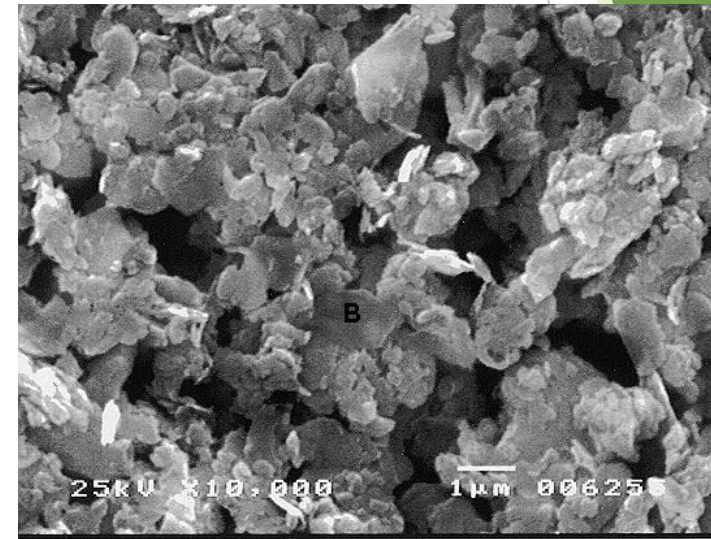
Promove a liberação de CO<sub>2</sub> para atmosfera - efeito estufa

## Calcinação Flash como ativador das áreas superficiais de substâncias pulverulentas / Aglomeração de finos

Calcinação flash de micropartículas diminui a superfície específica \_MEV



**Caulinita Crua – 120 a 200 micras**

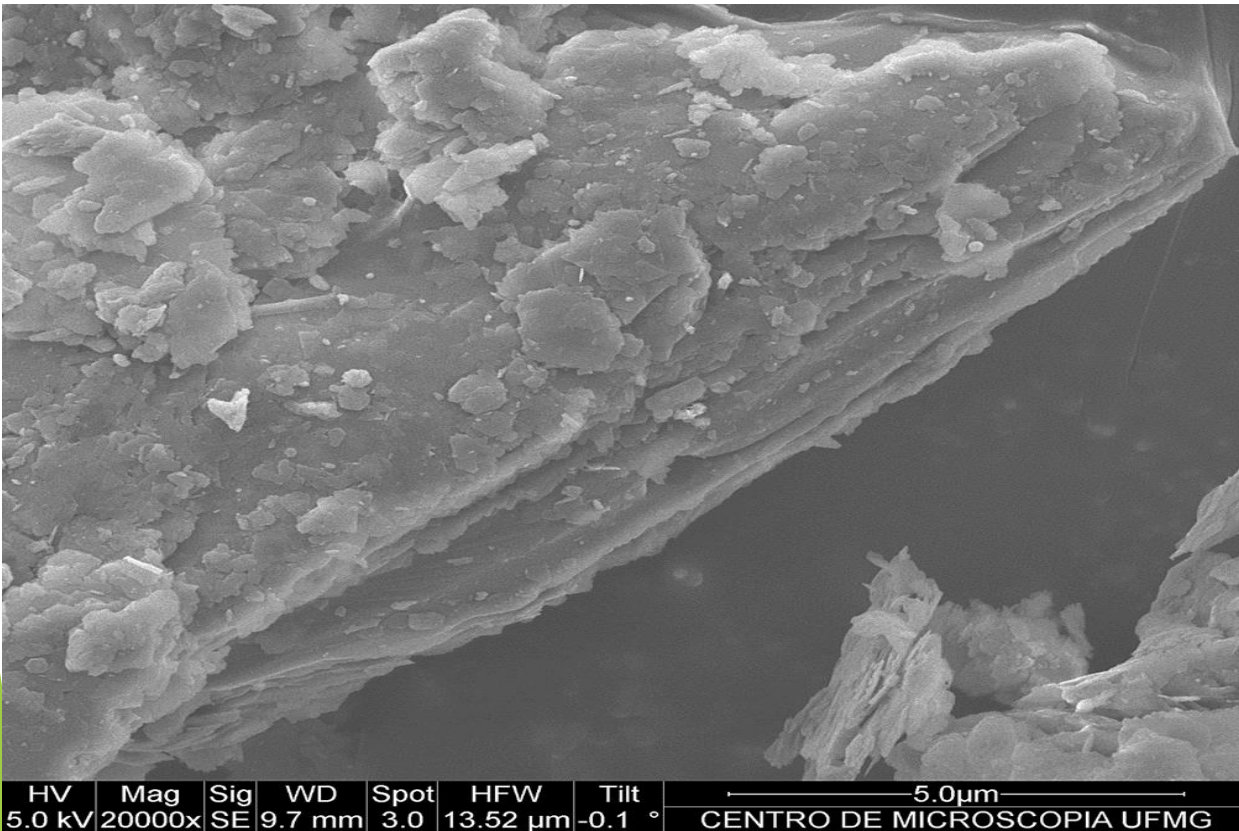


**Pozzolana calcinada flash 850° C / 30 - 90 micras**

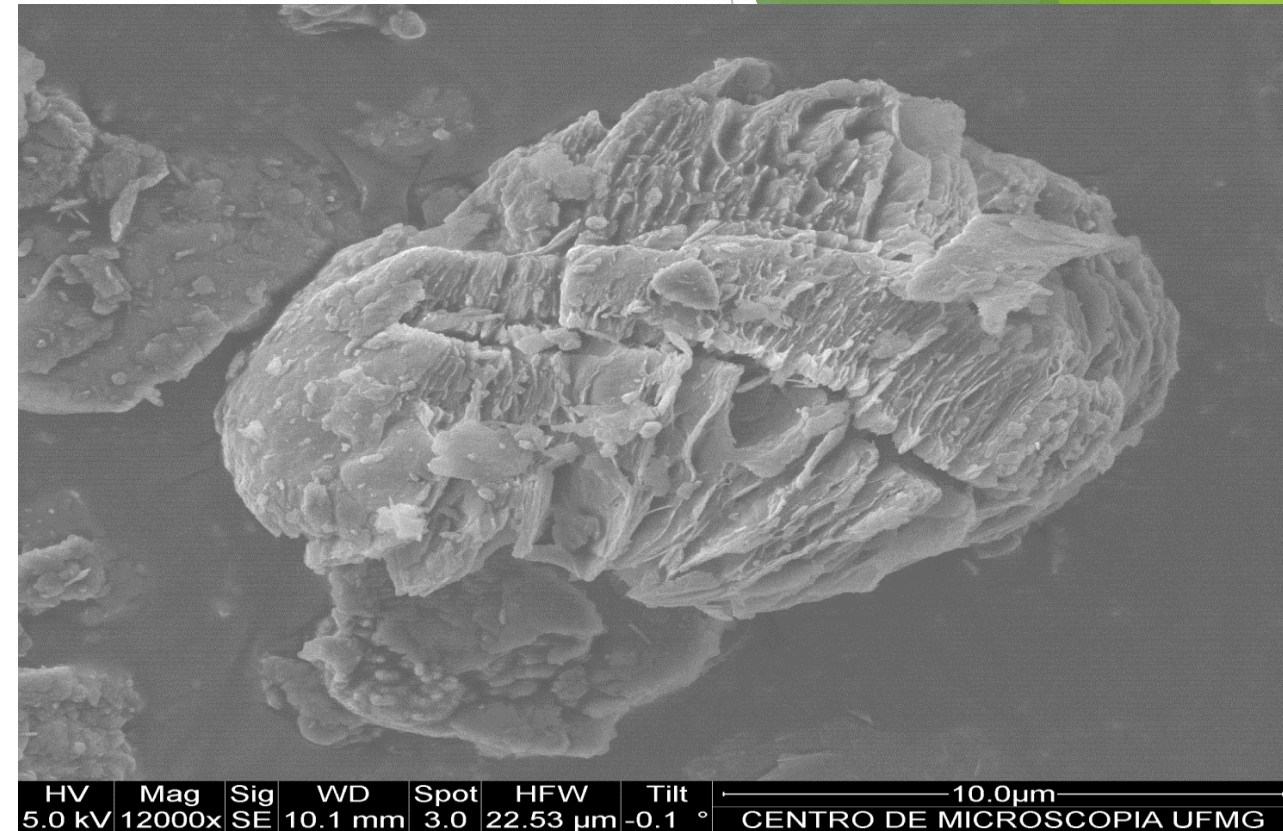
$$C28 = -0,35A_6 - 0,53Q_{30} - 0,2BET + 125,8 \text{ avec } R^2=0,9$$

$$Rc90 = 0,27G3 - 0,36Q_{30} + 71 \text{ avec } R^2=0,93$$

## Calцинаção Flash como ativador substâncias pulverulentas ( rejeitos e estéreis de mineração de ferro)



Resíduo de lavra de minério de ferro cru 20000X

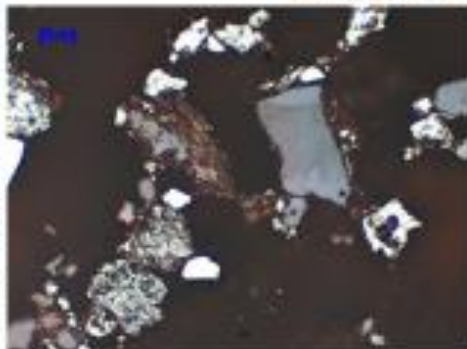


Resíduo de lavra de minério de ferro calcinado flash 12000X

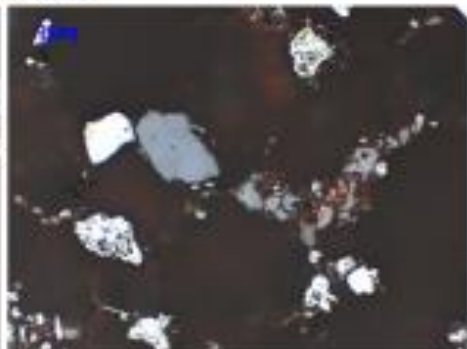
Transformação cristalográfica em substâncias amorfas - aumento da resistência mecânica - Dissertação mestrado 03 2019 - Eng. Tamiris Seerig CPGEM

Abaixo são apresentadas imagens do pellet feed antes e após a calcinação. Para o material calcinado, nota-se que a goethita presente sofreu alteração de sua coloração devido à perda de ppc.

Antes da Calcinação



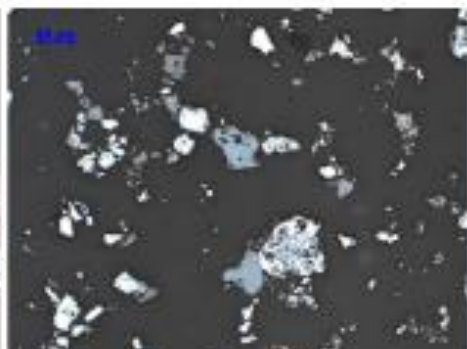
Magnificação: 500x.



Magnificação: 500x.



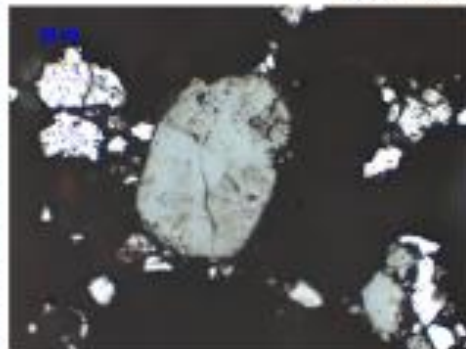
Magnificação: 500x.



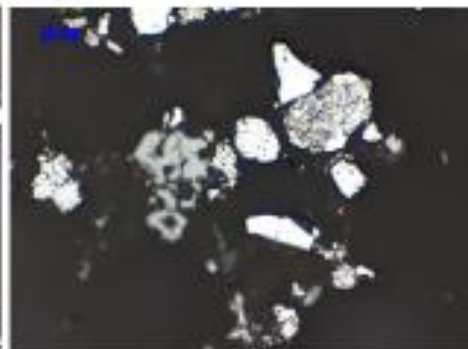
Magnificação: 200x.

Pode-se notar a goethita com coloração cinza, em alguns grãos tende ao marrom, devido à sua elevada hidratação.

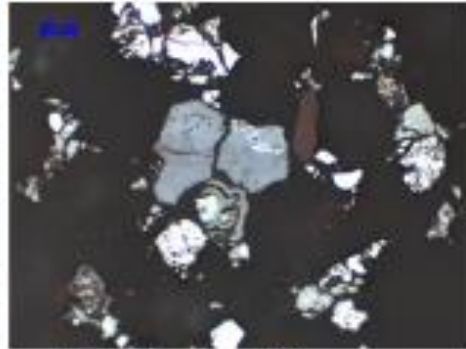
Após calcinação



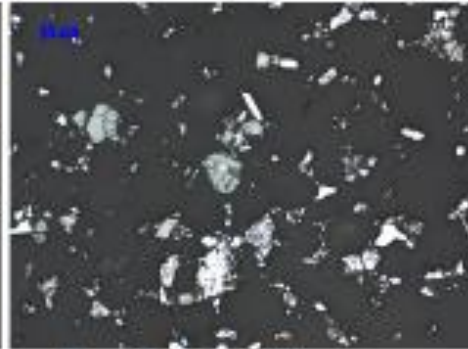
Magnificação: 500x.



Magnificação: 500x.



Magnificação: 500x.

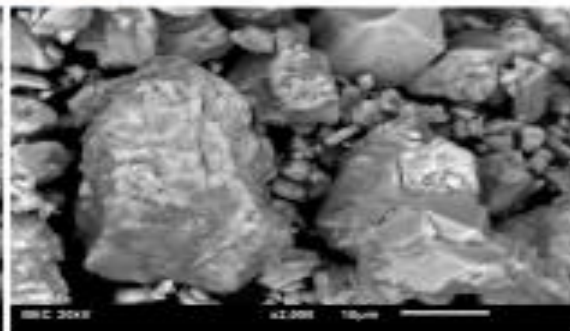
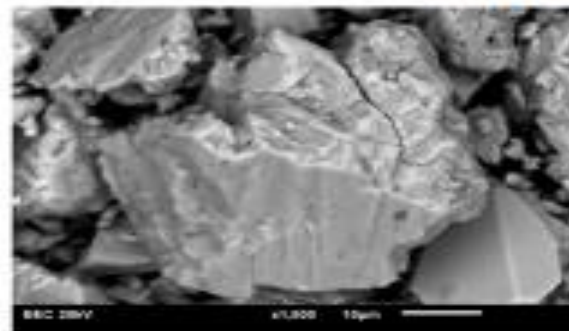
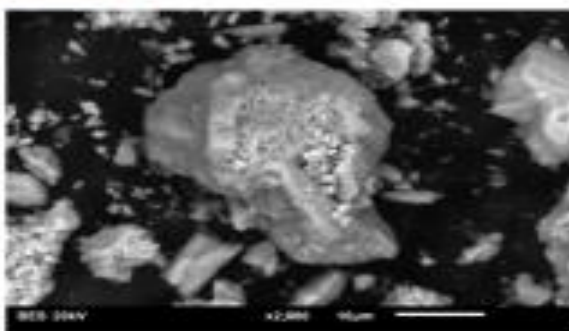
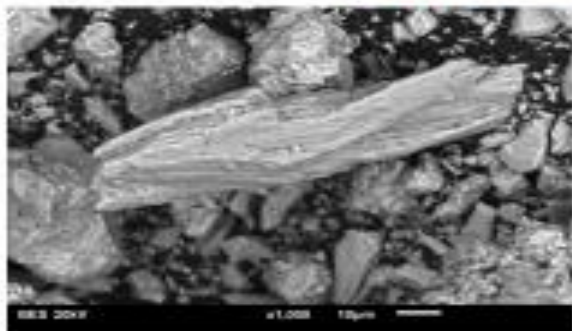


Magnificação: 200x.

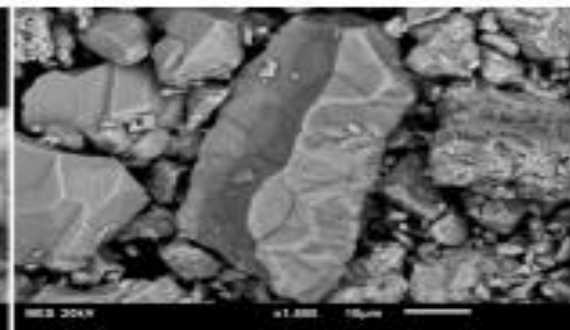
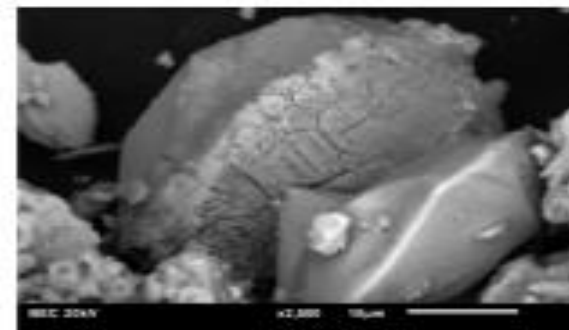
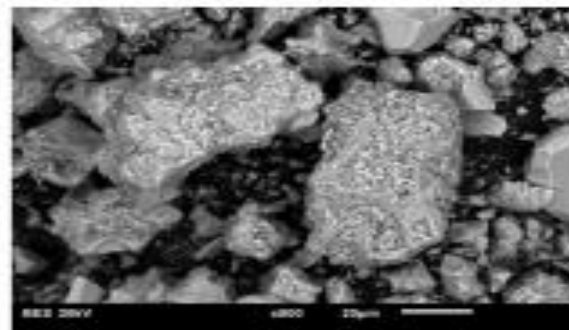
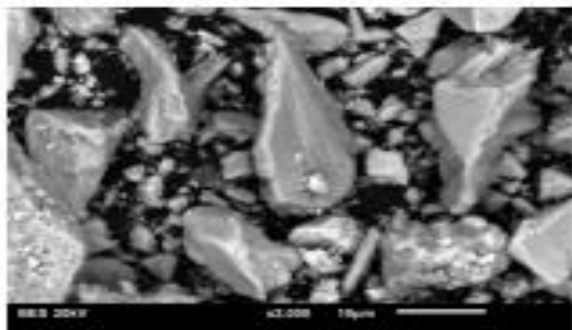
A calcinação da goethita acarreta na modificação de sua coloração, tendendo a um cinza bastante claro que se aproximando do branco, principalmente em 200x de magnificação, que é a utilizada para análise mineralógica.

Imagens do material antes e após calcinação. Nota-se a presença de trincas no material calcinado.

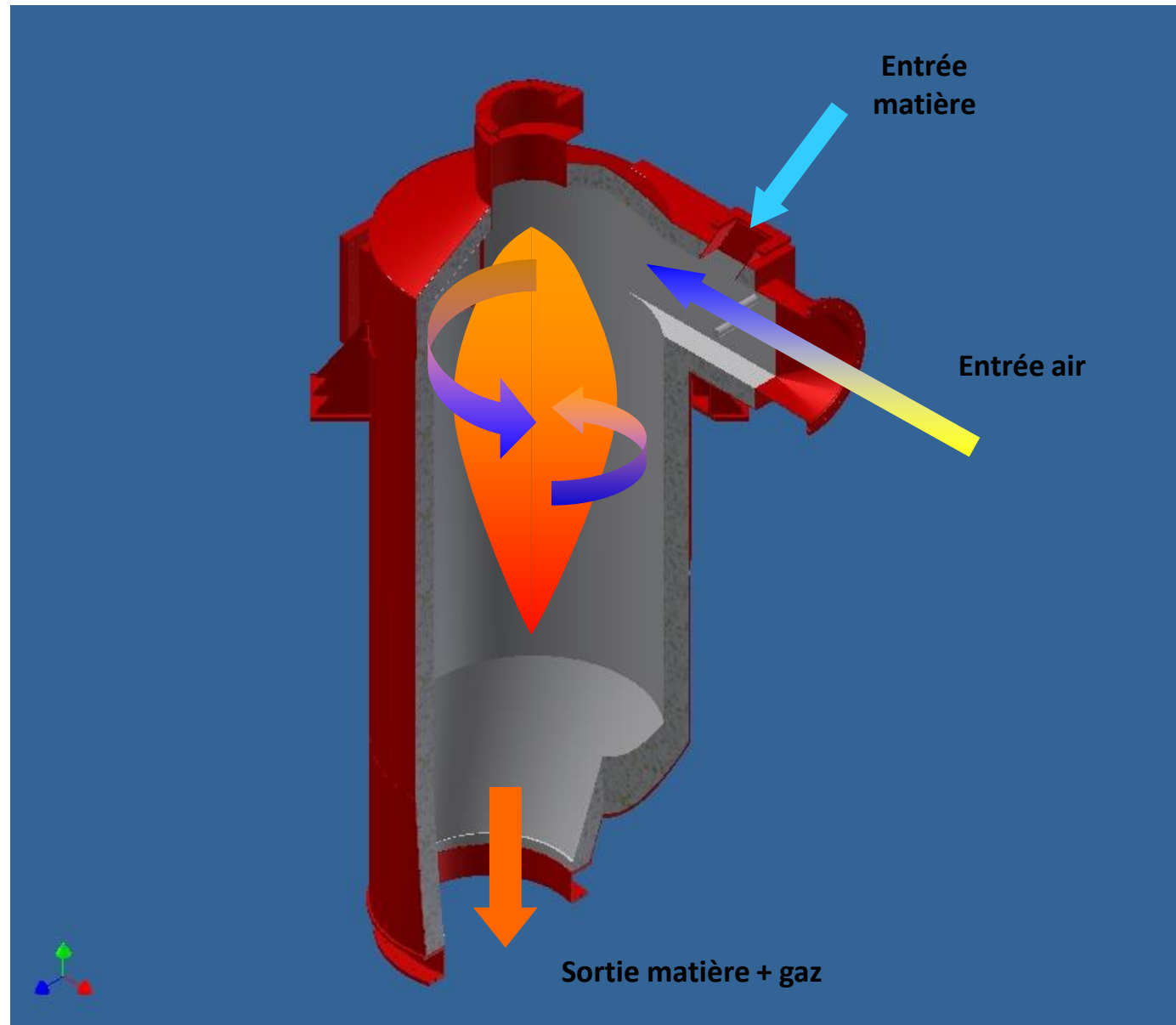
Antes da Calcinação



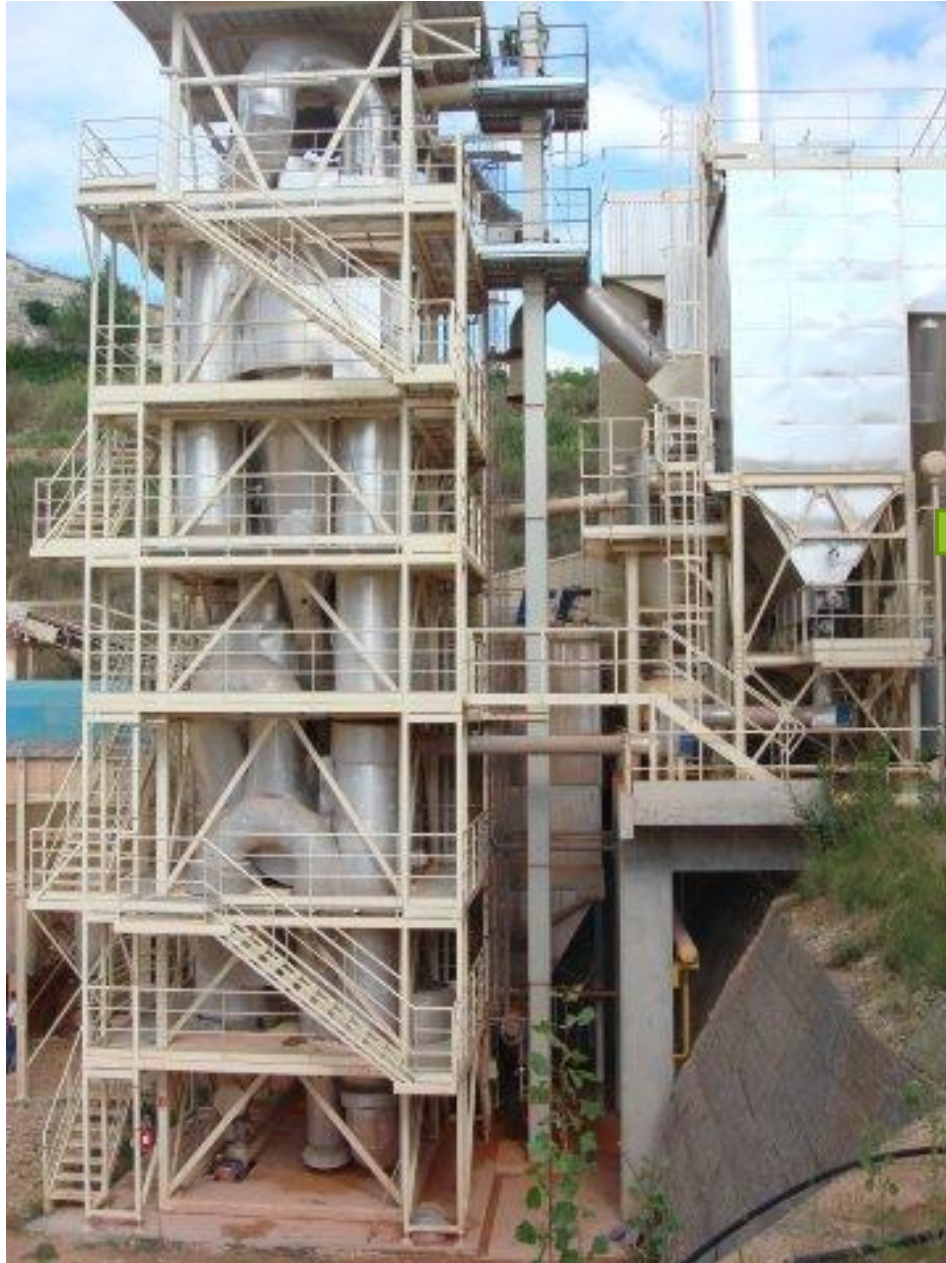
Após calcinação



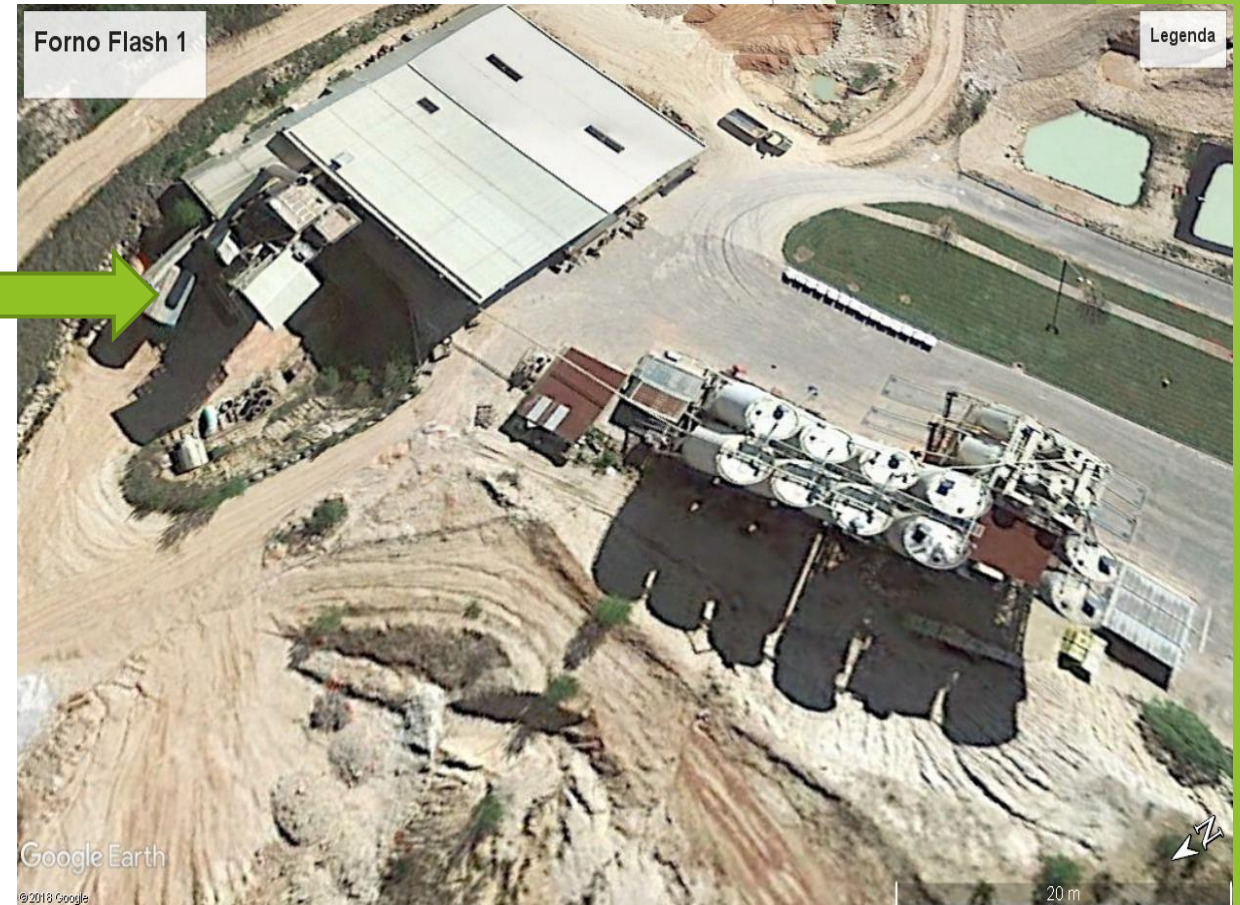
# CALCINADOR FLASH



## Forno Flash Industrial 10 t/h



Vista aérea da Usina Flash, ciclos de estocagem da mineração



Balanço de massa e dados de calcinação do piloto LGG – Estéril

Alimentação		Produção/Calcinado			Rendimento
Balança (kg)	balança dosador(kg)	Ciclone (kg)Pozolana	Filtros Ferro (kg)	Câmara (Kg)	
86,35	85,15	50	29	4,2	96%
		58%	34%	5%	

**Temperatura: 800°C**

**Umidade da matéria-prima: 0,42%**

**Duração da operação: 5h00min**

**Duração do aquecimento: 1h48min**

**Duração da calcinação: 4h54min**

**Vazão de alimentação requerida: 15kg/h**

**Temperatura média do ar na entrada no filtro: 73°C**

**Consumo médio de gás: 8,7kg/h**



## Balanço de massa e dados de calcinação do piloto LGG – Rejeito drenado

**Temperatura: 650°C**

**Umidade da matéria-prima: 0,91%**

**Duração da operação: 6h42min**

**Duração do aquecimento: 1h48min**

**Duração da calcinação: 4h54min**

**Vazão de alimentação requerida: 15kg/h**

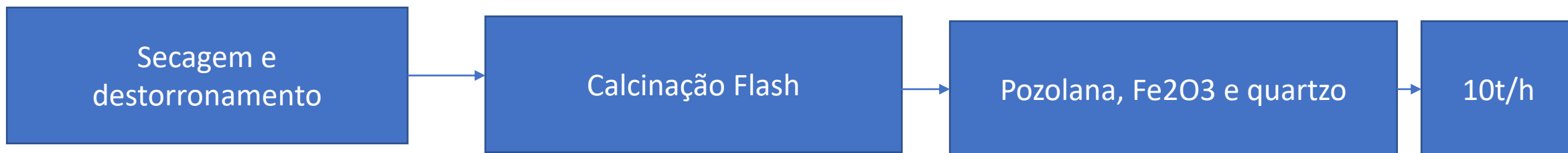
**Temperatura média do ar na entrada no filtro: 73°C**

**Consumo médio de gás: 6,3kg/h**

Massa enforcada calculada pelo dosador (kg)	Massa enforcada pesada (kg)	Massa produto ciclone (kg) Ferro	Massa produto filtro (kg) pozolana/Silica	Massa retida no forno (kg) Ferro	Rendimento (%)
155,848	149,1	129,4	4,5	14,4	87
100%	96%	83%	3%	9%	

## Processamento lama ou rejeito drenado ,considerando a qualidade mineralógica

Hematita	Goethita	Quartzo	Caulinita	Outros
<b>29</b>	<b>40,3</b>	<b>19,7</b>	<b>11</b>	



	Secagem	Calcinação	Total
Consumo térmico /t de MK*	15 Nm3/t	35Nm3/t	50Nm3/t
	631 MJ/t	1472 MJ/t	2103 Mj/t
	151 Kcal/t	352 Kcal/t	503 Kcal/t
	175 kWh/t	409 kWh/t	584 kWh/t
Consumo elétrico/ MK*	1/3	2/3	
Consumo em litros de óleo BTS/hora para uma produção de 240 t/dia	485		

Fator de marcha 90%

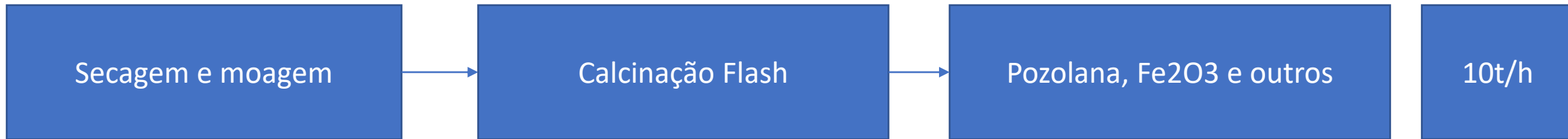
Hematita	Quartzo	pozolana	Outros
<b>82,3</b>	<b>15,7</b>	<b>2</b>	

Partição em % para processamento de pelotas metalúrgicas 98% Fe2O3 –  
 pozolana 2% possivelmente como ligante da pelota. Produção de  
 pelotas até 50t/h

Qualidade mineralógica média  
 obtida

## Considerando processamento de Metabásica qualidade mineralógica estimada

Minerais	Caulinita	Goethita	Quartzo	Gibbsita	Anatásio
Metabásica Fase 3 in natura	72,6	18,2	-	2,8	6,4



	Secagem	Calcinação	Total
Consumo térmico /t de MK*	15 Nm <sup>3</sup> /t	35Nm <sup>3</sup> /t	50Nm <sup>3</sup> /t
	631 MJ/t	1472 MJ/t	2103 Mj/t
	151 Kcal/t	352 Kcal/t	503 Kcal/t
	175 kWh/t	409 kWh/t	584 kWh/t
Consumo elétrico/ MK*	1/3	2/3	
Consumo em litros de óleo BTS/hora para uma produção de 240 t/dia	485		

Fator de marcha 90%

Minerais	Pozolana	Hematita	Anatásio
<b>Metabásica Fase 3 calcinada a 800 C</b>	56,8	35,5	7,7

Partição em % para processamento de pelotas metalúrgicas 35% –  
 pozolana 56% Produção de pelotas para outros fins até 50 t/h

Qualidade mineralógica média obtida

## Qualidade da pozolana

<u>Tempo (dias)</u>	<u>Metabásica Flash</u> <u>770°C - Tensão</u> <u>(Mpa)</u>	<u>Referência - Tensão</u> <u>(Mpa)</u>	<u>Icimento (%)</u>
<u>7</u>	<u>29,793</u>	<u>26,148</u>	<u>113,94</u>
<u>28</u>	<u>41,431</u>	<u>39,880</u>	<u>103,89</u>

<u>Tempo (dias)</u>	<u>Filito Flash 750°C -</u> <u>Tensão (Mpa)</u>	<u>Referência -</u> <u>Tensão (Mpa)</u>	<u>Icimento%</u>
<u>14</u>	<u>41,448</u>	<u>54,752</u>	<u>75,70</u>
<u>28</u>	<u>42,179</u>	<u>52,866</u>	<u>79,79</u>

<u>Material</u>	<u>Área Superficial Específica</u> <u>Multi-point BET (m<sup>2</sup>/g)</u>
<u>Pozolana</u>	<u>60,091</u>

1 Minério goethítico										
No.	Amostra	Minerais identificados (% em massa)								
1		caulinita	quartzo	hematita	goethita	gibbsita	magnetita	moscovita	anatásio/rutilo	Soma
	<b>Comp. mineralógica</b>	<b>0,0</b>	<b>1,5</b>	<b>60,0</b>	<b>35,2</b>	<b>0,0</b>	<b>3,3</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>100,0</b>

2 Minério goethítico calcinado										
No.	Amostra	Minerais identificados (% em massa)								
2		caulinita	quartzo	hematita	goethita	gibbsita	magnetita	moscovita	anatásio/rutilo	Soma
	<b>Comp. mineralógica</b>	<b>0,0</b>	<b>1,5</b>	<b>98,5</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>100,0</b>

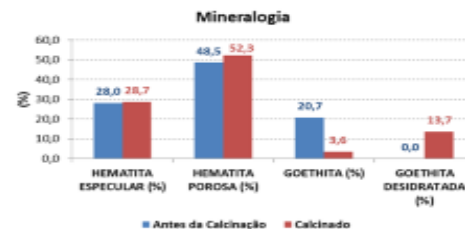
A análise mineralógica do pellet feed antes e após a calcinação é apresentada. Para o material calcinado, cuja goethita presente sofreu alteração de sua coloração devido à sua perda de ppc, é apresentado um valor de Goethita (com coloração normal) e de Goethita Desidratada, para aquelas que apresentam coloração mais clara.

Antes da Calcinação  
Mineralogia UBU

MINERALOGIA	
HEMATITA ESPECULAR (%)	28,05
HEMATITA POROSA (%)	48,54
GOETHITA (%)	20,74
GOETHITA DESIDRATADA (%)	0,00
MAGNETITA (%)	1,92
QUARTZO LIVRE (%)	0,75
QUARTZO MISTO (%)	0,00

Após calcinação  
Mineralogia UBU

MINERALOGIA	
HEMATITA ESPECULAR (%)	28,70
HEMATITA POROSA (%)	52,33
GOETHITA (%)	3,56
GOETHITA DESIDRATADA (%)	13,69
MAGNETITA (%)	1,50
QUARTZO LIVRE (%)	0,20
QUARTZO MISTO (%)	0,01



## 4 - Aplicações da calcinação flash atuais

- Princípio básico: Aumento da superfície específica de reação físico química e mecânica.

**Produção de pozolanas sintéticas** Rejeitos e estéreis de mineração de ferro, calcário, bauxita, magnesita, fosforo, através da calcinação flash foram da ordem de 180 m<sup>2</sup>/grama para temperaturas entre 800°C e 900°C.

**Produção de finos de carbonato de cálcio provenientes de cal industrial:** Trabalhando com a calcinação flash em atmosfera de N<sub>2</sub> com temperaturas entre 600°C e 700°C obtiveram superfícies específicas da ordem 90 m<sup>2</sup>/grama, atingindo uma alta reatividade.

**Concentrado remoido e finos de ciclonagem de minério de ferro - PPC** na alimentação de 4,7% e após a calcinação 2,5%.

**Transformação da Goethita em Hematita (metalúrgica)**

**Produção de geopolímero**

**Pavimentação de estradas – Base, sub base pavimento flexível e capeamento a frio**

# POZOLANA = CIMENTO



## Rússia

A mineradora *Joint-stock company of open type – Mikhailovsky Gok* - Rússia, utiliza seus rejeitos e estéreis para usos diversos, inclusive para a fabricação de cerâmicas e tijolos. Esta aplicação já ocorre por mais de 50 anos. A empresa produz cerca de 15 Mpta de produtos na forma de pelotas e concentrado e tem uma recuperação em massa da ordem de 40%.

QCM - Mount Wright - Quebec, Canadá

Argamassa – Concreto – Aglomeração

França

Argamassa – Concreto – Aglomeração – Pavimentação

Suriname

Argamassa – Concreto – Aglomeração – Pavimentação

EUA

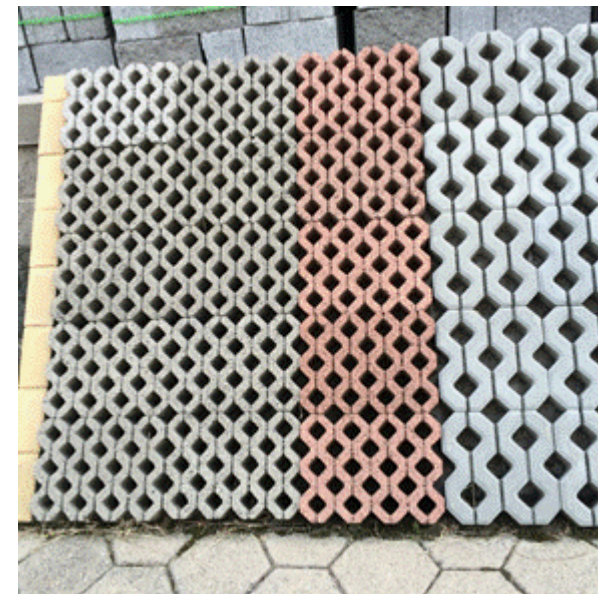
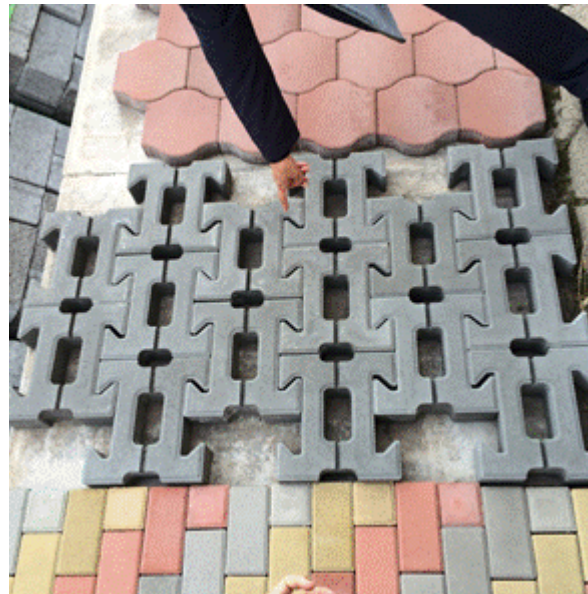
Argamassa – Concreto – Aglomeração – Pavimentação – Vidros- Argamassas – Ração Animal – Fertilizantes



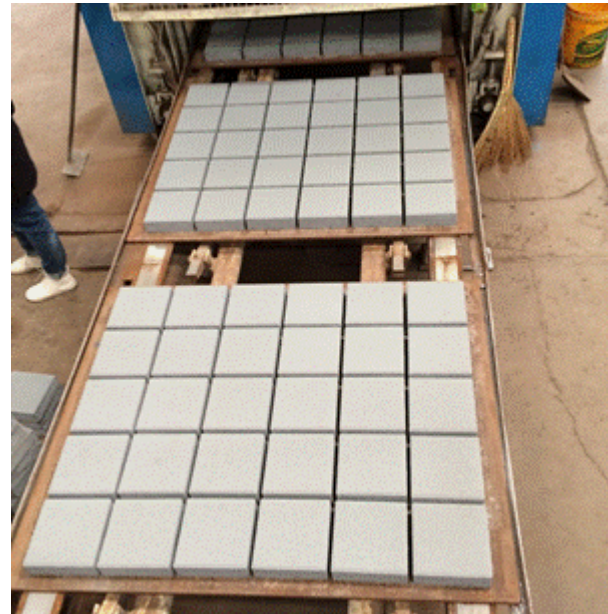
(1) Produção de diversos tipos/formatos/cores de blocos/tijolos para emprego na construção civil (pavimentação, paredes, contenção de encostas, ...), tudo a partir de rejeitos da mineração (contendo menos sílica, menos ferro e um pouco mais grosseiro que o nosso rejeito arenoso).



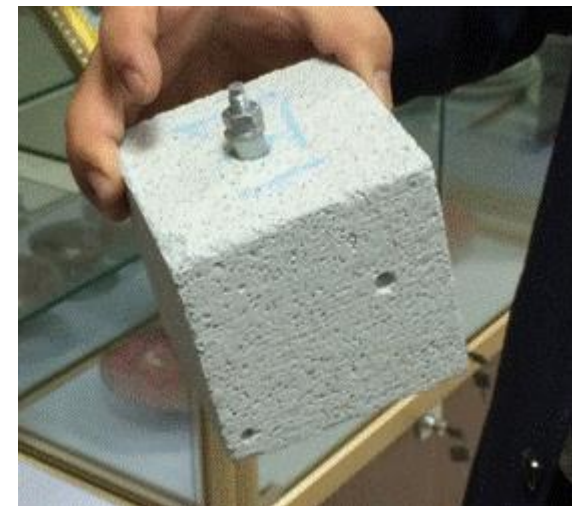
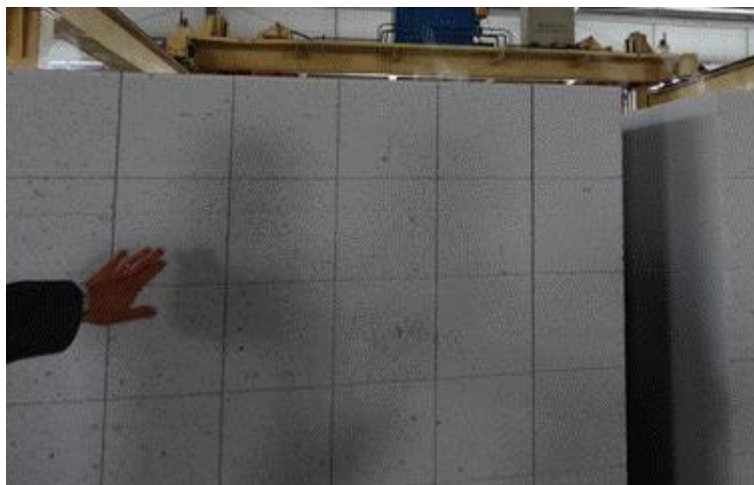
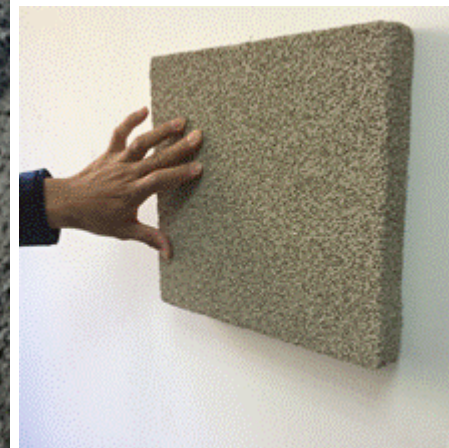
(1) Produção de diversos tipos/formatos/cores de blocos/tijolos para emprego na construção civil (pavimentação, paredes, contenção de encostas, ...), tudo a partir de rejeitos da mineração (contendo menos sílica, menos ferro e um pouco mais grosseiro que o nosso rejeito arenoso).



(1) Produção de diversos tipos/formatos/cores de blocos/tijolos para emprego na construção civil (pavimentação, paredes, contenção de encostas, ...), tudo a partir de rejeitos da mineração (contendo menos sílica, menos ferro e um pouco mais grosseiro que o nosso rejeito arenoso).



(2) Produção de um determinado de tijolo/revestimentos leve/autoclavado para aplicação em paredes de edifícios. Planta ao lado de uma usina termolétrica tratando "coal ashes".



(3) Produção de Dormentes para High “Speed Train Road”;



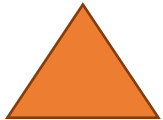
(4) Produção de argamassas específicas para assentamento de isolantes térmicos e também para assentamentos de azulejos e de revestimentos do tipo granito em fachadas externas;



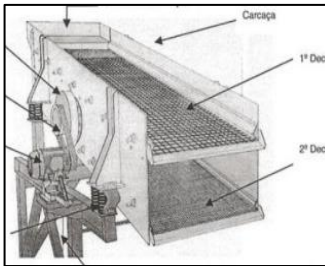
# Barragens são problemas? Porém, tem solução.



**lama de barragem / estereis**



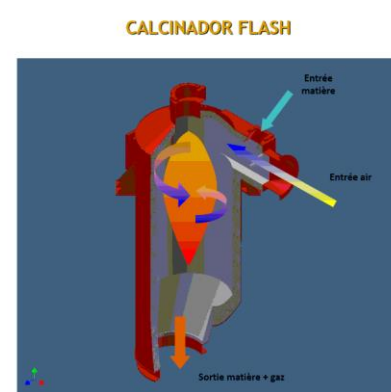
**Separação de Materiais Indesejáveis ao Processo**



**Secador**



**Processo separação flash**



**Forno Flash**



## Produtos Primários



**Cimento pozolânico**



**Areia**



**Ferro**

# Produtos Secundários aplicação infraestrutura civil e pavimentação

Pozolana



Areia e agregados



Ligante



Concreto



Pigmento para tinta





# Agregado para concreto e pavimentação de estrada CADEIA SECUNDÁRIA



Pelotamento a frio

Metalurgia e  
Construção civil



ABNT NBR 7111  
Agregado para  
concreto

## HIDROPONIA E PISCICULTURA



## Exemplo de pavimentação com rejeito arenoso – Pavimentação



**Areia e lama de barragem**



**Aplicação de pozolana na areia e lama de barragem**



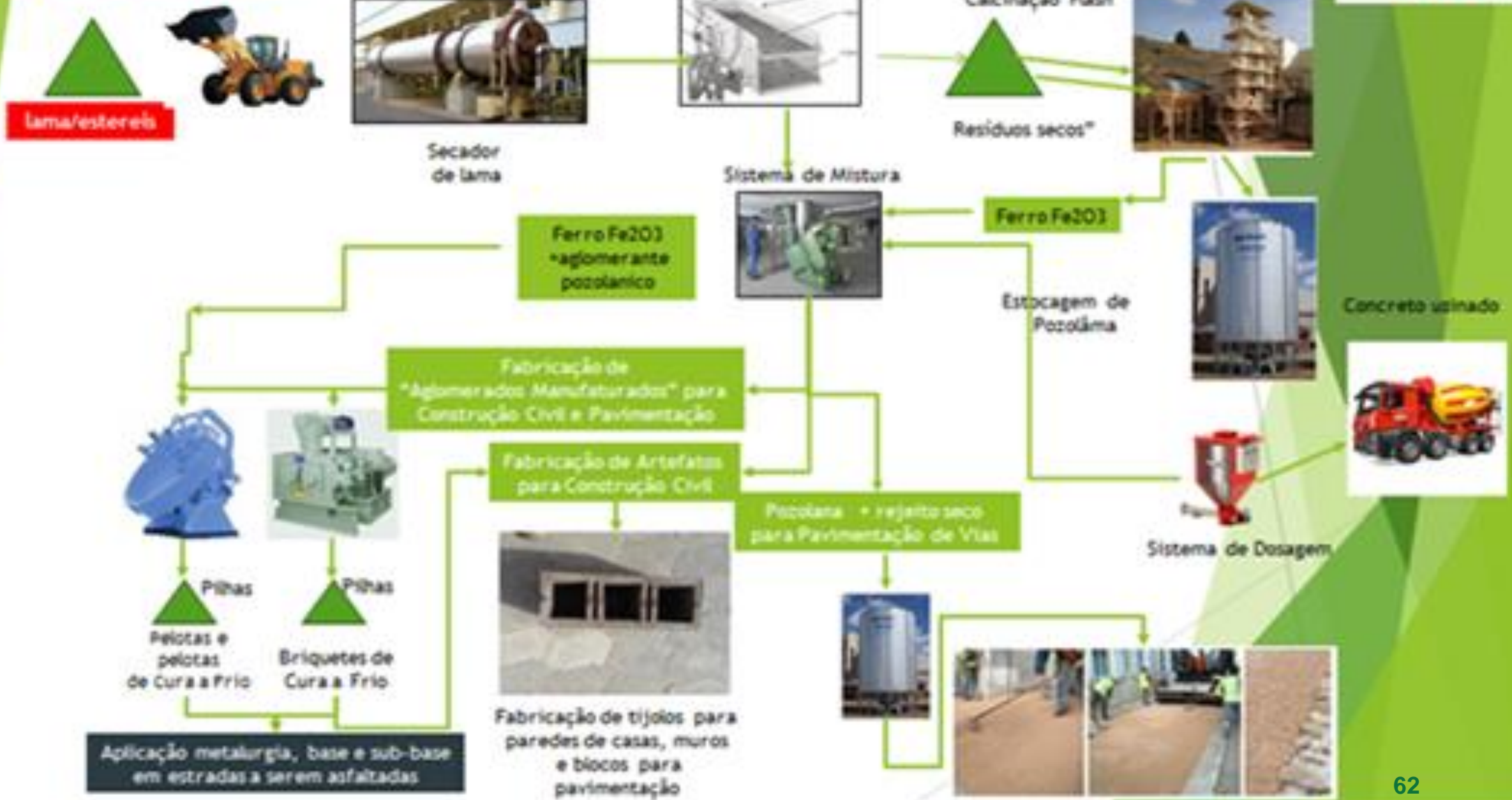
**Resultado Final estrada para veículos leves e pesados Custos para pavimentação são reduzidos em 65%**

Escavação e aterro com material novo agregados		Solo tratado com 8% de pozolana (metacaulim)	
Operação	Custo (dolar/m <sup>3</sup> )	Operação	Custo (/m <sup>3</sup> )
Escavação do solo	2	Escavação do solo	2
O transporte até o local de disposição	6	Mover-se de local de escavação (reutilização de material: corte e aterro)	1.5
Disposição (1.7 t/m <sup>3</sup> x 6 euros/t)	10.2	Disposição do solos local	0.5
Custo de agregados (2 t/m <sup>3</sup> x 5.5 euros/t)	11	Custo do metacaulim in situ (2% x 1.7 t/m <sup>3</sup> x 105 dolar/t)	3.6
Transporte dos novos materiais do centro da reciclagem para o site	6	Espalhamento e mistura	2.2
Classificação e compactação dos materiais de pavimentação	2	Classificação e compactação	2
<b>Total</b>	<b>37.2</b>	<b>Total</b>	<b>11.8</b>

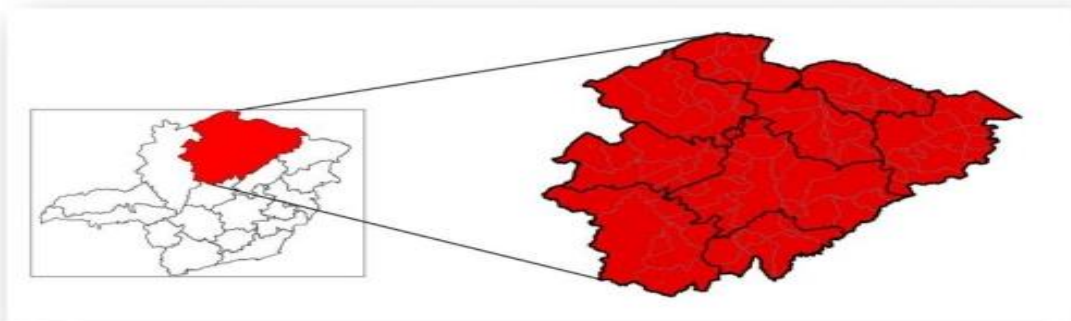
## Consumo médio base/sub-base por km

	100 km	1.000 km	10.000 km
<b>Consumo em toneladas (agregados)</b>	1.500.000 t	15.000.000 t	<b>150.000.000 t</b>
<b>Malha do Sudeste 22%</b>	330.000 t	3.300.000 t	<b>33.000.000 t</b>
<b>10% do volume na região SE (pozolana)</b>	<b>33.000 t</b>	<b>330.000 t</b>	<b>3.300.000 t</b>

# Fluxograma conceitual



**TERRITÓRIO DE DESENVOLVIMENTO - NORTE**



MUNICÍPIO	MICRO TERRITÓRIO	MUNICÍPIO	MICRO TERRITÓRIO	MUNICÍPIO	MICRO TERRITÓRIO
BOCAIÚVA	BOCAIÚVA	JUVENÍLIA	MANGA	BERIZAL	SALINAS
ENGENHEIRO NAVARRO		MANGA		CURRAL DE DENTRO	
FRANCISCO DUMONT		MATIAS CARDOSO		FRUTA DE LEITE	
GUARACIAMA		MIRAVÂNIA		INDAIABIRA	
JOAQUIM FELÍCIO		MONTALVÂNIA		JOSENÓPOLIS	
OLHOS-D'ÁGUA		SÃO JOÃO DAS MISSÕES		NINHEIRA	
CATUTI	ESPINOSA	BURITIZEIRO	PIRAPORA	NOVORIZONTE	
ESPINOSA		IBIAÍ		PADRE CARVALHO	
GAMELEIRAS		JEQUITAIÁ		RIO PARDO DE MINAS	
MAMONAS		LAGOA DOS PATOS		RUBELITA	
MATO VERDE		LASSANCE		SALINAS	
MONTE AZUL		PIRAPORA		SANTA CRUZ DE SALINAS	
MONTEZUMA		PONTO CHIQUE		SÃO JOÃO DO PARAÍSO	
SANTO ANTÔNIO DO RETIRO		SANTA FÉ DE MINAS		TAIOBEIRAS	
VARGEM GRANDE DO RIO PARDO		VÁRZEA DA PALMA		BRASÍLIA DE MINAS	
BOTUMIRIM		JAÍBA		CAMPO AZUL	
CAPITÃO ENÉAS	JANAÚBA	IBIRACATU	SÃO FRANCISCO		
CLARO DOS POÇOS	NOVA PORTEIRINHA	ICARAI DE MINAS			
CORAÇÃO DE JESUS	PAI PEDRO	JAPONVAR			
CRISTÁLIA	PORTEIRINHA	LUISLÂNDIA			
FRANCISCO SÁ	RIACHO DOS MACHADOS	PINTÓPOLIS			
GLAUCILÂNDIA	SERRANÓPOLIS DE MINAS	SÃO FRANCISCO			
GRÃO MOGOL	VERDELÂNDIA	SÃO ROMÃO			
ITACAMBIRA	BONITO DE MINAS	UBAÍ			
JURAMENTO	CÔNEGO MARINHO	URUCUIA			
MIRABELA	ITACARAMBI				
Montes Claros	JANUÁRIA				
PATIS	LONTRA				
SÃO JOÃO DA LAGOA	PEDRAS DE MARIA DA CRUZ				
SÃO JOÃO DA PONTE					
SÃO JOÃO DO PARAÍSO					

MUNICÍPIO	POPULAÇÃO	POPULAÇÃO OCUPADA %	IDH	INCIDÊNCIA DA POBREZA %	DEMANDA ESTIMADA	
					CALÇAMENTO M2	ESTRADAS KM
01-Janaúba	71.256	17,9	0,696	65,28	355.000	400
02-Jaíba	38.413	11,8	0,638	54,14	190.000	300
03-Nova Porteirinha	7.398	10,8	0,641	51,07	40.000	200
04-Pai Pedro	5.934	8,0	0,590	65,24	30.000	200
05-Porteirinha	37.627	7,7	0,651	60,31	200.000	400
06-Riacho dos Machados	9.360	12,1	0,627	72,00	50.000	200
07-Serranópolis	4.425	5,4	0,633	71,00	25.000	200
08-Verdelândia	8.346	3,3	0,584	73,96	40.000	200
09-Catuti	5.008	5,8	0,621	59,78	25.000	100
10-Espinosa	31.133	10,6	0,627	61,80	150.000	200
11-Gameleiras	5.139	7,9	0,650	68,68	25.000	100
12-Mamonas	6.321	7,5	0,618	59,63	30.000	200
13-Mato Verde	12.684	10,2	0,662	66,72	60.000	300
14-Monte Azul	21.994	8,9	0,659	56,43	100.000	300
15-Capitão Enéas	14.960	15,4	0,639	68,83	75.000	300
16-Francisco Sá	24.912	10,3	0,654	61,19	125.000	300
17-São João da Ponte	25.358	3,9	0,569	70,26	150.000	300
<b>TOTAL (IBGE 2010)</b>	<b>330.268</b>			<b>TOTAL</b>	<b>1.670.000</b>	<b>4.200</b>

- **Calçamento total dos municípios 1.670.000 m<sup>2</sup>** tendo em conta o uso rejeito arenoso nos blocos ou pavers para pavimentação , a pozolana para impregnação na base e cimento Portland e rejeito arenoso seco com a base de 70 cm de profundidade a estimativa é de 2.505.000 m<sup>3</sup> de rejeitos
- **Pavimentação 4.200 Km** de estradas vicinais usando para base e sub base rejeitos secos e ligante pozolânico produzido com estéreis locais ou da mineração estimativa de utilização de rejeitos secos e tratados de 50.400.000 m<sup>3</sup> .  
Estimativa do volume total de rejeitos com umidade máxima de 5% a serem transportados , aplicados na umidade de 5% e tratados para gerar ligante.

**52.905.000 m<sup>3</sup>**

**Barragem de Brumadinho continha 15M**

**/ m<sup>3</sup>**



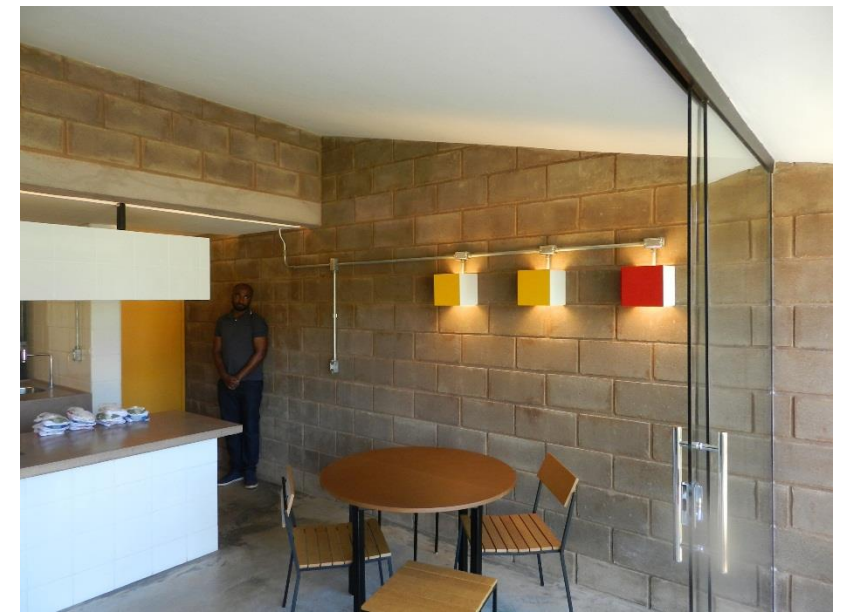
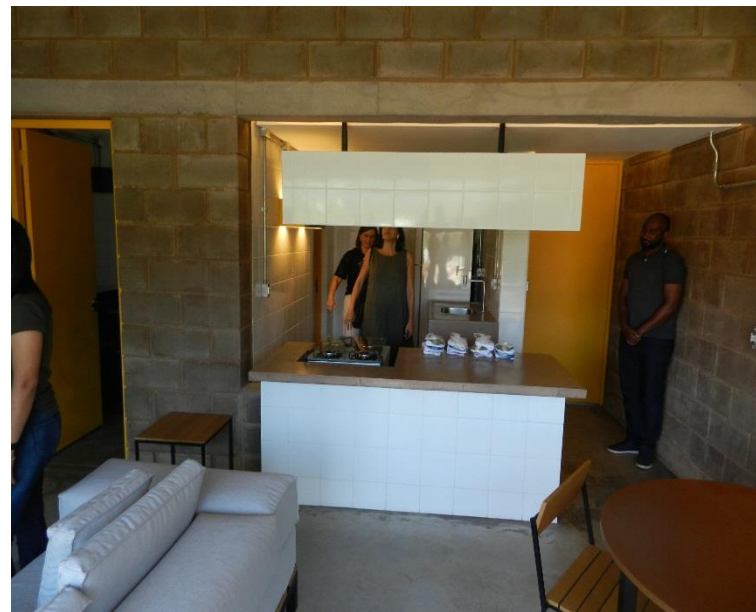
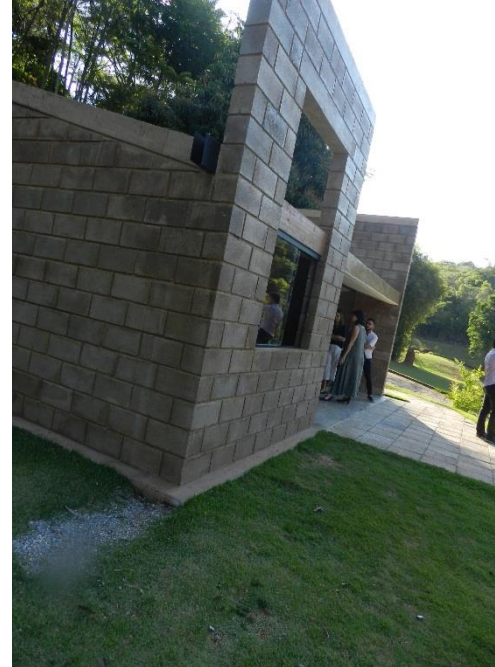
## DESAFIOS E OPORTUNIDADES



Esta casa foi construída aplicando as normas das normas técnicas ABNT NBR 12653 – Materiais Pozolânicos de fevereiro de 2015, ABNT NBR 5752 Índice de atividade pozolânica com Cimento Portland; NBR 5751 Índice de atividade pozolânica com Cal , Blocos alvenaria vazados ABNT NBR 5712 e Blocos para pavimentação ABNT NBR 15953



# DESAFIOS E OPORTUNIDADES





## Os coprodutos da mineração de ferro para uma economia sustentável

Do capítulo 1º ao 11º, estudos sócios econômicos para o aproveitamento dos rejeitos (R) e estéreis (E) da mineração de ferro abrangendo: Utilização em outros países, cadeia produtiva, produtos obtidos, potencial econômico, análise dos riscos, iniciativas mitigadoras, incentivos fiscais necessários, quantificação dos potenciais dos coprodutos gerados para inserção no mercado e um plano de gestão dos E e R. Do capítulo 12º ao 16º, teremos tecnologias disponíveis, mercado, utilização dos coprodutos gerados a saber, pozolanas, agregados e areia, pigmentos e geopolímero. Professores e Consultores colaboradores Prof<sup>a</sup>. Dra. Andréia Bicalho Henriques Prof. Dr. Antônio Ananias de Mendonça Prof. Dr. Ayrton Vianna Costa Prof. Dr. George Eduardo Sales Valadão Prof. Dr. Roberto Galery Eng. Civil Dr. Abdias Magalhães Gomes Eng. Minas MBA CP João Augusto Hilário de Souza Eng. Químico MBA Márcio Luiz Martins Neto Físico Dr Fernando Soares Lameiras – CDTN Geólogo Ph.D. Marcelo A. Martins Neto. Capa foto da obra do artista plástico Sergio Marzano pintada com pigmentos produzidos a partir de rejeitos e estéreis da mineração de ferro.



Evandro Moraes da Gama Engenheiro de Minas formado na UFMG 1979 MSc – University of Minnesota - USA 1983 D Ing – Geol de Eng – INPL França – 1988 Pesquisador Senior IPT 1996 Pós Doc Kobe Japão. (1997) Professor Titular da Cadeira de Recuperação de rejeitos de barragens para uma economia sustentável Professor na Graduação e Pós Graduação.



978-613-9-62297-9



Evandro Moraes da Gama

## Os coprodutos da mineração de ferro para uma economia sustentável

Coprodutos para mineração - economia circular

**Agradecimentos**  
**UFMG**  
**ICB/GERA/DEMIN/Escola de**  
**Arquitetura/CAPES/CNPq/FAPEMIG/FUNDEP/**  
**AQUISUR**