

Curso de Especialização em Beneficiamento Mineral

Departamento de Engenharia de Minas – Escola de Minas de Ouro Preto
Universidade Federal de Ouro Preto

Fundamentação mineralógica para a produção mineral

- Módulo 1 - Introdução à estrutura da Terra e origem dos elementos
- Módulo 2 – Mineralogia fundamental
- Módulo 3 – Formação de rochas e mineralizações
- Módulo 4 – Reconhecimento prático de minerais e rochas
- **Módulo 5 – Mineralogia e geologia de gemas**
- Módulo 6 – Minerais não-metálicos na indústria cerâmica
- Avaliação – prova escrita

Módulo 05 – Mineralogia e geologia de gemas

Antonio Liccardo

Bibliografia módulo 5

- **London D. 2008.** Pegmatites. The Canadian Mineralogist. Special publications 10. Mineralogical Association of Canada. 347p.
- **Correia-Neves, J. M.** 1997. Província Pegmatítica Oriental do Brasil. In SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E.T. & COELHO, C.E.S. eds. Principais Depósitos Minerais do Brasil: Rochas e Minerais Industriais. Parte B. Brasília DNPM/CPRM. V.4. Parte B. p. 343-362
- **Juchem, P. L.** 1999. Minerologia, geologia e gênese dos depósitos de ametista da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul. São Paulo: IGc-USP, 225p.
- **Chaves, M.L. & Chambel L.** 2003 Diamante: a pedra, a gema, a lenda. Oficina de Textos, SP. 231 p.

Gemas e gemologia

- Maior parte pertence ao reino mineral
- Minerais com características especiais como raridade, beleza, brilho e dureza
- Maiores valores por volume na extração mineral
- Brasil entre as maiores províncias do mundo
- Óptica mineralógica – análise não-destrutiva

Propriedades ópticas

- Importância da cristalografia
- Cor e traço
- Brilho
- Diafanidade
- Refração
- Birrefringência
- Pleocroísmo
- Dispersão
- Luminescência

Cristalografia

Isotrópicos cúbico

Anisotrópicos hexagonal

 trigonal

 tetragonal

 ortorrômbico

 monoclínico

 triclínico

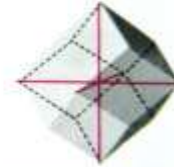
Sistema Cúbico



Cubo



Octaedro



Rombododecaedro



Prisma tetragonal e pinacóide basal

Sistema Tetragonal



Bipirâmide



Pirâmide com prisma

Sistema Ortorrômbico



Pinacóides

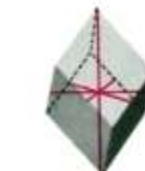


Bipirâmide



Prisma e pinacóide

Sistema Trigonal



Sistema Hexagonal



Prisma hexagonal e pinacóide basal



Prisma hexagonal e pinacóide basal



Bipirâmide hexagonal

Sistema Triclínico



Pinacóides



Pinacóides



Pinacóides



Pinacóides

Sistema Monoclínico



Prismas e pinacóides



Prismas e Clinopinacóide

Cor

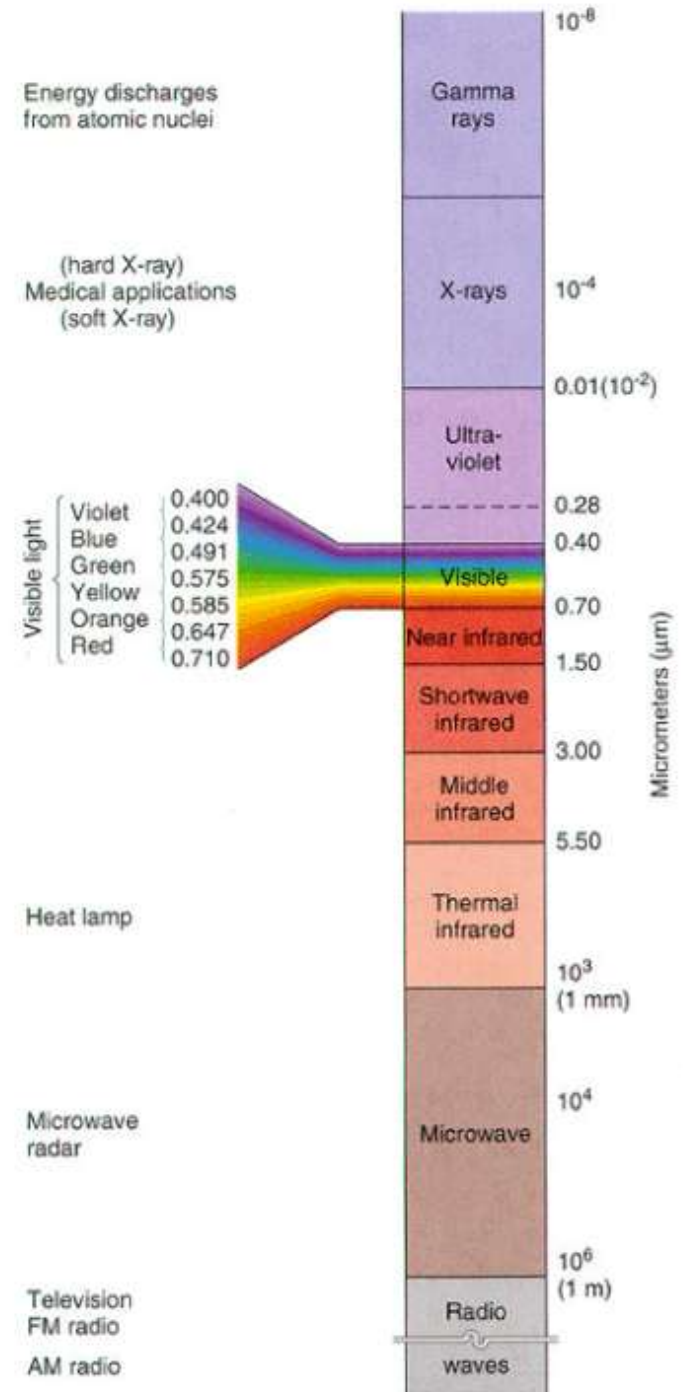
Resulta da absorção seletiva da luz

Idiocromáticos: mesma cor

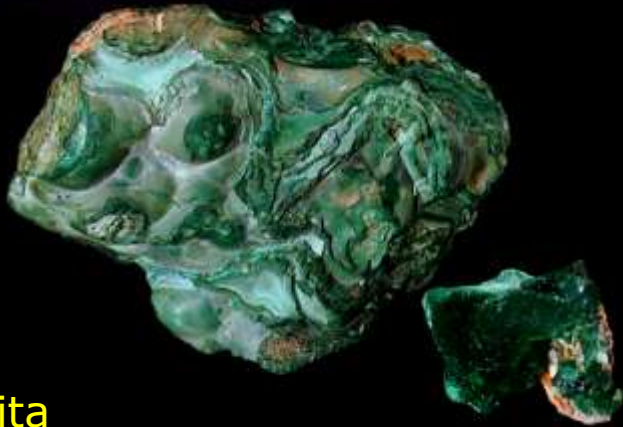
Ex. Malaquita, rodocrosita, azurita...

Alcromáticos: cor varia com impurezas que entram na estrutura do mineral

Ex. Coríndon (rubí e safiras), turmalinas (rubelita, verdelita...), berilo (água-marinha, esmeralda)



Cor - idiocromáticos



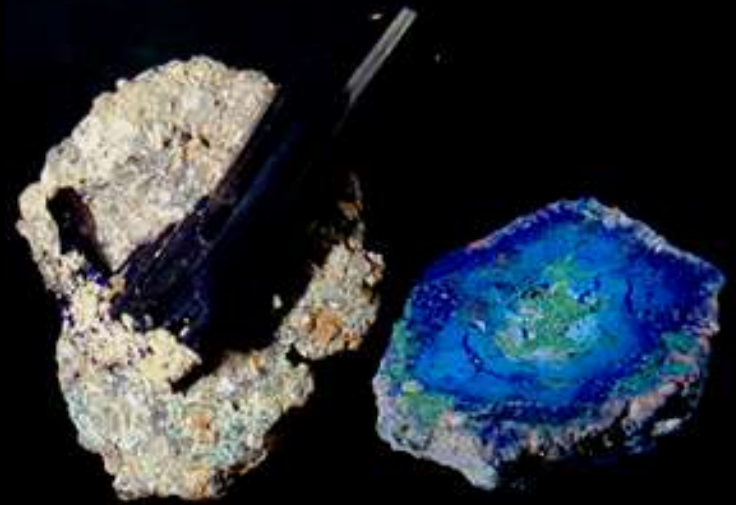
Malaquita



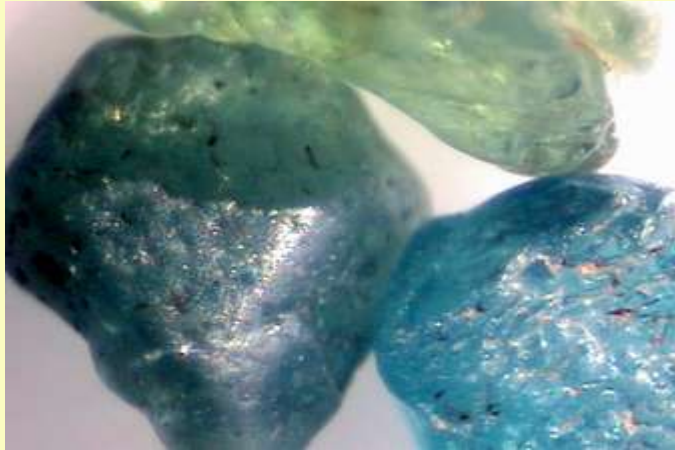
Rodocrosita



Enxofre



Azurita



Água marinha - Fe



Esmeralda - Cr

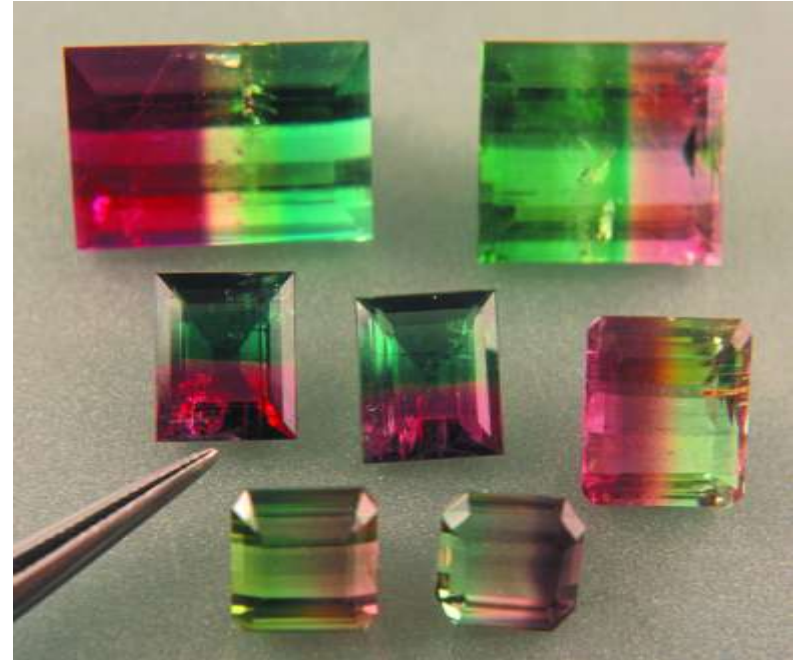
Cor - alocromáticos

Coríndon

Rubi - Cr

Safira azul - Fe e Ti

Cor - alocromáticos



Turmalina
















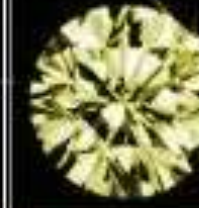
Granada



Zoneamento de cor
Várias cores no
mesmo cristal



Cor - alocromáticos

| | | | | | | |
|---|---|---|--|---|---|---|
|  |  |  |  |  |  |  |
| D | E | F | G | H | I | J |
| COLOURLESS | | | NEAR COLOURLESS | | | |
|  |  |  |  |  |  |  |
| K | L | M | N-O-P-Q-R | | S-T-U-V-W-X-Y-Z | |
| FAINT YELLOW | | | VERY LIGHT YELLOW | | LIGHT YELLOW | |

Cor e variações do branco em diamante – escala Cape

Brilho

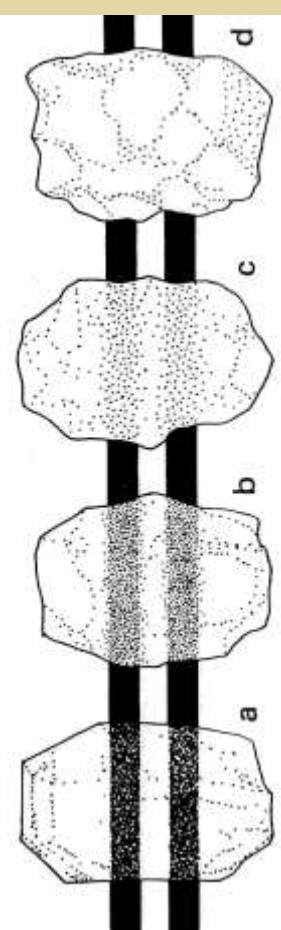


- É o reflexo da luz natural nas superfícies do mineral.
- Pode ser metálico ou não metálico.
- A grande maioria das **gemas** apresenta brilho **não metálico**:
 - adamantino: minerais transparentes a translúcidos de alto índice de refração. Ex: diamante, zircão, rutilo.
 - vítreo: Semelhante ao vidro. quartzo, topázio, turmalina.



Diafaneidade

- *Minerais transparentes*: não absorvem ou absorvem pouco a luz. Ex. quartzo
- *Minerais translúcidos*: absorvem a luz consideravelmente e dificultam o reconhecimento de imagens através deles. Ex. calcedônia
- *Minerais opacos*: absorvem toda a luz. Ex: elementos nativos metálicos, óxidos e sulfetos



Translúcidos e opacos são mais adequados para cabochão



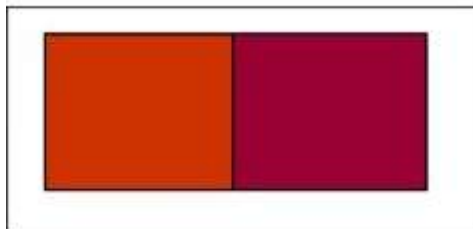
Pleocroísmo

Em gemas coloridas, transparentes e anisótropas pode ser observado o **pleocroísmo** com um **dicróscópio**.

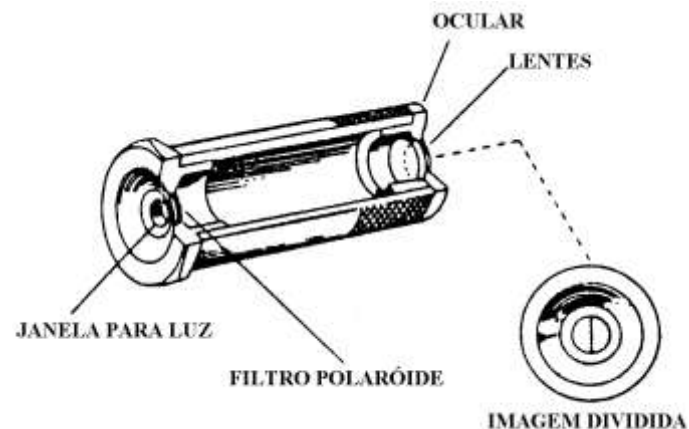
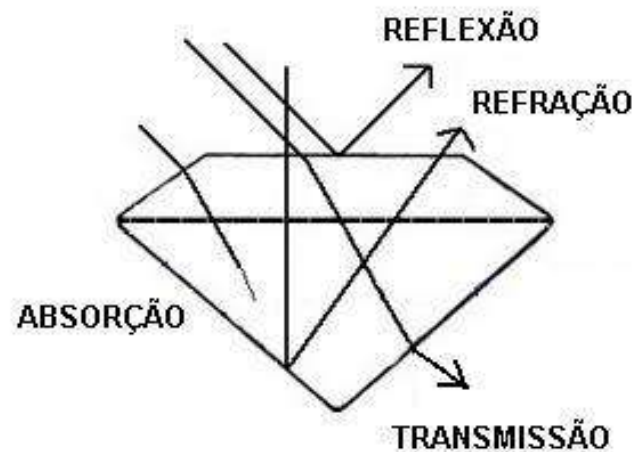
A gema apresenta cores diferentes conforme a direção cristalográfica.

O pleocroísmo pode ser diagnóstico para algumas gemas

Não pode ser observado em agregados cristalinos, gemas isotrópicas, incolores ou amorfas



Dicróscópio



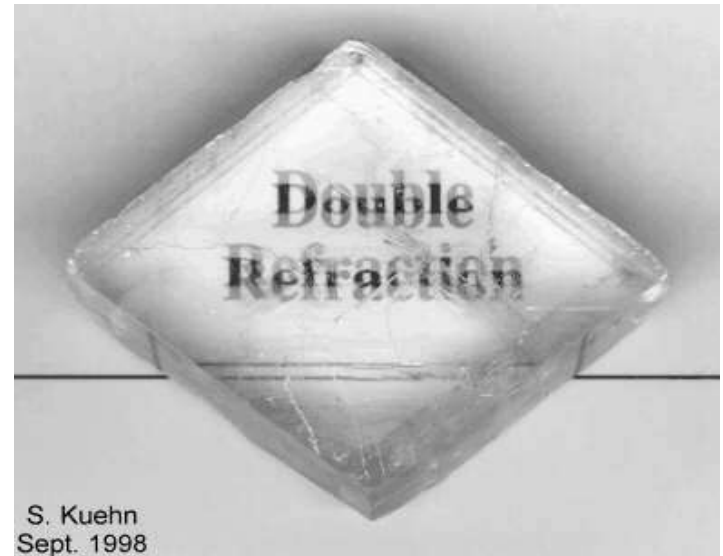
Birrefringência

Em cristais anisótipos ocorre a **dupla refração**, onde o raio de luz refratado divide-se em duas componentes em função do comportamento diferente da luz conforme a direção dos eixos

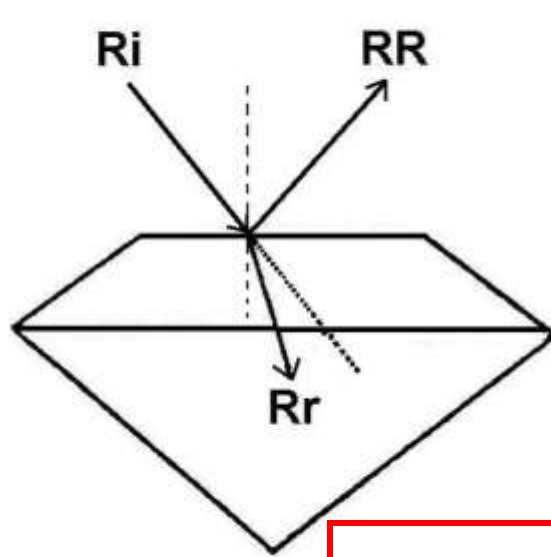
A diferença entre os índices de refração máximo e mínimo destes cristais resulta na **birrefringência**, cujo valor é um bom indicativo para diagnóstico da gema.



Exemplos de birrefringência alta: calcita, zircão, moissanita



Índice de Refração



Ri = raio incidente

RR = raio refletido

Rr = raio refratado

linha perpendicular ao ponto de incidência da luz

trajetória do raio de luz se não fosse refratado

$$IR = V_{ar} / V_{gema}$$

Exemplo:

Veloc. luz no ar = 300.000 km/s

Veloc. luz no diamante: 125.000 km/s

$$IR \text{ diamante} = 300.000 / 125.000$$

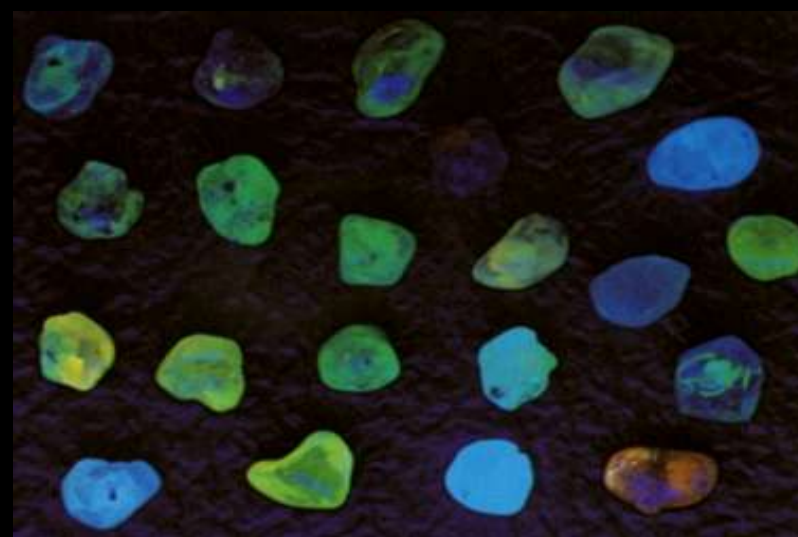
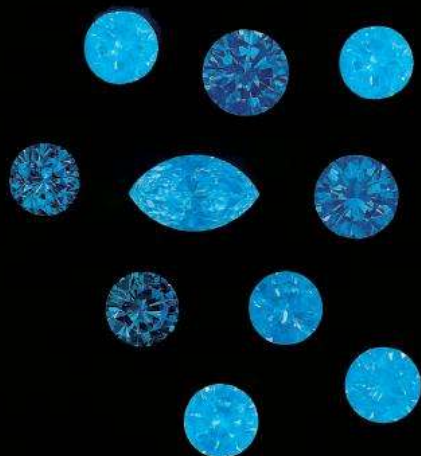
$$IR \text{ diamante} = 2,4$$

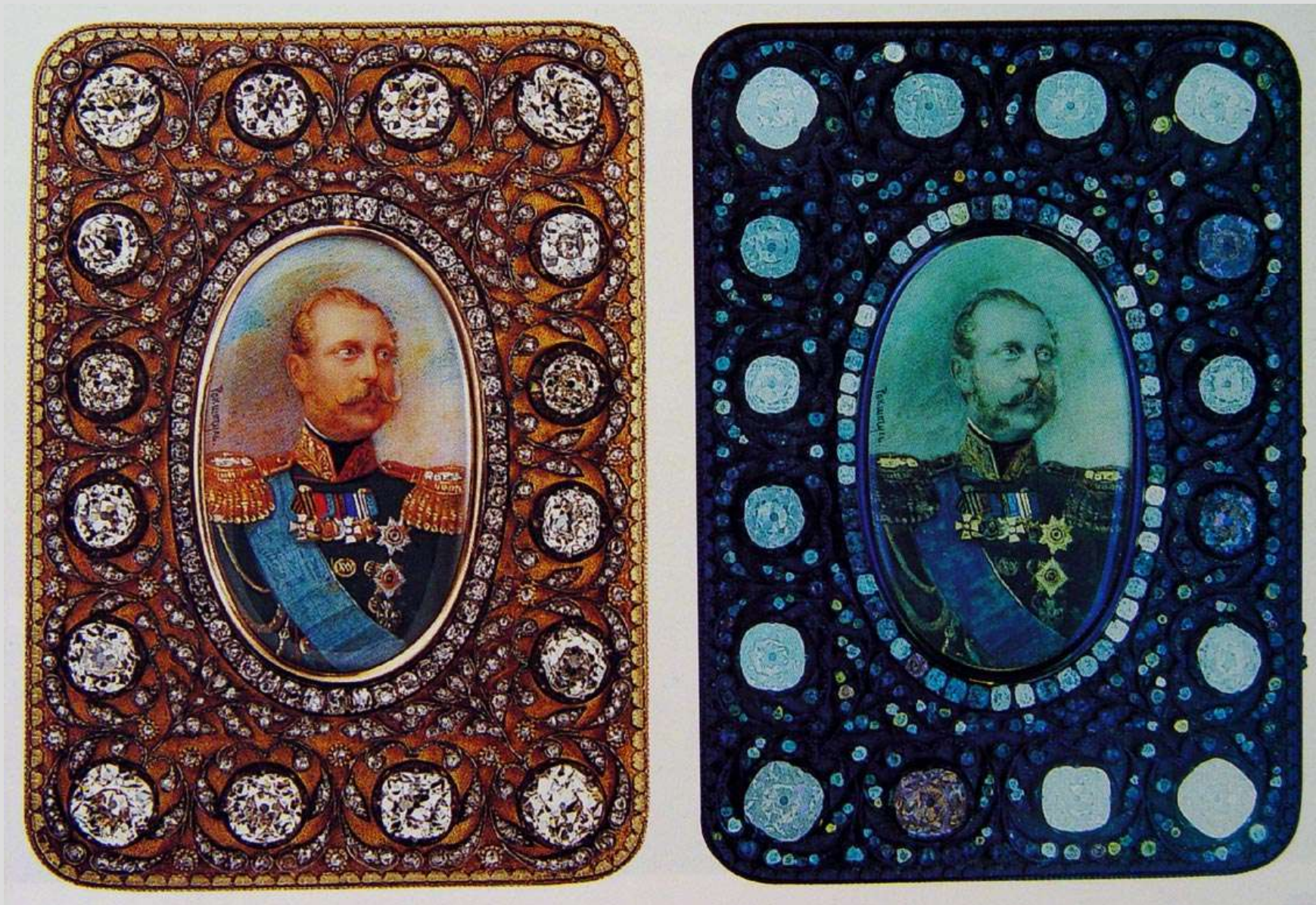
O **índice de refração é uma assinatura de cada substância** o que é fundamental na identificação de gemas. A compreensão da luz refletida também é importante na lapidação

Luminescência



Fluorescência ao UV





Identificação de imitações de diamantes em jóias antigas ou em lotes

Contextos geológicos dos minerais gemas

Pegmatitos – berilos, turmalinas, espodumênios e minerais raros

Geodos em basaltos – ametista, ágata, zeólitas...

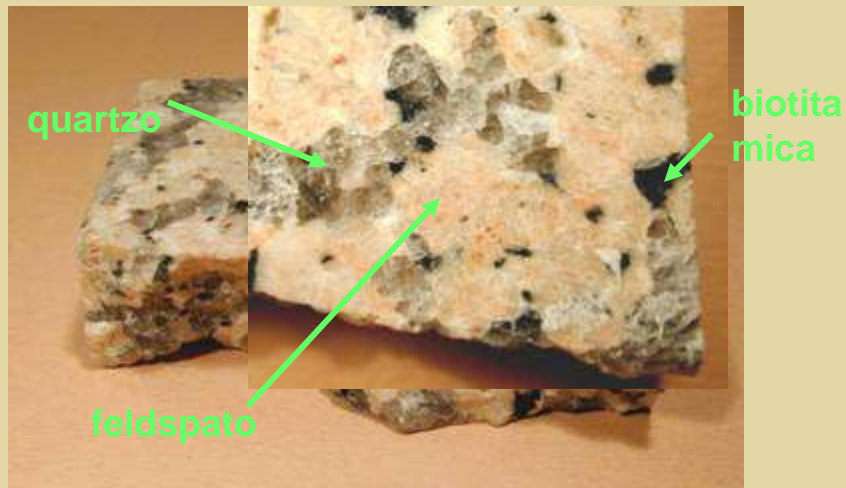
Diamante – kimberlito e depósitos secundários

Veios hidrotermais - quartzo

PEGMATITOS

PEGMATITOS são rochas holocristalinas que apresentam, pelo menos em parte, uma **granulação muito grosseira**, contendo como maiores constituintes minerais àqueles encontrados tipicamente em rochas ígneas comuns, mas com a característica de apresentarem extremas variações no que se refere ao **tamanho dos grãos**. Jahns (1955)

Termo aplicado hoje para textura e para definir um corpo de rocha proveniente de fonte ígnea ou metamórfica.



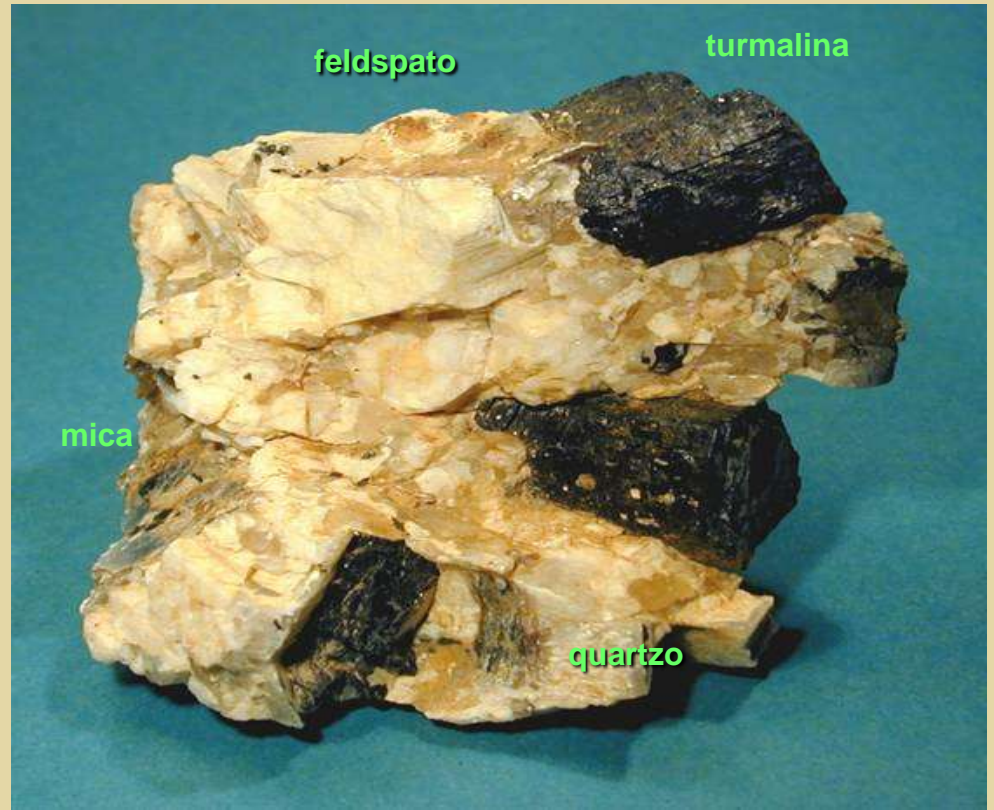


Pegmatito em gnaiss - PR

LICCARDO 2006

Pegmatito gráfico - Solonópole - CE

Pegmatito clássico - Galiléia - MG



feldspato

turmalina

mica

quartzo



mica

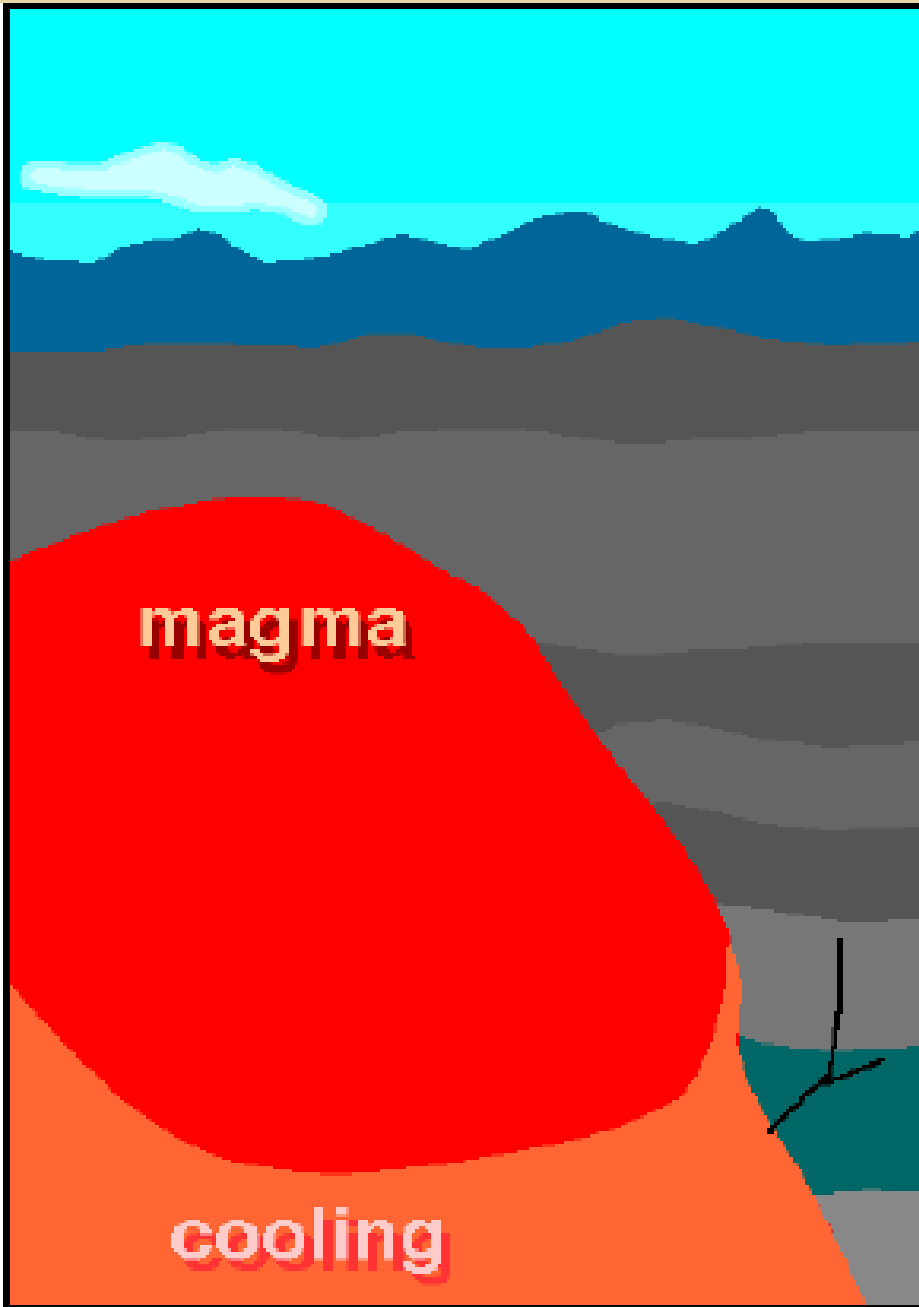
quartzo

feldspato

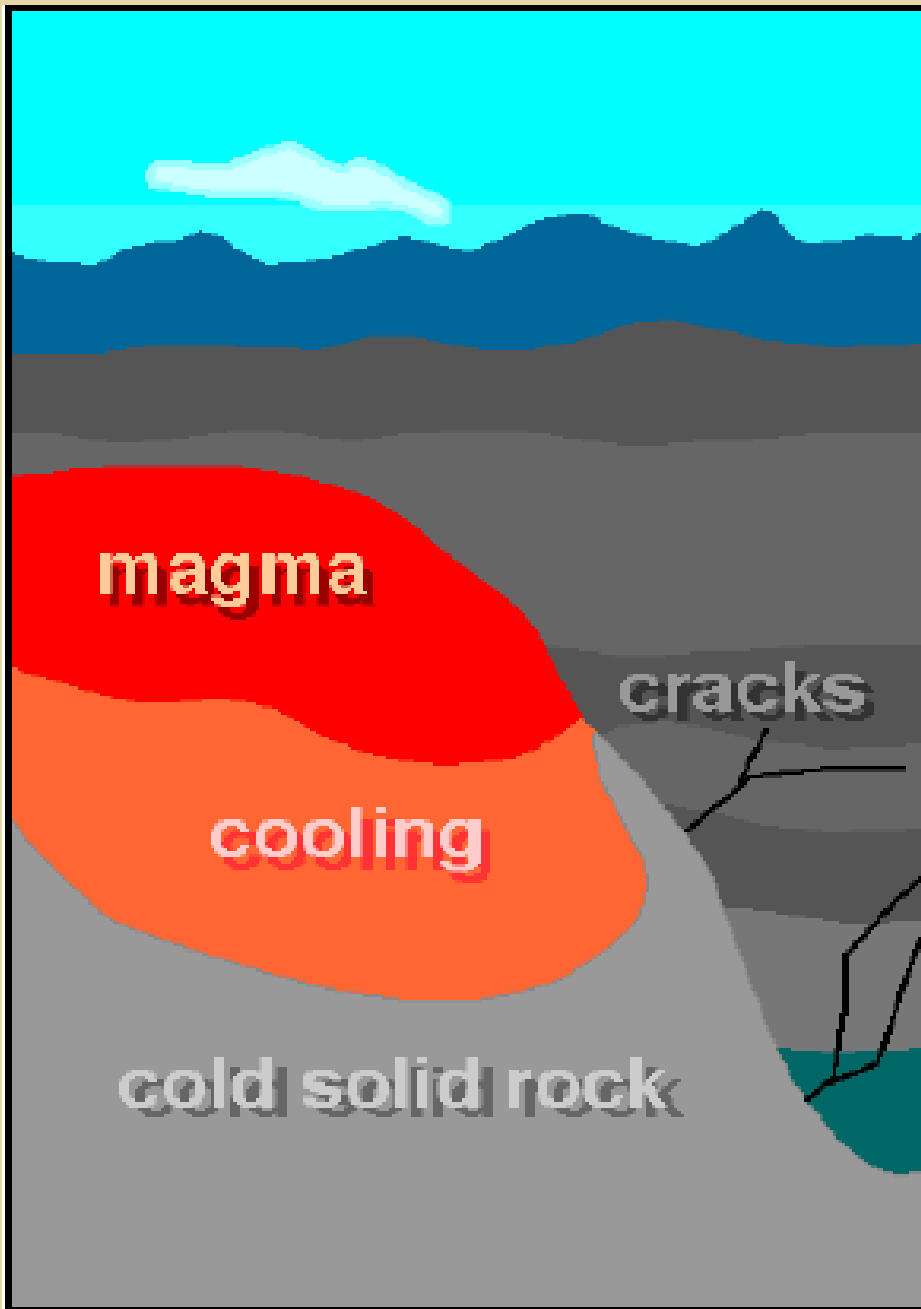


Simplificação do mecanismo mais aceito na formação de pegmatitos

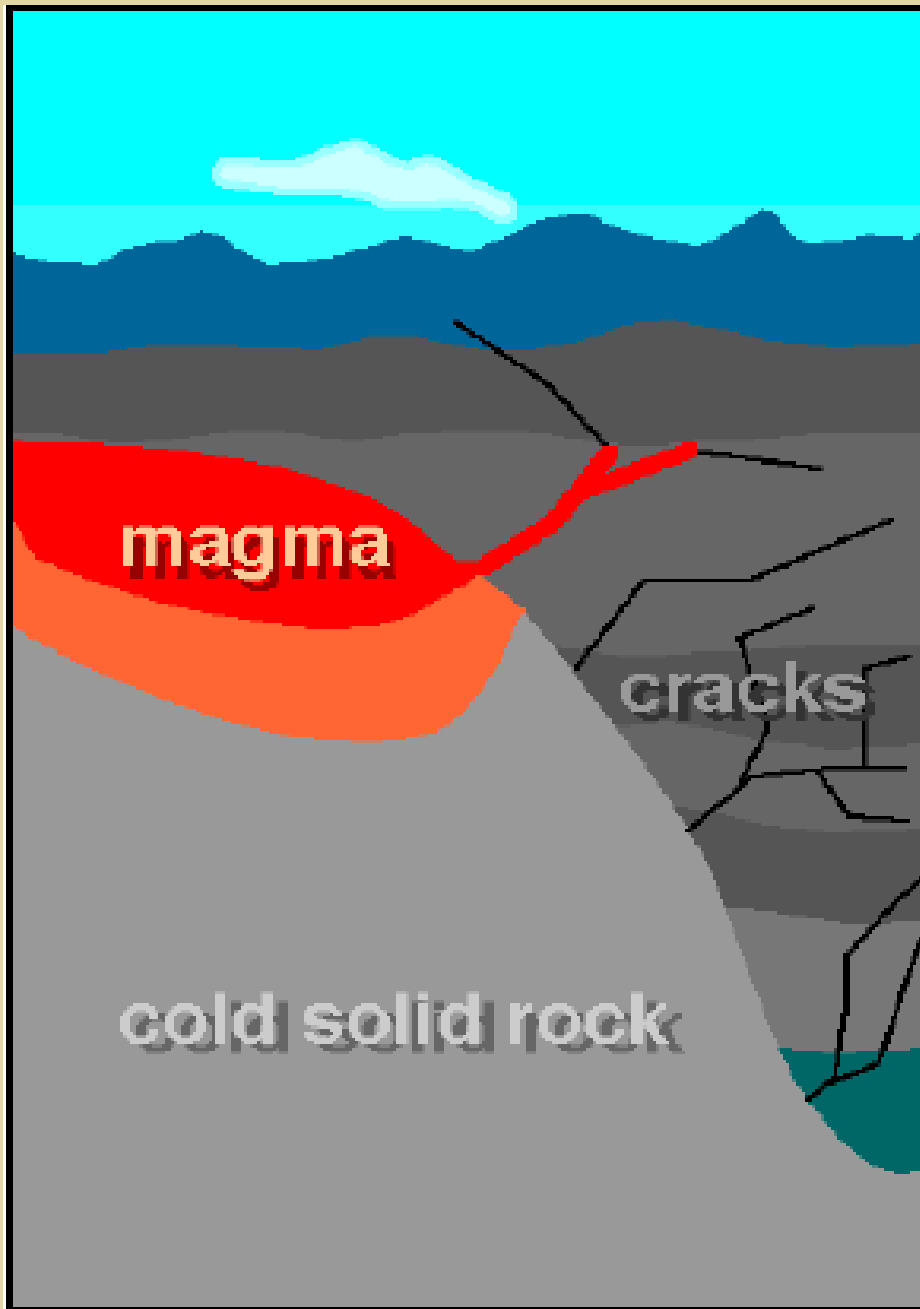
Ascensão do magma granítico



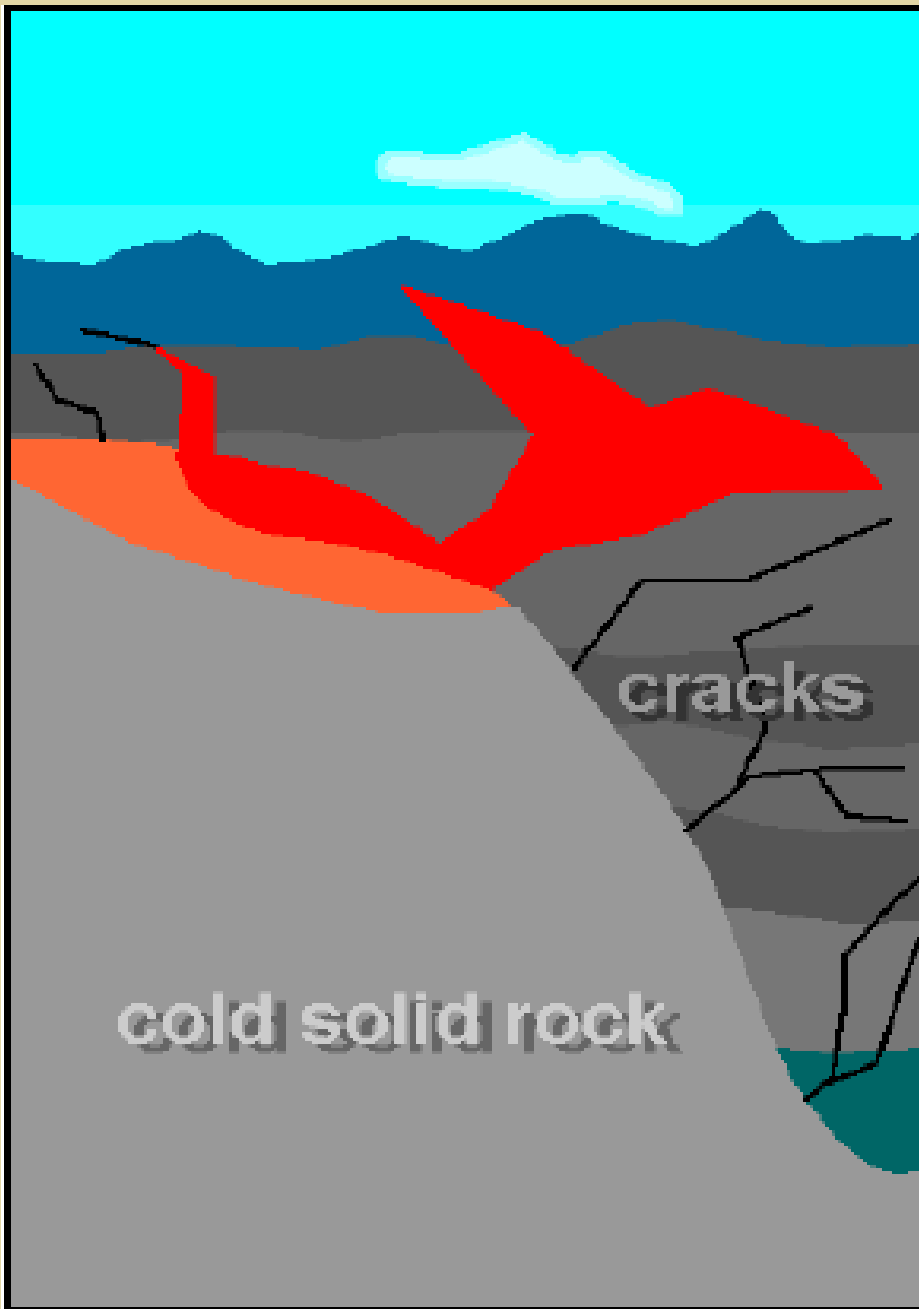
Início do resfriamento
do plúton



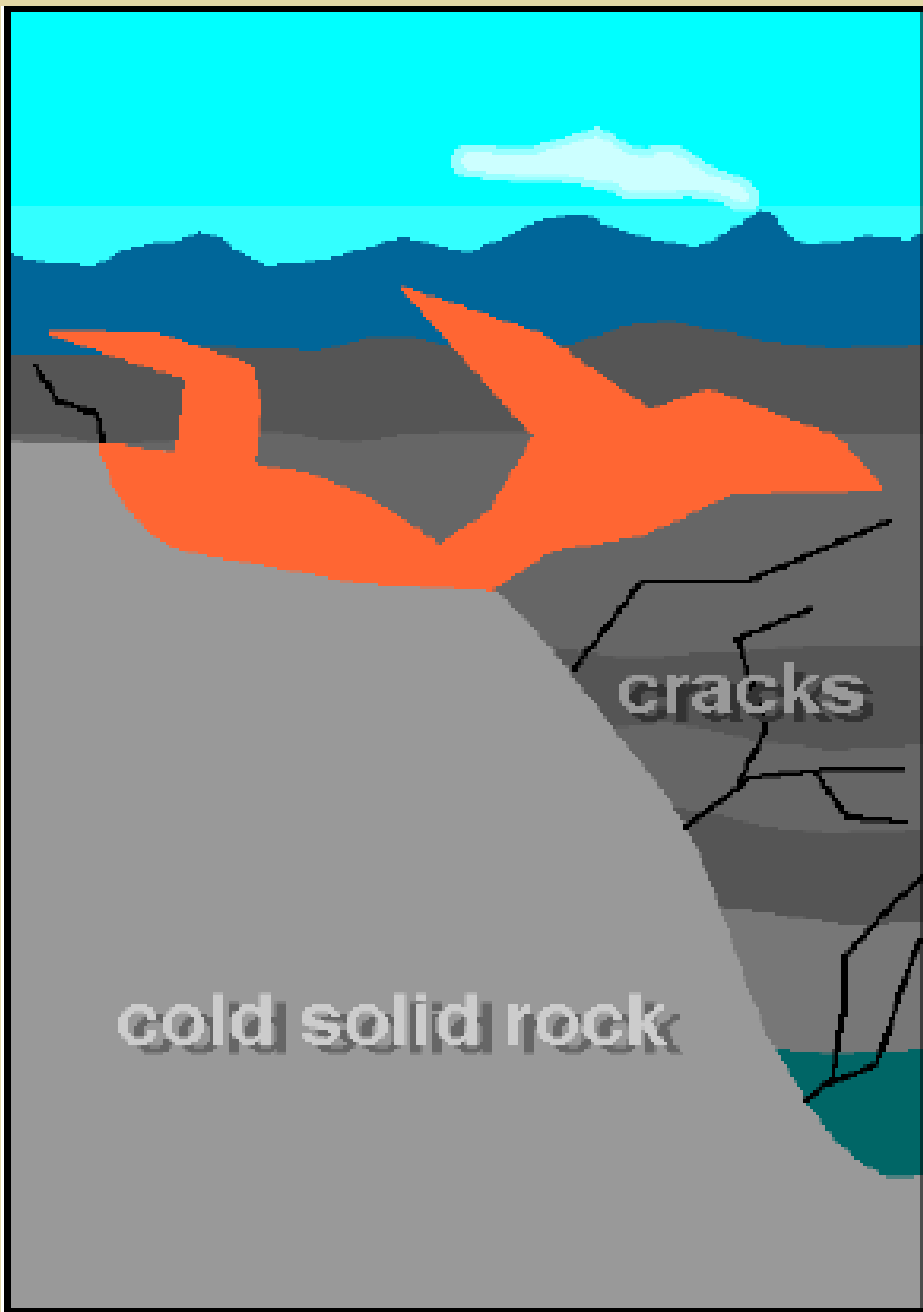
Resfriamento do
plúton e fraturamento
de encaixantes



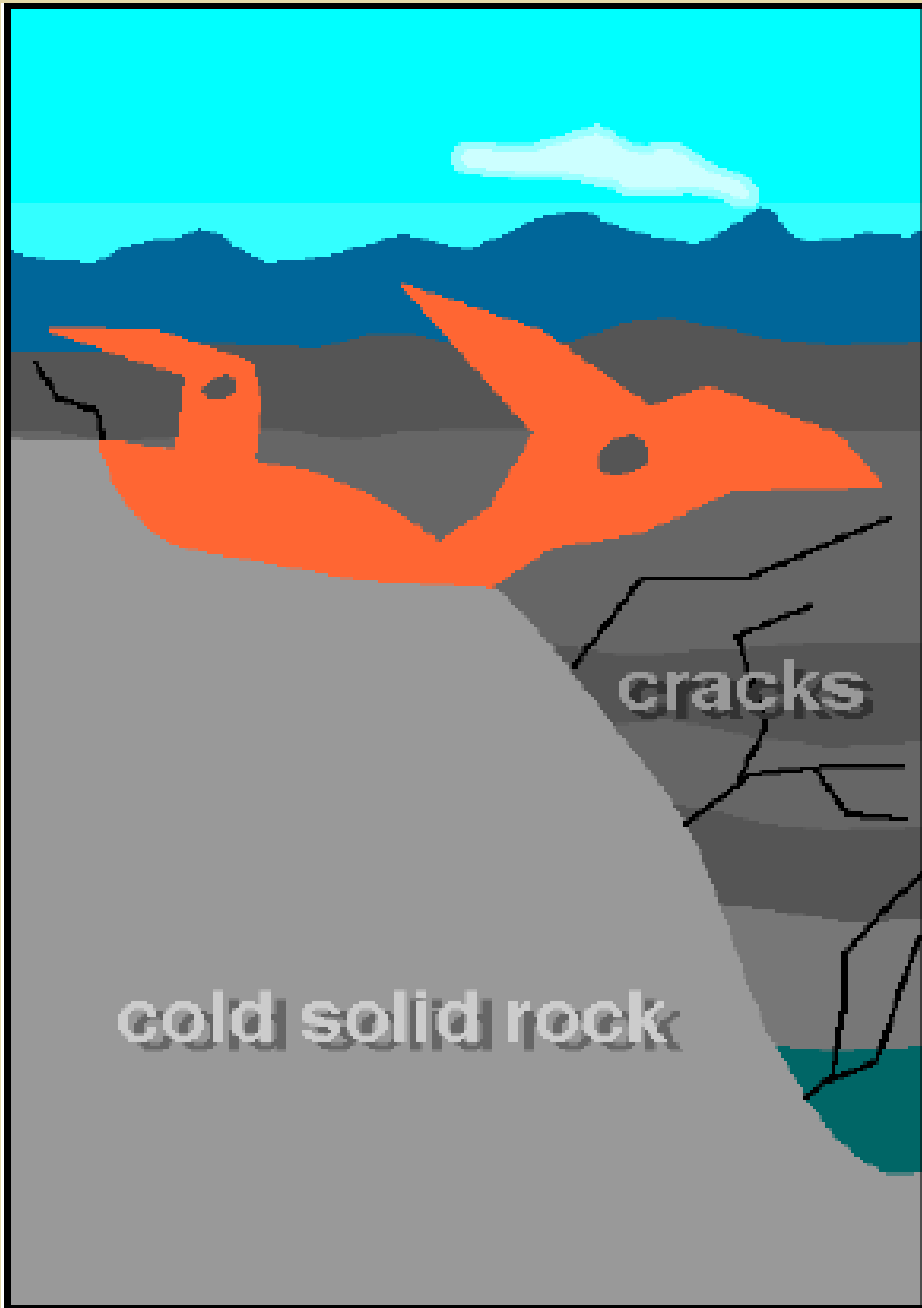
Magma residual rico em voláteis preenche fraturas



Magma residual rico
em voláteis preenche
fraturas



Final de resfriamento

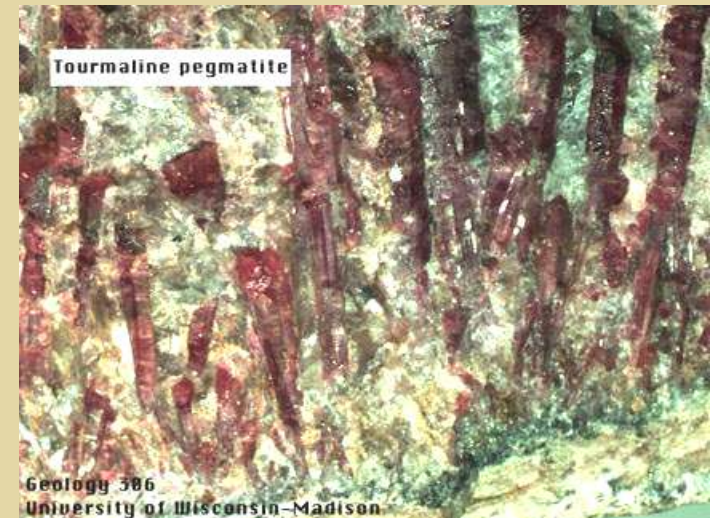


Concentração de elementos raros



Cristalização de
minerais raros e
eventual formação de
bolsões

Bolsões ou pockets
podem apresentar
cristalização de
turmalinas, euclásio,
brasilianitas e outros
minerais raros



Importância econômica

- **Minerais industriais** – feldspato, caulim, mica, minerais de lítio
- **Minerais-minério** – fontes de elementos raros (Li, Nb-Ta, Cs, ETR...), estanho e urânio
- **Minerais gemológicos e coleção** – turmalina, berilo, espodumênio...



Cristal de tantalita e feldspato caulizado
com folhas decimétricas de muscovita –
Guanhães – MG



Escapolita lapidada - MG





Pegmatito Alto do Giz – RN
Feldspato caulinizado e produção de
megacristais de berilo

Pegmatito São José da Batalha – PB
Fenda ao longo da zona de
exploração para a turmalina
paraíba.



Acari, RN



Medina, MG

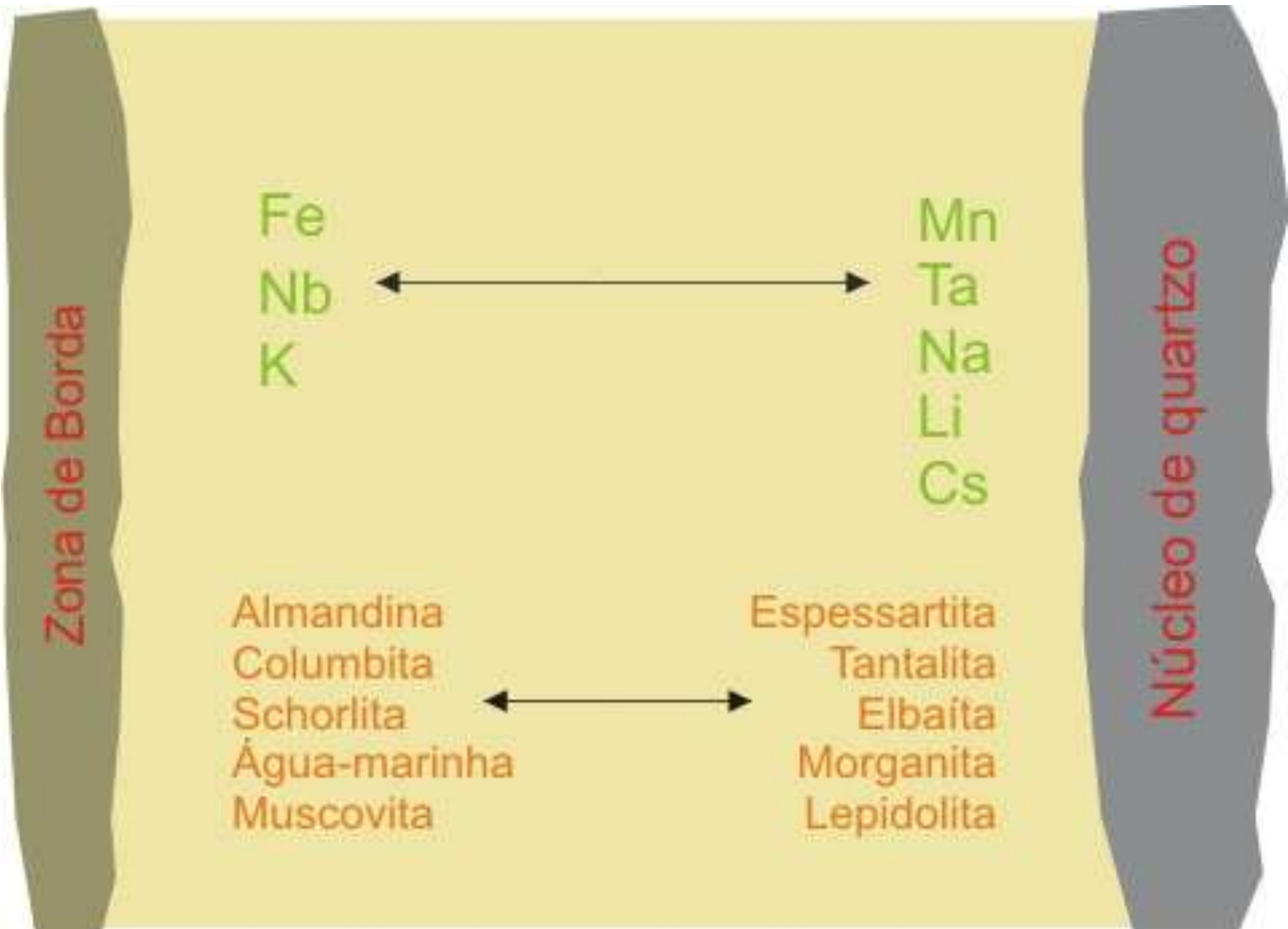
Batólitos graníticos existentes nas proximidades dos pegmatitos brasileiros. São as possíveis fontes para a formação dos pegmatitos



Quixadá, CE

Photo Liccardo 2007

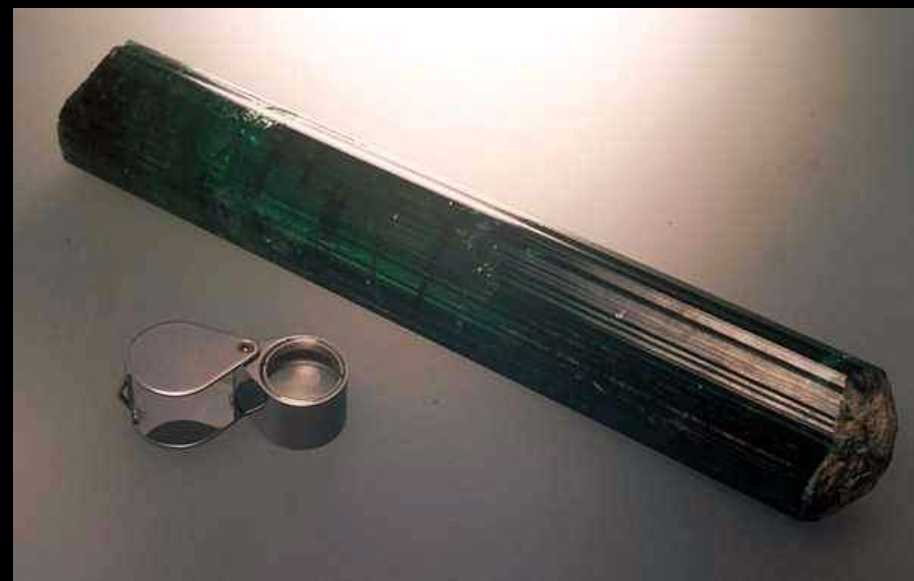
Zoneamento químico



Zoneamento químico do sistema
se reflete como zoneamento de
cor nos minerais



Turmalina multicolorida dos pegmatitos de
Madagascar. Abaixo megacristal de
turmalina verde de Araçuaí - MG

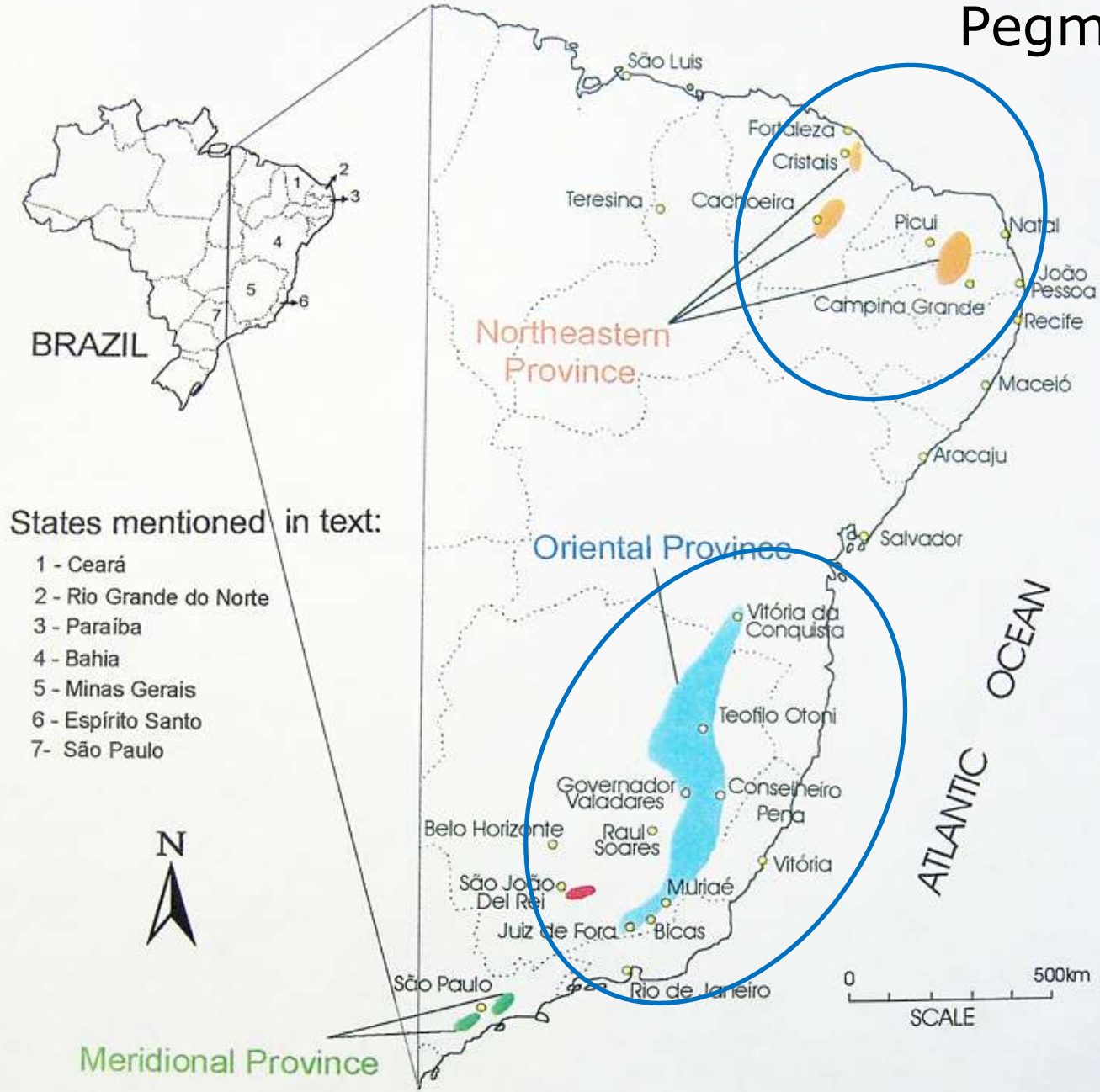




Extração de gemas em pegmatitos – processos rudimentares



Pegmatitos no Brasil



Distribuição das principais províncias pegmatíticas no território brasileiro
Províncias Oriental e Nordeste

Figure 4 - The three Brazilian pegmatite province [6].

Mineração Brasil produz principalmente feldspato para indústria cerâmica.

O feldspato de pegmatitos responde por cerca de metade da produção da matéria prima para a indústria cerâmica.





São característicos em pegmatitos os megacristais de quartzo, pesando às vezes algumas centenas de quilos.

Imagens dos Pegmatitos do Sapo (MG) e Pedra Branca (BA)





Cristais de água-marinha produzidos em pegmatitos de MG e expostos na Feira Internacional de Teófilo Otoni

Turmalinas produzidas
em Araçuaí e Gov.
Valadares - MG





Berilos, brasilianita e cristais de quartzo fumê de pegmatitos em MG

Morganitas produzidas em pegmatitos
de Minas Gerais





Variedades
gemológicas de
espodumênio –
Araçuaí - MG





Ametista biterminada com
agulhas de turmalina e
micas brancas e violeta –
típicos minerais de
pegmatitos – Minas Gerais

Pegmatitos são os fornecedores de Be para a cristalização de esmeraldas em Minas Gerais. A interação com rochas metaultramáficas proporciona a existência de Cr para a cor verde.



Mina Piteira - MG



Amostra Mina Belmont- MG



Amostra de Anagé - BA

Minerais variados produzidos em pegmatitos da Sub-Província da Borborema



Espessartita - RN



Almandina - RN



Quartzo rosa produzido em Acari, RN



Cristais de euclásio em quartzo - Equador - RN



Turmalina melancia em matriz quartzo- feldspática Parelhas - RN



Pegmatitos
em São José
da Batalha e
Junco do
Seridó, PB





10 mil US\$/ct



Turmalina paraíba

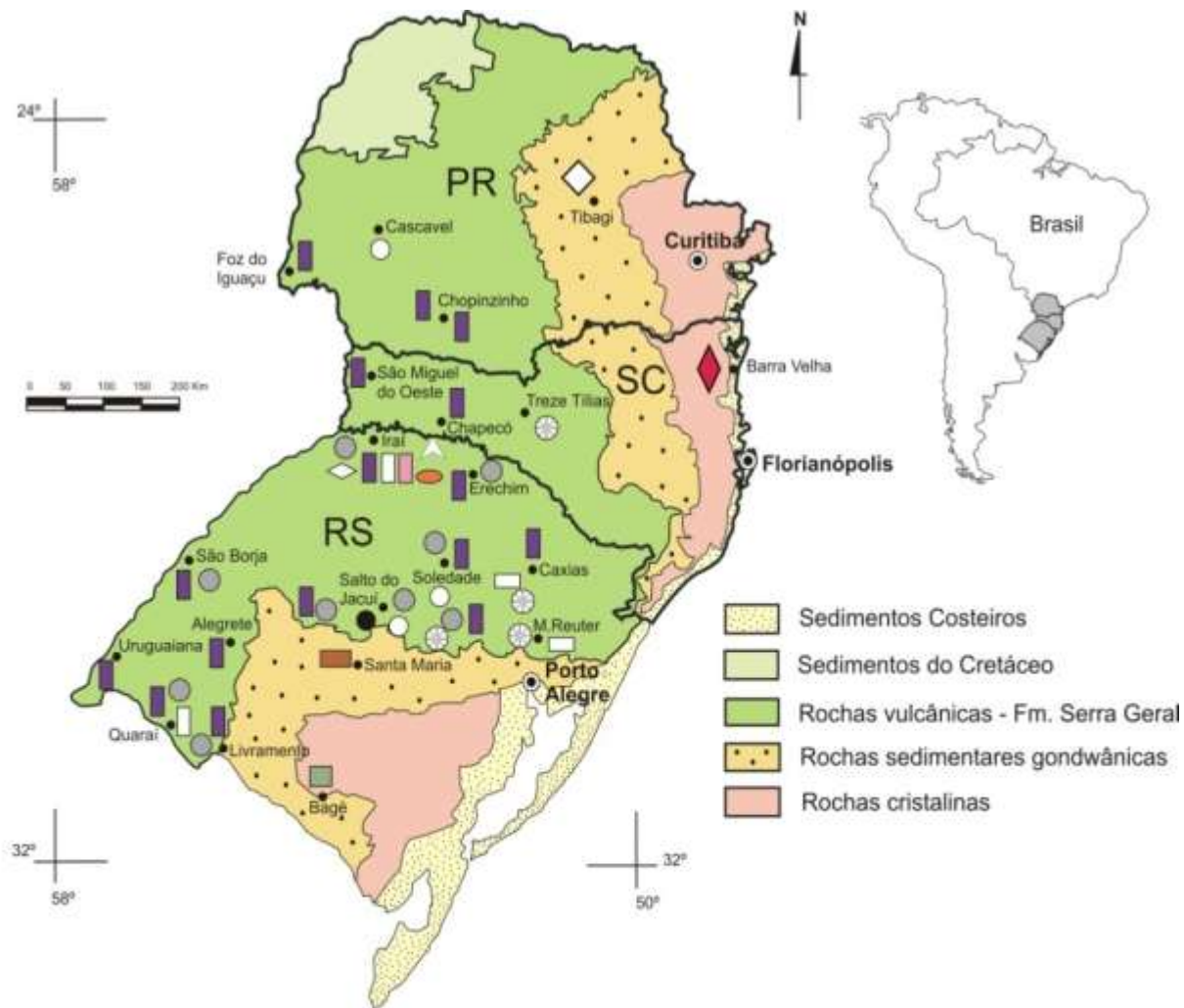
Cuprian-elbaite

Ocorrência única no mundo
em pegmatitos de São
José da Batalha - PB



BASALTOS

Geodos mineralizados em rochas vulcânicas da Bacia do Paraná



| MATERIAIS GEMOLÓGICOS | | | | |
|-----------------------|------------|-----------|--------------------|----------------|
| ● Ágata | ◇ Calcita | △ Gipsita | ● Ônix | ■ Quartzo rosa |
| ■ Ametista | ◆ Corindon | ● Jaspe | ■ Madeira fóssil | ■ Serpentinóis |
| □ Apofilita | ◇ Diamante | ○ Opala | □ Cristal de rocha | ⊗ Zeolitas |

Panorama econômico

- No sul do Brasil encontram-se as maiores jazidas do mundo de **ágata e ametista/citrino**
- Certos níveis de derrame basáltico do Mesozóico apresentam amígdalas preenchidas por quartzo e outros (geodos).
- É o segundo pólo de produção de gemas do Brasil.
- Maior destaque: RS com 300 frentes de garimpo
- Toda a produção do PR e SC vai para o RS



Chopinzinho - PR

ametista



Ametista do Sul - RS



Ametista do Sul - RS



Iraí - RS



Material produzido e lapidado em Chopinzinho - PR



Estoque de chapas de ágata em
Soledade - RS



Tingimento de ágata a quente



Diamante
Mineral especial

DIAMANTE

Diamante é encontrado em rochas vulcânicas especiais chamadas **kimberlitos** e em **depósitos secundários**, tipos aluviões, colúvios ou em **conglomerados**





Cristais euédricos a subédricos, cúbicos.



Octahedron



Macle

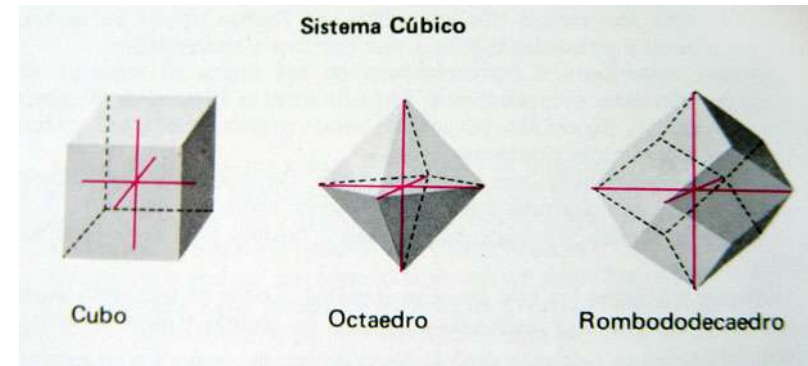


Dodecahedron



Cubic

- Propriedades ópticas

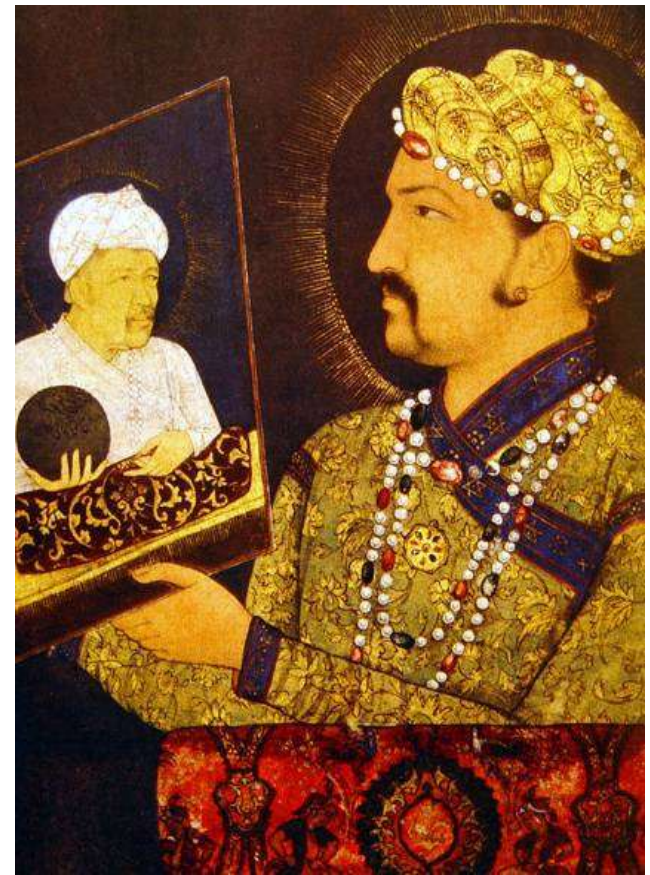
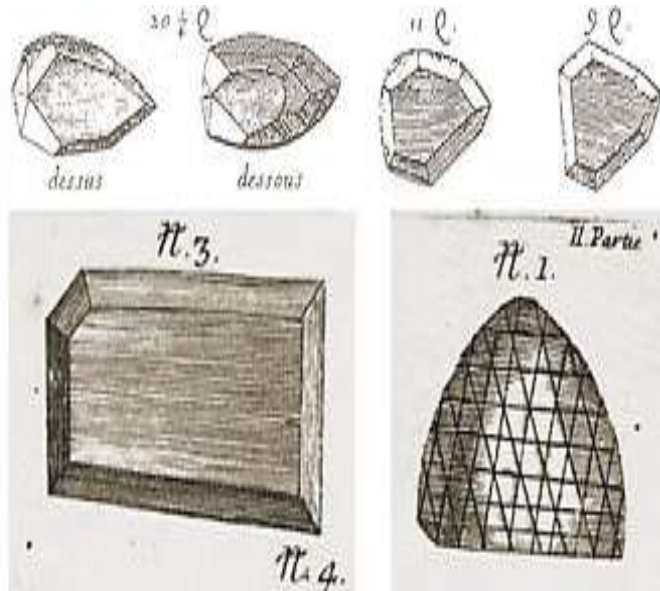


- Isótropo - Sistema isométrico
- Cor - várias
- Brilho - adamantino
- Diafaneidade - transparente a opaco
- Índice de refração alto - 2,42
- Birrefringência anômala
- Dispersão alta - 0,044 - "fogo"
- Fluorescência
- Permeável aos raios X
- Alta condutibilidade térmica



Histórico da extração de diamante no mundo

- Citações em textos indianos de 800 a.C.
- Golconda – Alexandre em 350 a.C.
- Bornéu – citações em 300 a.C
- Brasil – 1725
- África – 1866
- Rússia – 1954
- Austrália – 1978
- Canadá – 2001
- Brasil – reserva Roosevelt



Índia – Reino de Goa - Golconda Presença de Portugueses



Depósitos Aluvionares

Diamantina

1725 - 1860

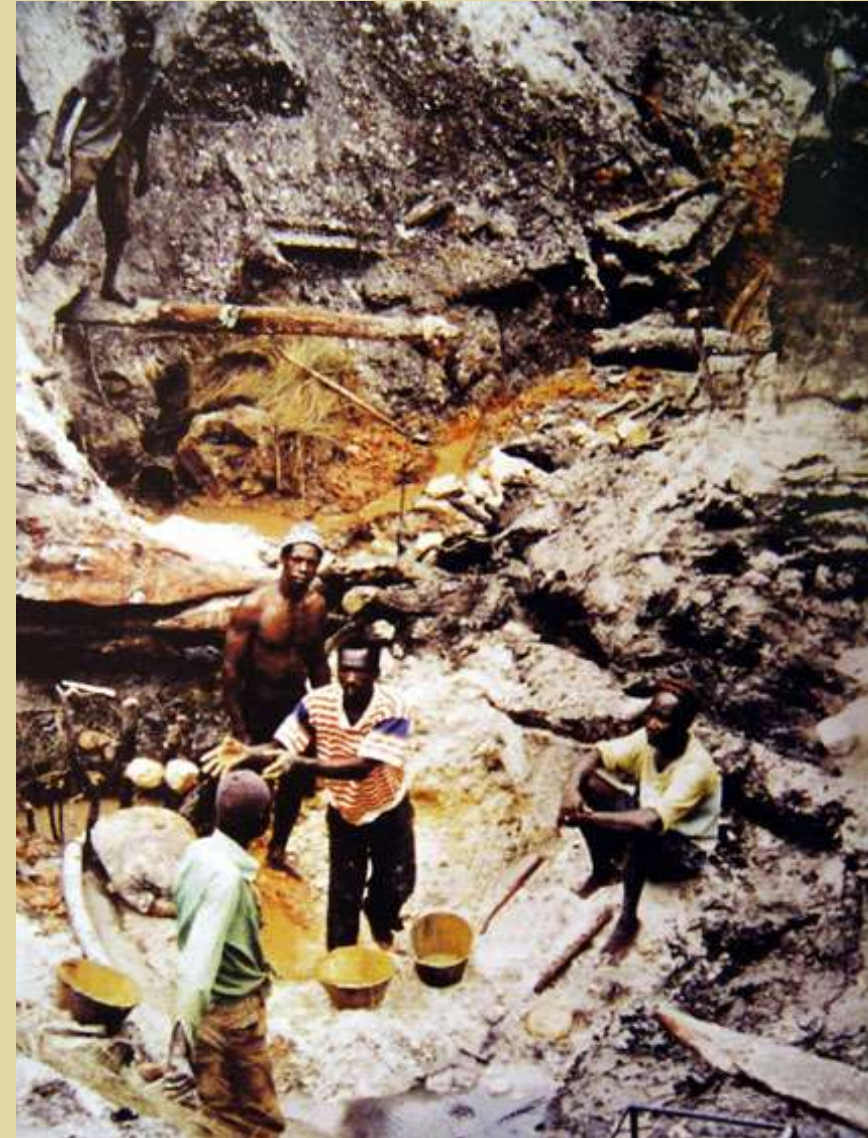


Descoberta de
diamantes no
Arraial do
Tejuco – Serro
Frio – Brasil
1725

África – descoberta nos rios Orange e Vaal - 1866



Campo de mineração no Vaal River (1873)



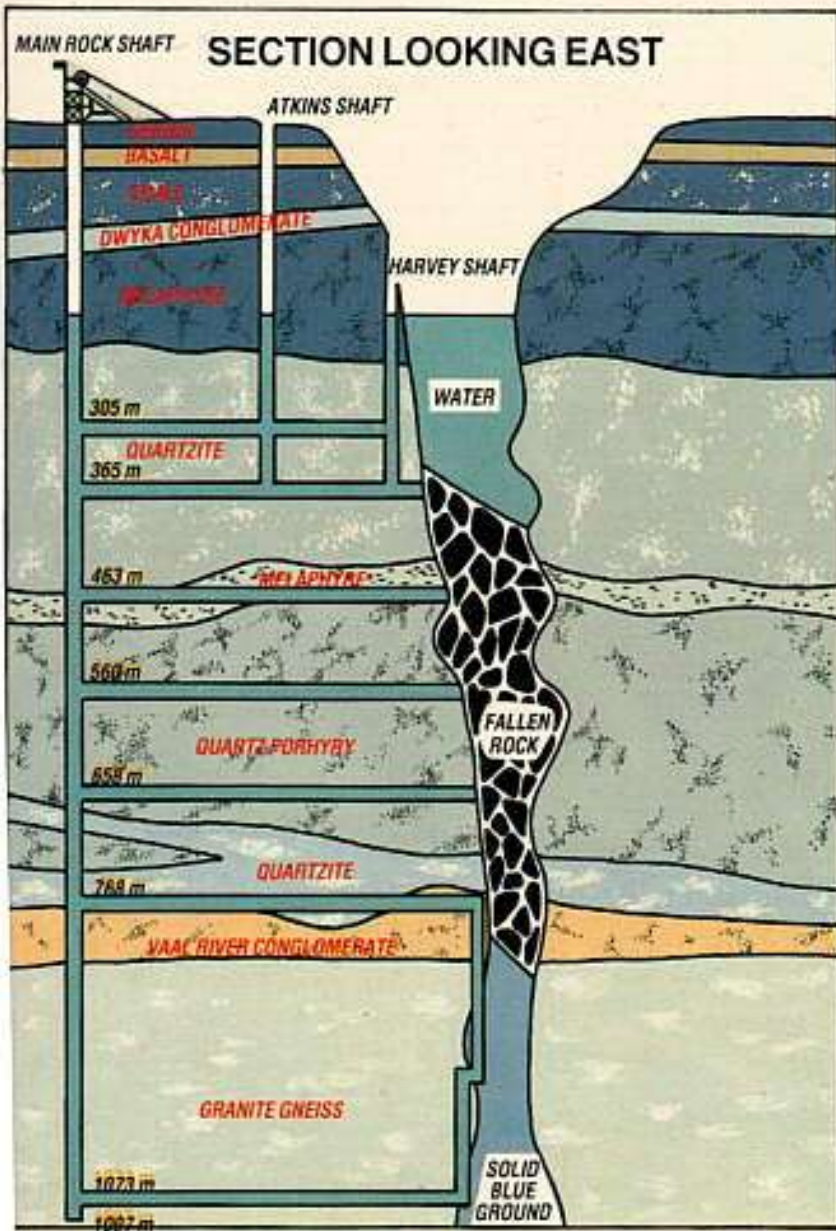
Extração aluvionar atual - Angola

Kimberley – África do Sul -
descoberta do diamante em
rocha 1871



Typical Diggers' Tent (Bergstroms) on Vaal River,
Barkly West. Published by
HARRIS, HODGKIN, & CO., Kimberley.
Compliments of season to all





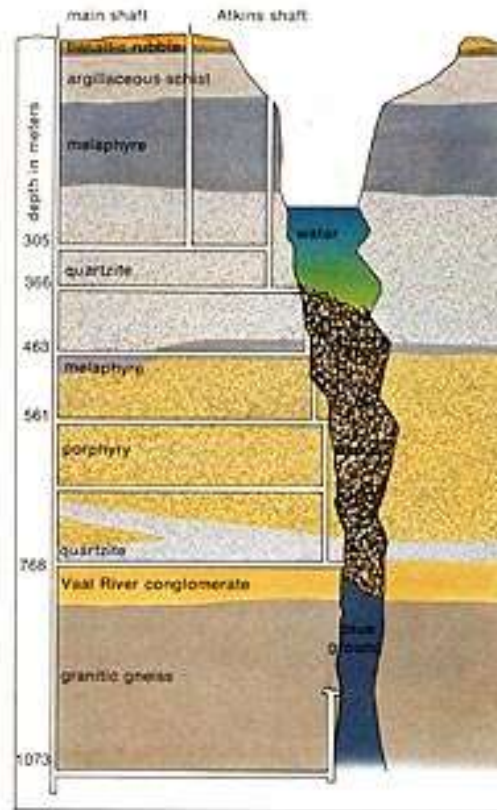
The Kimberley Mine

DISCOVERED 16TH JULY 1871 BY FLEETWOOD RAWSTORNE

| | |
|-----------------------------|-------------------|
| AREA AT SURFACE | 17 ha |
| PERIMETER | 1,6 km |
| AXIS NORTH & SOUTH | 500 m |
| AXIS EAST & WEST | 457 m |
| SURFACE TO TOP OF HARD ROCK | 90 m |
| SURFACE TO WATER | 165 m |
| DEPTH OF WATER | 230 m |
| GROUND EXCAVATED | 22 500 000 t |
| DIAMONDS PRODUCED | 14 504 566 carats |
| EQUIVALENT TO | 2722 kg |
| WORKING CEASED | AUGUST 1914 |



Big Hole – o maior buraco feito pelo homem no mundo

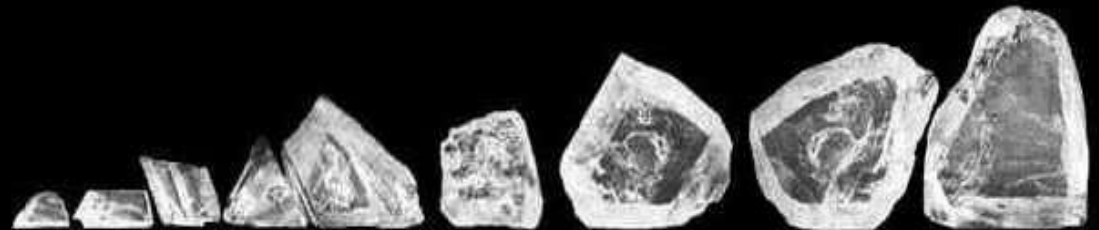


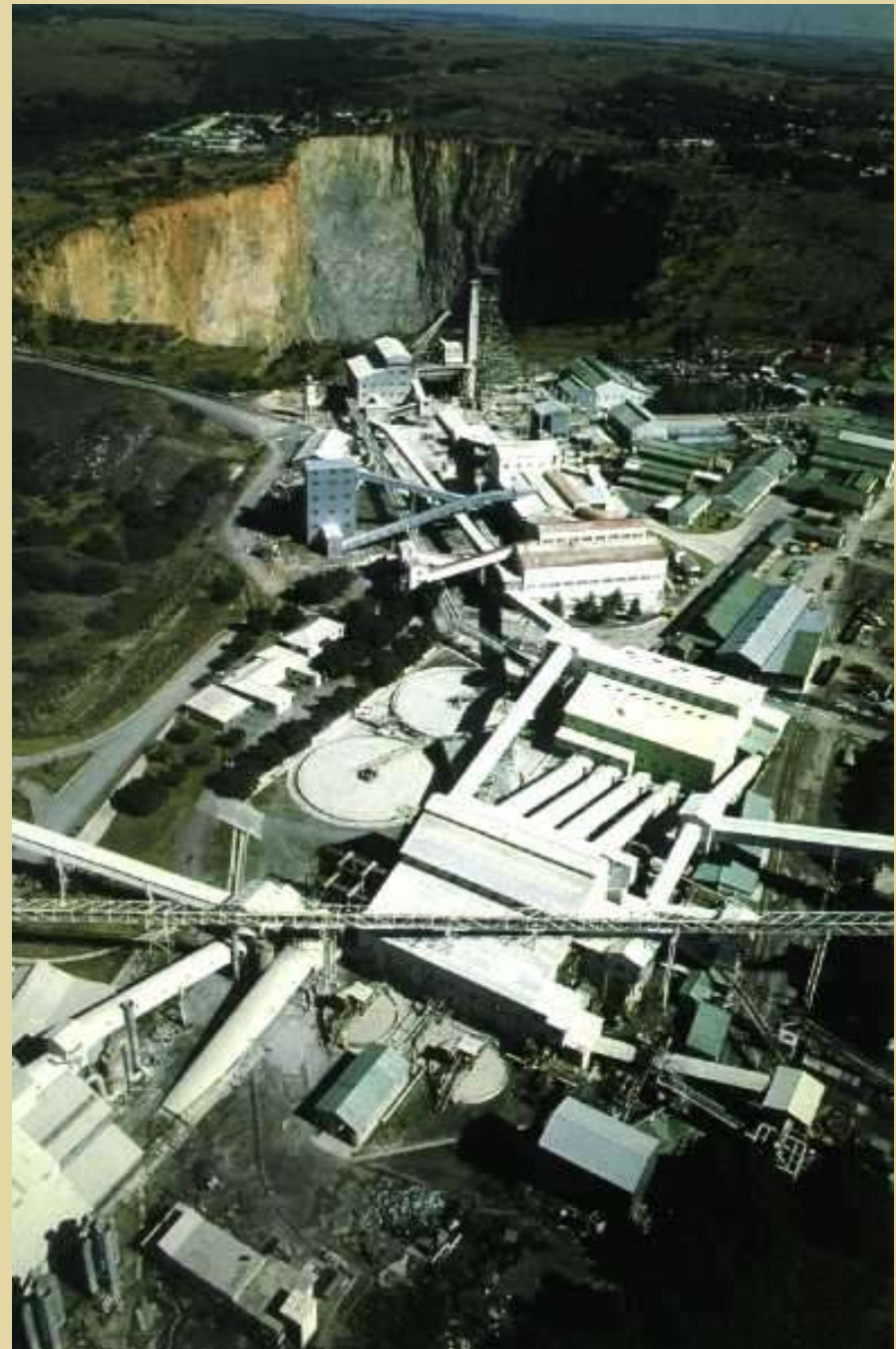


General View, Premier Diamond Mine, Transvaal.



CULLINAN
Bruto – 3116 ct
Encontrado em 1905 na Mina
Premier, resultou em 9 gemas





Processamento industrial
Extração a céu aberto de kimberlitos – Botswana, Lesotho...

Descoberta de kimberlitos mineralizados na Rússia – 1954
Kimberlito Mir na Sibéria

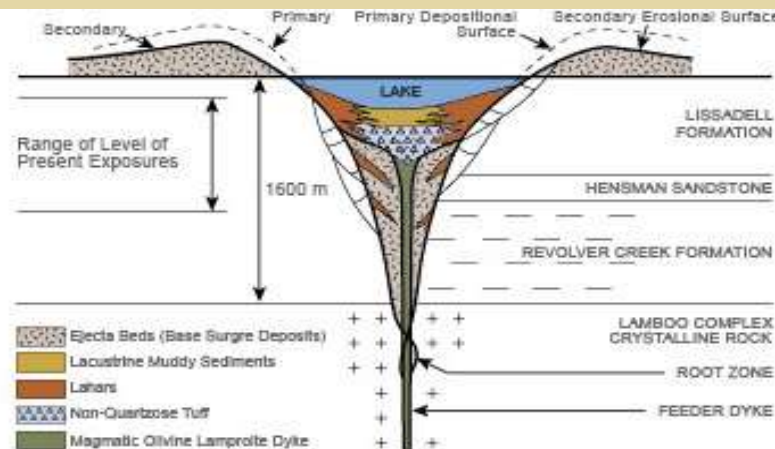


1978 – Descoberta
de diamantes em
lamproítos na
Austrália
Argyle Austrália
a maior mina do
mundo
diamantes rosa



ARGYLE
DIAMONDS

THE BRILLIANT LIGHT OF AUSTRALIA.





Summer

Diavik Diamond Mine, Canada



Winter



Anos 90 – Pesquisa e início de produção em kimberlitos no Canadá Diavik - extração no gelo do Ártico

Golconda, Índia 20 séc. para 12M ct

Diamantina, 1725 150 anos para 15M ct

África do Sul, 1866 10 anos para 15M ct

Sibéria, 1954 17M ct/ano

Austrália, 1980 40M ct/ano

- **Processos genéticos**

-Em 1887 foi descrita rocha “matriz” do diamante como um peridotito porfirítico, logo em seguida denominado **Kimberlito**

-A partir do reconhecimento da rocha **centenas de corpos** foram identificados na África.

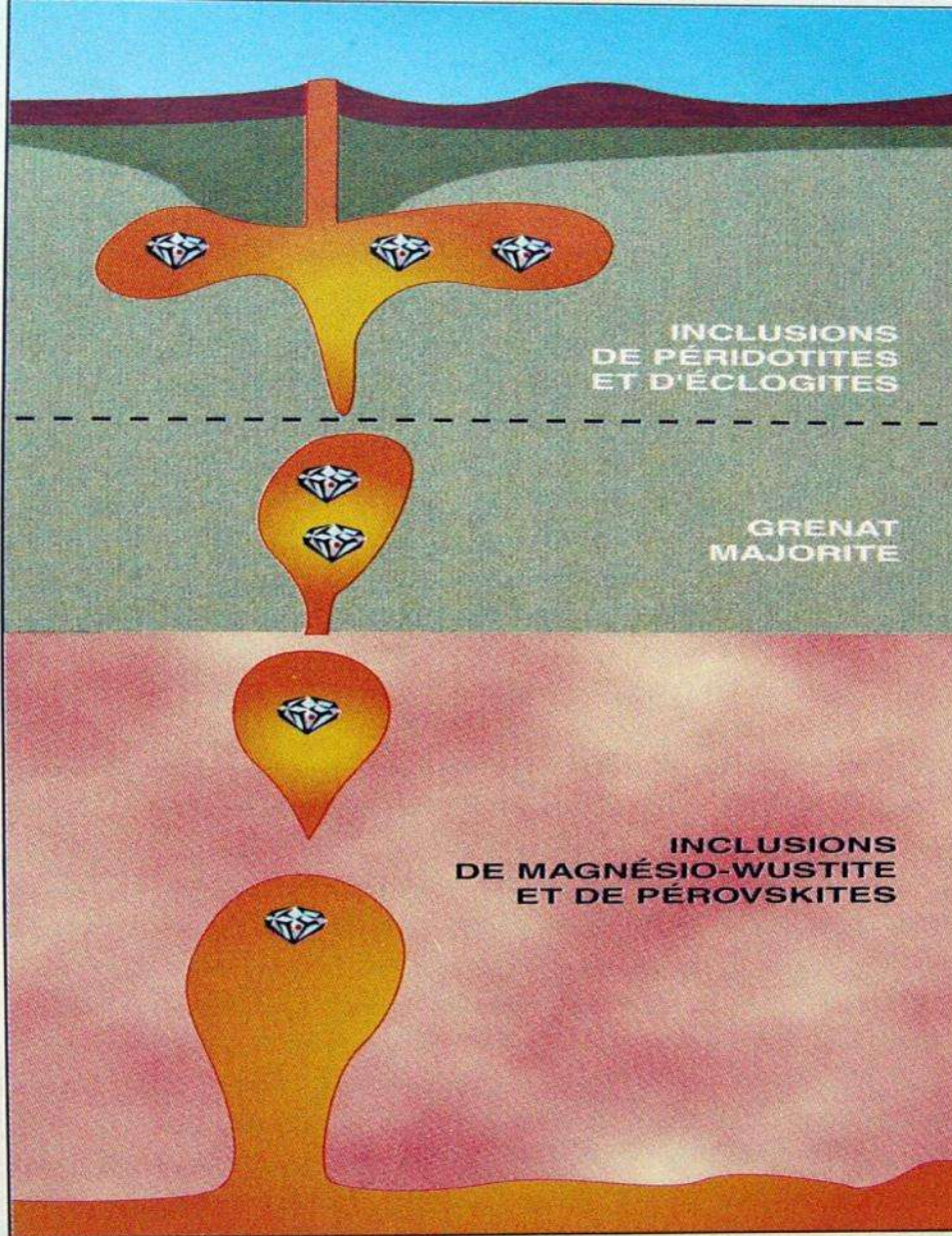
-Análises químicas e datações dos kimberlitos e de inclusões no diamante mostraram que o **diamante não se forma nesta rocha.**

-**Kimberlito** – rocha vulcânica de composição mantélica alcalina que transportou o diamante das profundezas para a superfície em erupção por chaminés estreitas - **pipes**

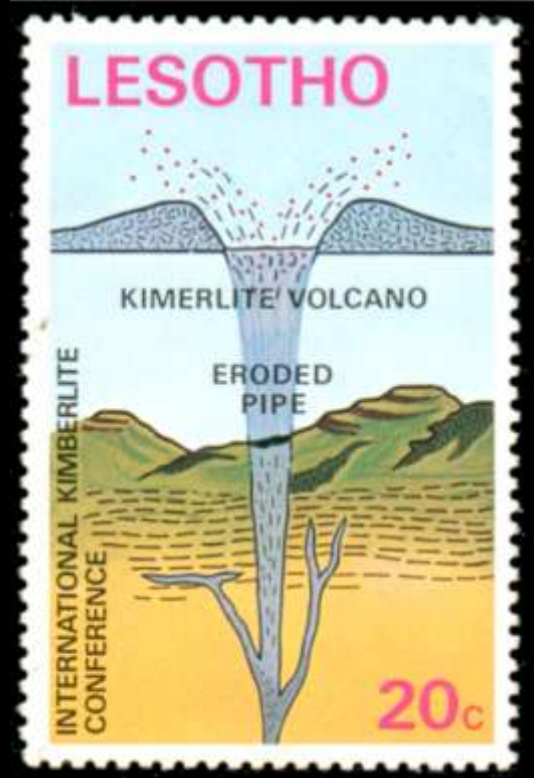
MANTEAU
SUPÉRIEUR

ZONE DE
TRANSITION

MANTEAU
INFÉRIEUR



5. LES DIAMANTS RENFERMENT DES INCLUSIONS caractéristiques de la zone où ils se sont cristallisés. Ainsi, les diamants les plus profonds contiennent des inclusions de magnésio-wustite et des minéraux à struc-



Profundidades de
150 a 1200km
T e P muito altas

Cristalização do
diamante
 $P = 75 \text{ t/cm}^2$
 $T = 1300 \text{ a } 1500^\circ \text{ C}$

• Depósitos Primários

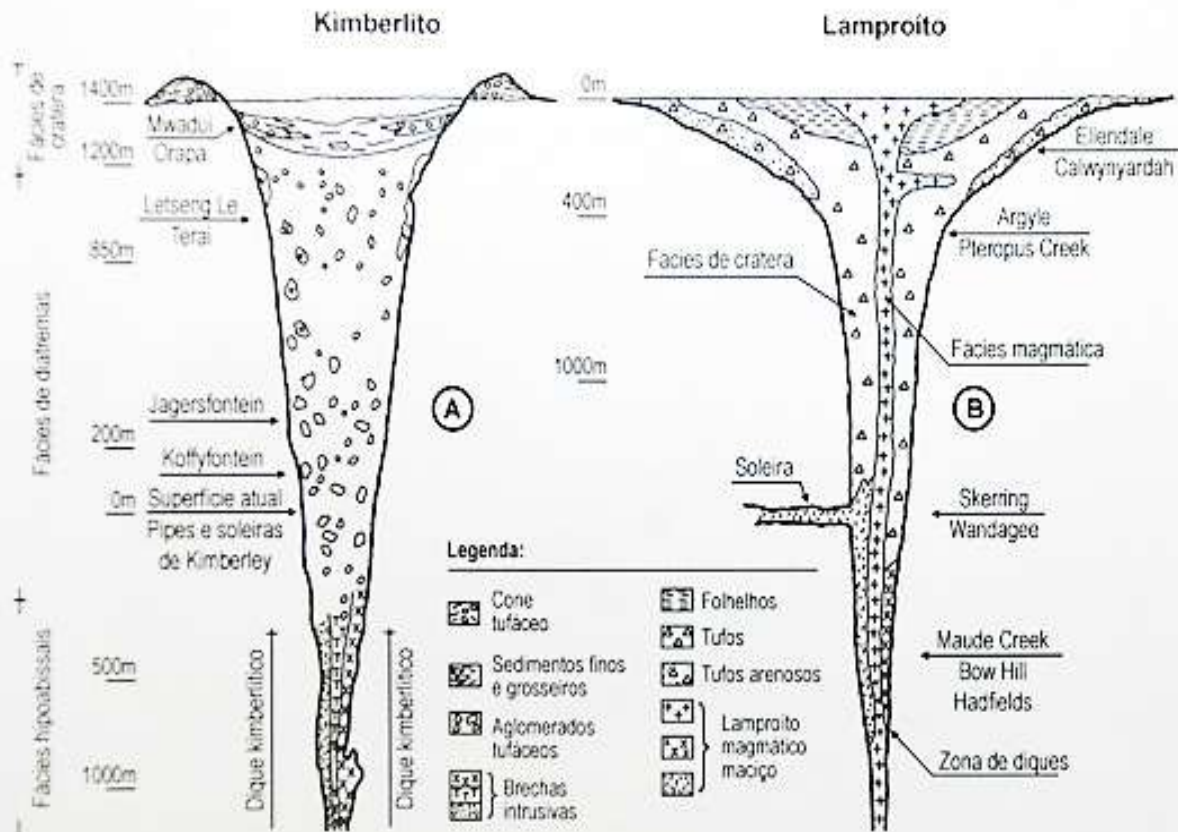


Fig. 3.4 Esquema idealizado da morfologia de um pipe kimberlítico, incluindo suas três zonas ou fácies características e os níveis atuais de erosão a que estão submetidos alguns dos mais conhecidos kimberlitos sul-africanos (simplificado de Hawthorne, 1975 – kimberlito, e Atkinson et al., 1983, in Gonzaga & Tompkins, 1991 – lamproíto).

Forma e tamanho de KCRs – kimberlito e lamproíto

Kimberlito – cenoura

Lamproíto – taça de champagne

Diâmetro da cratera é limitado em geral (centenas de metros)

Lamproítos são mais largos

- Depósitos Primários

Extração subterrânea no kimberlito Premier, África do Sul – De Beers





Coromandel

1 cm



Indaiá

2 cm



5 cm

Charneca



Limeira

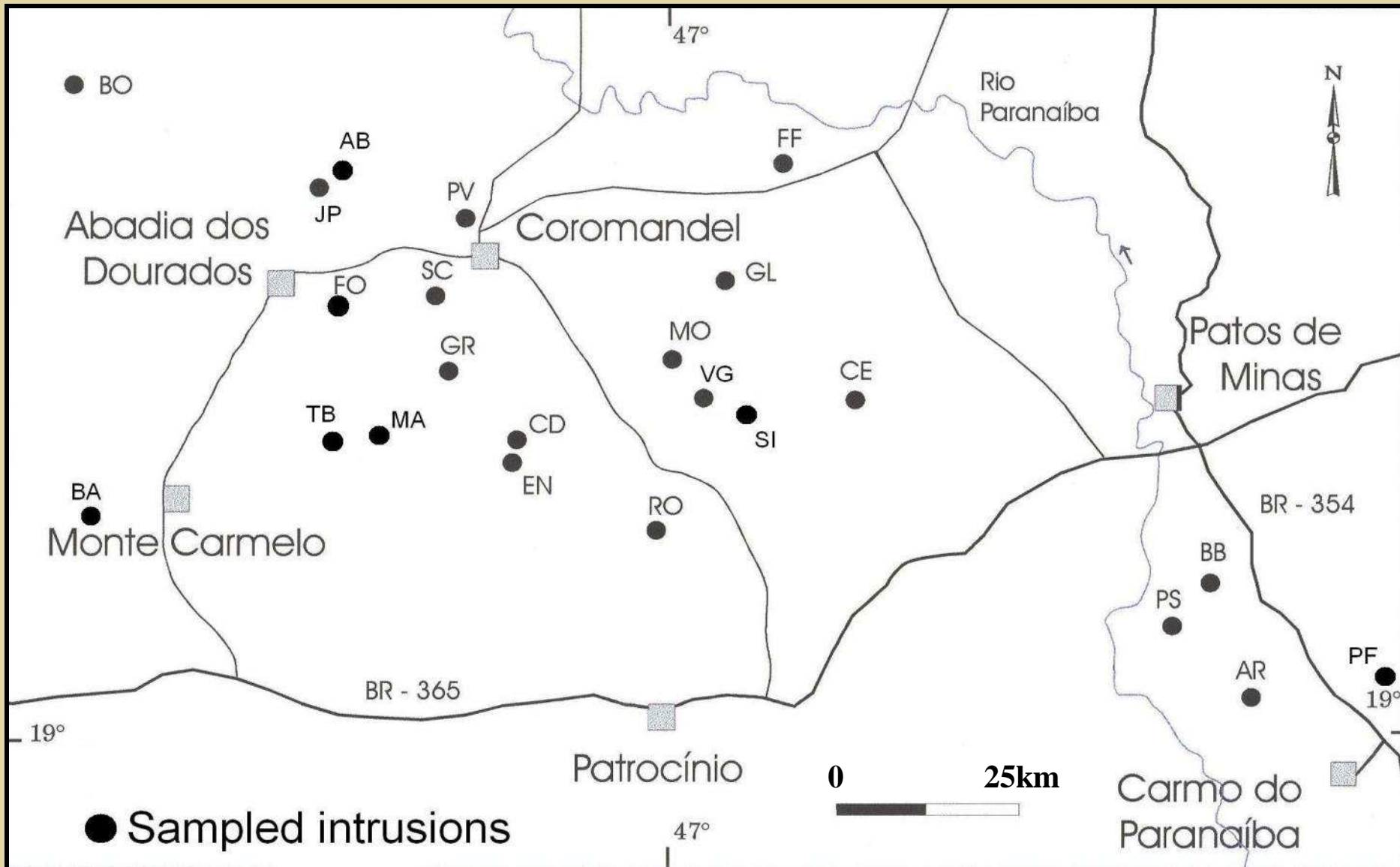
3 cm

Amostras de kimberlitos
de Minas Gerais – Coleção
Svisero - Mineropar



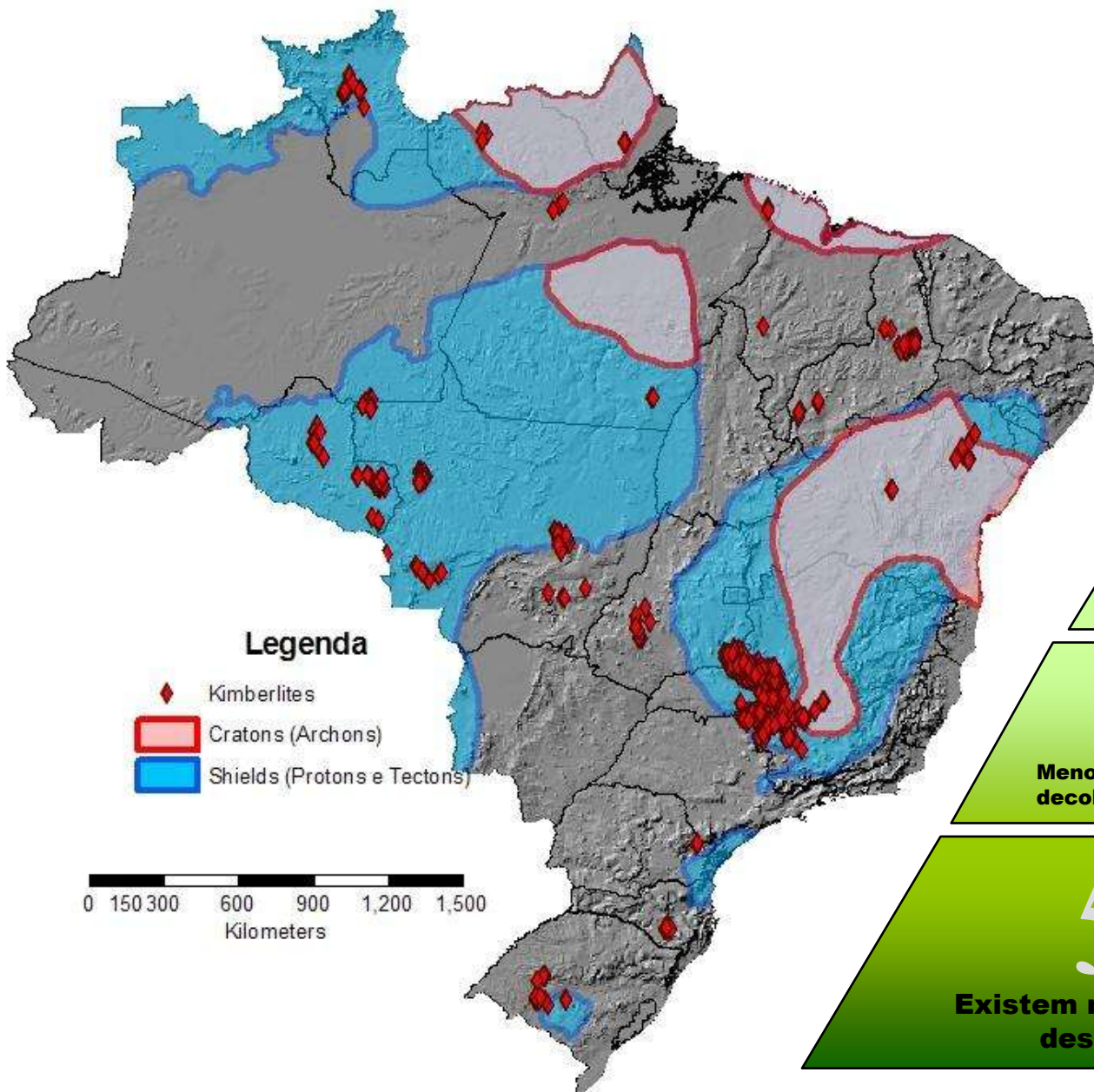
2 cm

Forca

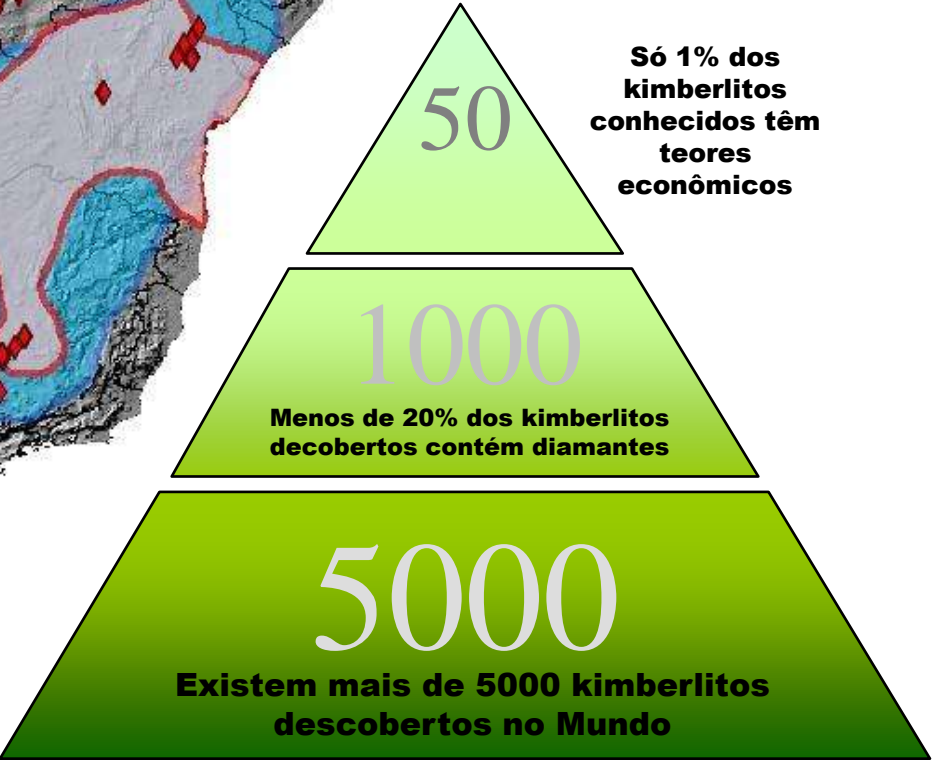


AB = Abadia, AR = Abel Régis, BB = Babilônia, BA = Bagagem, BO = Boqueirão de Cima, CE = Capão da Erva, CD = Cedro, EN = Elza Nunes, FO = Forca, FF = Fosfertil, GL = Galeria, GR = Grotão, JP = Japecanga, MA = Mateiro, MO = Morungá, PS = Paraíso, PV = Poço Verde, PF = Ponte Funda, RO = Rodrigues, SC = Santa Clara, SI = Santo Inácio, TB = Tamborete 1 e 2, VG = Vargem 1, 2 e 3.

- Prospecção de diamantes primários



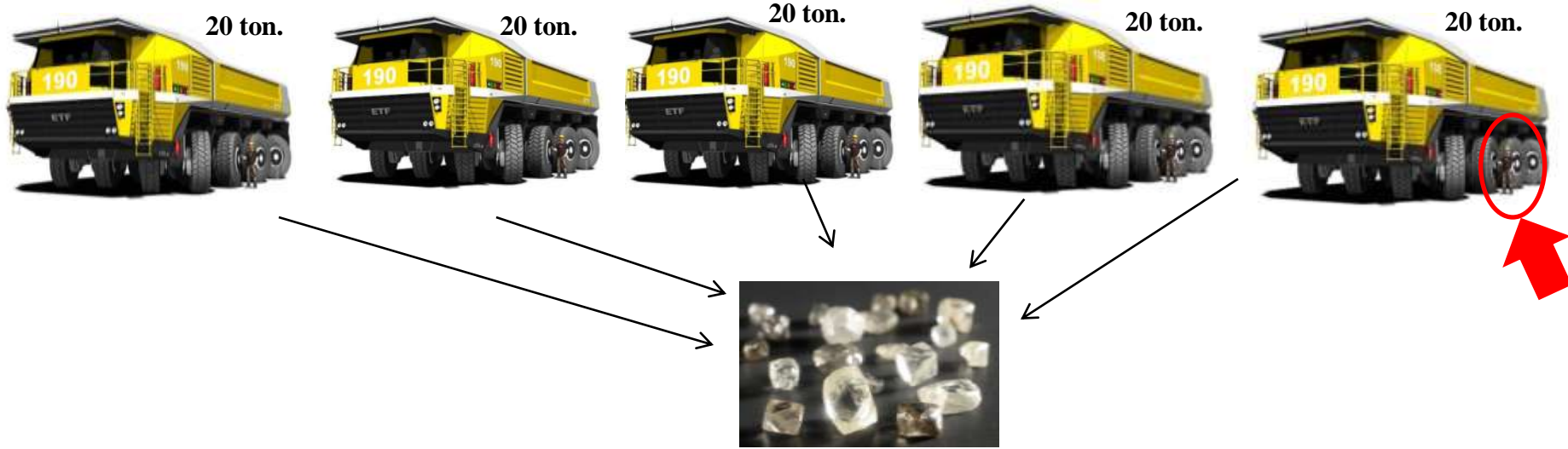
> 1.000 kimberlitos descobertos desde 1966 (Redondão);
< 5% estão localizados dentro de "Archons"





= 44 ppb

**TEOR MÉDIO EM KIMBERLEY MINES SOUTH AFRICA
(2004)**
22 cpht (carats/ 100 tons)



- Depósitos Secundários

Sistema de extração com peneiras utilizado desde 1754 na região de Tibagi - PR



• Depósitos Secundários

Eluvial - Concentração vertical

Coluvial - Pequeno transporte - movimentos de massa

Aluvial - Transporte a grandes distâncias.

Brasil - depósitos Quaternários sobre rochas sedimentares e metamórficas de idades variadas

MESOZÓICO:

- Juína (Cretáceo)
- Coromandel(Cretáceo)

PALEOZÓICO:

- Grupo Itararé (Tibagi) - Diamictitos
- Fm. Aquidauana - Carbonífero - Conglomerados

PROTEROZÓICO:

- Formação Sopa Brumadinho (Diamantina) - Conglomerados
- Formação Tombador (Bahia) - Conglomerados



Fig. 3.8 Representação esquemática da tipologia dos depósitos diamantíferos continentais.

• Depósitos Secundários



Extração mais difícil e única no mundo – são construídas barragens de contenção do mar e as areias são lavradas para diamante – 90% qualidade gema



Navio especial da Bonaparte Diamond Mining usado para mineração submarina (*offshore*) de diamantes na costa da Namíbia. Material extraído de profundidades de até 300m.



Diamantina (MG)
Conglomerado Sopa

- Extração e lavra no Brasil



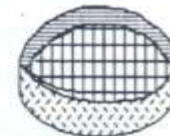
M.T. Muggerridge / Journal of Geochemical Exploration 53 (1995) 183-204

Sample Bag
5-25 kg
Capacity



350 X 550 mm

Screen

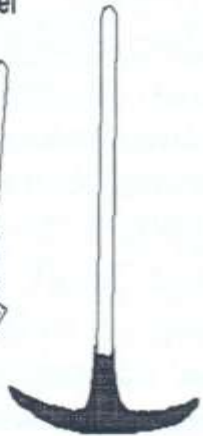


1 - 4 mm Aperture

Folding
Shovel



Pick Axe



Gold Pan



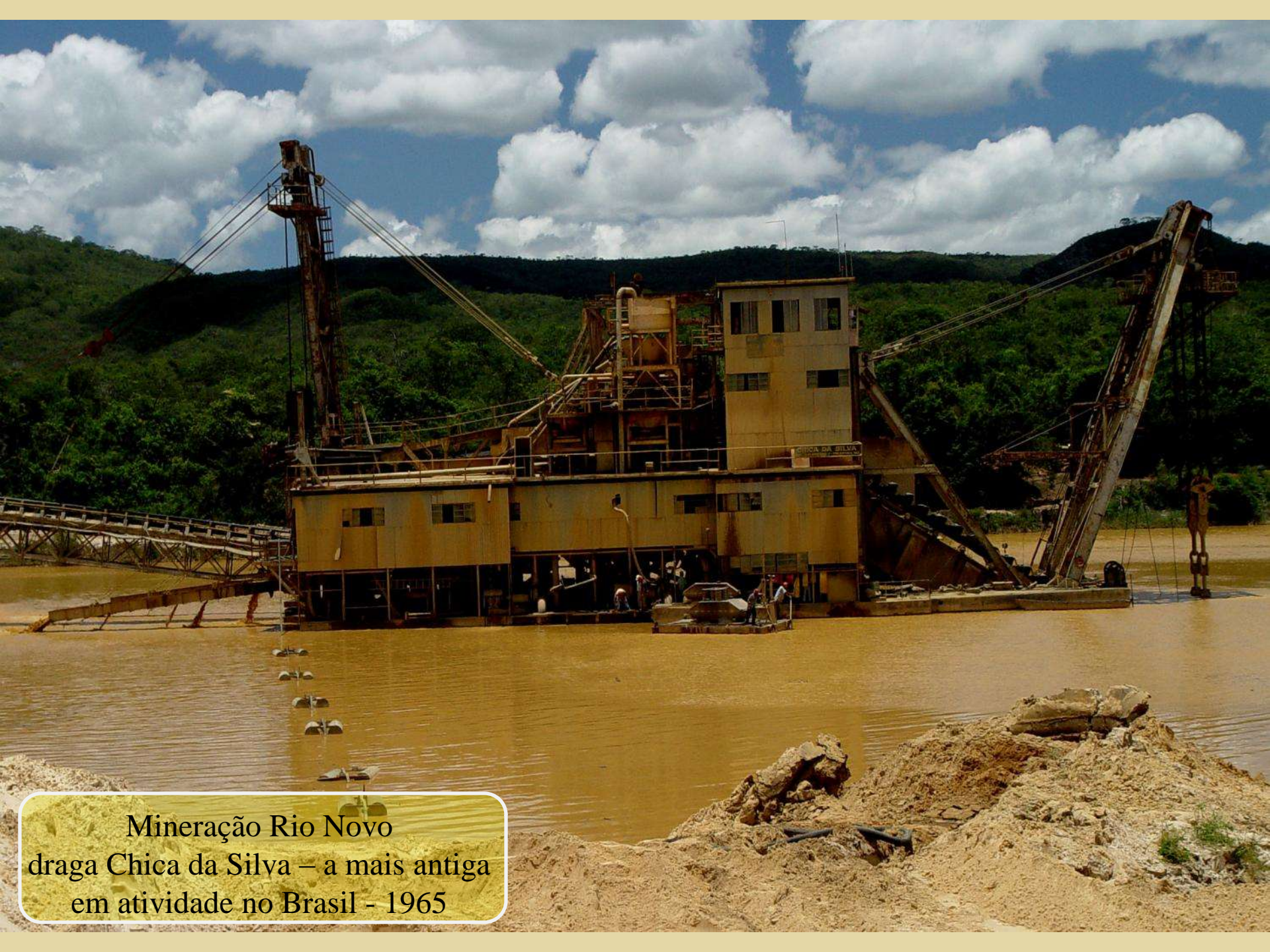
460 - 500 mm
Diameter



Brush

LOAM SAMPLING

DRAINAGE SAMPLING



Mineração Rio Novo
draga Chica da Silva – a mais antiga
em atividade no Brasil - 1965

Aplicações do Diamante

- Serras e brocas diamantadas
- Ferramentas de corte de precisão
- Abrasivos
- Pó de polimento
- Filmes de diamante
- **Gemas**



BROCA DIAMANTADA



Possui inúmeras aplicações tecnológicas, entre elas foi utilizado como janela em nave espacial.

Montage de la petite fenêtre en diamant dans la fusée « Pioneer » qui fut lancée vers Vénus en août 1978.



Diamant de 208 carats dont la pièce centrale sera polie pour en faire une fenêtre de 18,2 mm à l'abri de laquelle des appareils de mesure sophistiqués pouvaient fonctionner en toute sécurité lors du lancement de la sonde « Pioneer-Vénus » en 1978.



É a substância mais cara
do mundo, custando cerca
de **5 milhões de
dólares por grama!**



Diamante vermelho
com 0.90ct vendido
em 1987 por US\$
880,000.00