



**Universidade do Porto** Departamento de Geologia da  
Faculdade de Ciências



**Universidade de Aveiro** Departamento de Geociências

2008

---

**Suse Cárin de  
Almeida Mateus**

**Caracterização de quartzos de origem  
pegmatítica para utilização industrial.**

Helene Fichtelberg



**Universidade do Porto** Departamento de Geologia da  
Faculdade de Ciências



**Universidade de Aveiro** Departamento de Geociências  
2008

**Suse Cárin de  
Almeida Mateus**

**Caracterização de quartzos de origem  
pegmatítica para utilização industrial.**

Dissertação apresentada à Universidade do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Geomateriais e Recursos Geológicos, realizada sob a orientação científica do Professor Alexandre Lima, Professor Auxiliar do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e o Professor José Lopes Velho, Associado com Agregação do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Faculdade de Ciências Departamento de Geologia
BIBLIOTECA
Sala: <u>107</u>
N.º: <u>2536</u>
Cota: <u>553(043.2)/MAT-1C</u>
Universidade do Porto

"Cada dia é uma viagem e a própria viagem é o lar"

"O caminho Estreito para o  
Longínquo Norte"

Matsuo Bashô  
escrito há mais de 300 anos

"Se a vida fosse fácil, não dava gozo vivê-la..."

...um lema de vida!

## **o júri**

presidente

Helena Maria Sant'Ovaia Mendes da Silva - Prof. Auxiliar do Departamento de Geologia da FCUP

Alexandre Martins Campos de Lima (Orientador) - Prof. Auxiliar, Departamento de Geologia, FCUP

José António Ganilho Lopes Velho (Co-orientador) - Prof. Associado c/ Agregação, Departamento Geociências, U.A.

José Augusto Peixoto Fernandes (Arguente) - Prof. Adjunto do Departamento de Geotecnia, ISEP

Fernando Manuel Pereira de Noronha - Prof. Catedrático Departamento de Geologia, FCUP

## **agradecimentos**

gostaria de expressar os meus agradecimentos a todas as pessoas que directa ou indirectamente colaboraram e me ajudaram neste projecto, em especial:

ao Professor Alexandre Lima, pela sugestão deste tema de investigação e pelo interesse, orientação, disponibilidade e amizade que demonstrou sempre ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Para além do âmbito deste trabalho, agradeço-lhe os ensinamentos e o rigor da investigação que me soube transmitir, desde o início da minha carreira académica. Sem deixar de reconhecer a confiança depositada e nunca ter deixado de acreditar em mim, "Muito Obrigada!"

ao Professor Lopes Velho, pela disponibilidade, entusiasmo, dedicação, apoio e espírito crítico, com os seus incentivos e instruções.

aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado, e souberam nos momentos certos expressar o seu apoio e confiança com simples palavras

às minhas irmãs pela preocupação e disponibilidade demonstrada, em especial à Cárin, por todo o tempo livre que me dispensou, por toda ajuda, apoio e compreensão incondicional, pela facilidade com que me ouve, pelas palavras que não preciso de dizer e mesmo assim me compreende.

ao André, que sempre esteve ao meu lado, que me compreendeu mesmo no pouco tempo livre que podíamos dispor, pela sua paciência e compreensão.

ao Jorge Almeida e ao seu pai, por terem ajudado a traduzir alguns textos, poupando-me tempo e contribuindo assim para o cumprimento do prazo estabelecido para a conclusão da tese.

à Dra. Nadir, pela compreensão e apoio durante a minha caminhada pela EDP concomitante com este projecto.

à Dra. Tânia e ao Dr. Romeu, por toda a disponibilidade e ajuda.

à FELMICA, nomeadamente ao Dr. Rui Vide e ao Dr. Moutela, pela disponibilidade demonstrada, e empenho neste projecto.

Ao Dr. Álvaro Oliveira (INETI), pela disponibilidade e prontidão de execução de análises.

aos laboratórios da FCUP, da UA e do ISEP pela disponibilidade e prontidão de execução de análises.

aos meus colegas de curso, do andebol, da EDP, aos docentes e não-docentes do departamento Geologia da FCUP pelo apoio, pelos ensinamentos, e por todos os momentos que de uma maneira ou de outra me ajudaram a percorrer o caminho da vida.

aos meus colegas da Obra da Bemposta, que tantas vezes me desencaminharam, para desanuviar e divertir, mas que sempre me apoiaram.

**palavras-chave**

quartzo, pegmatito, aplicações industriais, mina da Pestarenga, mina da Vigia, mina da Venturinha, mina da Freches, mina da Fonte da Cal.

**resumo**

O mineral quartzo é uma forma cristalina de sílica e a mais abundante na Terra, acompanhando a evolução da humanidade.

O quartzo pegmatítico é uma das maiores fontes deste mineral que é usado em vários tipos de vidro com base em sílica, na produção de quartzo sintético para aplicações electrónicas.

Neste contexto julgou-se oportuno efectuar uma melhor caracterização dos depósitos de quartzo, tendo em vista a possibilidade do aproveitamento desta matéria-prima de capital importante para a economia nacional.

O quartzo estudado fica localizado nos Distritos de Viseu e Guarda nomeadamente nas minas da Pestarenga, Vigia, Venturinha, Freches e Fonte da Cal, pertencentes às concessões da FELMICA.

Com o objectivo de verificar as aplicações do quartzo, explorado nestas minas, nas diversas indústrias, efectuaram-se análises químicas, petrográficas e térmicas.

**keywords**

quartz, pegmatite, industrial applications, Pestarenga mine, Vigia mine, Venturinha mine, Freches mine, Fonte da Cal mine.

**abstract**

The mineral quartz is a crystalline form of silica and the most abundant on Earth, following the evolution of humanity.

The quartz pegmatitic is one of the biggest sources of this mineral that is used in various types of glass-based silica, the production of synthetic quartz for electronic applications

In this context it was appropriate to make a better characterization of quartz deposits, with a view to the possibility of exploiting this raw material of capital importance for the national economy

The quartz studied is located in the districts of Viseu and Guarda, particularly in the mine Pestarenga, Vigia, Venturinha, Freches and Fonte da Cal, belonging to the FELMICA concessions.

In order to verify the applications of quartz, that these mines operate, in various industries, were made chemical analysis, petrography and thermics.

## ÍNDICE GERAL

Índice Geral.....	viii
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Quadros.....	xv
Simbologia .....	xvi
1. Introdução.....	1
2. Quartzo.....	3
2.1. Mineralogia.....	3
2.1.1. Estrutura cristalina .....	4
2.1.2. Composição química mineralógica .....	5
2.1.3. Propriedades físicas.....	5
2.1.4. Polimorfos de sílica.....	7
2.2. Gênese.....	9
2.2.1. Depósitos .....	16
2.2.1.1. Depósitos pegmatíticos.....	18
2.3. Aplicações .....	30
2.3.1. Metalurgia .....	32
2.3.2. Indústria electrónica e óptica .....	39
2.3.3. Indústria cerâmica.....	41
2.3.4. Indústria de abrasivos.....	42
2.3.5. Torres e tanques para ácido .....	44
2.3.7. Filtros .....	46

2.3.8.	Indústria de refractários .....	47
2.3.9.	Outras aplicações .....	48
3.	Enquadramento Geográfico .....	49
3.1.	Pestarenga .....	50
3.2.	Vigia .....	51
3.3.	Venturinha .....	53
3.4.	Freches (Bicha) .....	55
3.5.	Fonte da Cal .....	57
4.	Enquadramento Geológico .....	59
4.1.	Pestarenga .....	63
4.2.	Vigia .....	66
4.3.	Venturinha .....	69
4.4.	Freches (Bicha) .....	74
4.5.	Fonte da Cal .....	77
5.	Ensaio Laboratoriais .....	83
5.1.	Análise petrográfica .....	83
5.1.1.	Pestarenga .....	84
5.1.2.	Vigia .....	86
5.1.3.	Venturinha .....	87
5.1.4.	Freches (Bicha) .....	88
5.1.5.	Fonte da Cal .....	88
5.2.	Análises químicas por espectrometria de fluorescência de raio-x (FRX) .....	90
5.2.1.	Apresentação e análise de resultados .....	91
5.3.	Índice de Estabilidade Térmica IET (aplicável ao quartzo) .....	93

5.3.1. Apresentação de resultados .....	94
6. Conclusão.....	97
6.1. Possíveis aplicações do quartzo .....	98
6.2. Perspectivas de estudos e desenvolvimentos .....	99
7. Bibliografia.....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Grupo da SiO <sub>4</sub> . ( <i>in</i> The quartz page, 2008).....	4
Figura 2.2 - Esquema estrutural do tetraedro de sílica e dos tectosilicatos. ....	4
Figura 2.3 - Unidade estrutural básica do quartzo ( <i>in</i> The quartz page, 2008). ....	5
Figura 2.4 - Forma da ligação Si-O-Si com ângulo de 144° (tetraedro de sílica) ( <i>in</i> The quartz page, 2008).....	5
Figura 2.5 - Diagrama de fases da sílica (Holleman et al., 1985; Rykart, 1995; Wenk et al., 2003, <i>in</i> The quartz page, 2008).....	13
Figura 2.6 - Características geotérmicas e condições P-T naturais sobrepostas sobre o diagrama de fases da sílica (Skinner et al., 1987; Okrusch et al., 1995; Fowler, 2004; Markl, 2004, <i>in</i> The quartz page, 2008).....	15
Figura 3.1 - Localização a nível nacional dos locais de estudo (adaptado de Mapas, 2008).....	49
Figura 3.2 - Mapa do Distrito de Viseu e do Concelho de Sátão com a localização da freguesia a que pertence a mina Pestarenga (adaptado de Mapas, 2008).....	50
Figura 3.3 - Localização geográfica da Concessão de Pestarenga. Excerto da folha nº168 à escala 1:25.000 – Carta Militar de Portugal - Instituto Geográfico do Exército. ....	51
Figura 3.4 - Mapa do Distrito da Guarda e do Concelho de Aguiar da Beira com a localização da Freguesia a que pertence a mina Vigia (adaptado de Mapas, 2008)...	52
Figura 3.5 - Localização geográfica da Concessão da Vigia. Excerto da folha nº168 à escala 1:25.000 – Carta Militar de Portugal - Instituto Geográfico do Exército. ....	53
Figura 3.6 - Mapa do Distrito de Viseu e do Concelho de Penalva do Castelo com a localização da Freguesia a que pertence a mina da Venturinha (adaptado de Mapas, 2008).....	54

Figura 3.7 - Localização da concessão da Venturinha sobre o excerto da Carta Militar de Portugal - Instituto Geográfico do Exército, folha n.º 179, à escala 1:25 000. ....	55
Figura 3.8 - Mapa do Distrito da Guarda e do Concelho de Trancoso, com a localização da freguesia a que pertence a mina Freches (adaptado de Mapas, 2008). .....	56
Figura 3.9 - Localização da mina de Freches. Excerto da folha n.º 181 da Carta Militar de Portugal - Instituto Geográfico do Exército, à escala 1:25.000.....	56
Figura 3.10 - Mapa do Distrito da Guarda e do Concelho de Sabugal, com a localização da freguesia a que pertence a mina Fonte da Cal (adaptado de Mapas, 2008).....	57
Figura 3.11 - Localização da mina da Fonte da Cal, excerto da folha n.º 225 da Carta Militar de Portugal - Instituto Geográfico do Exército. ....	58
Figura 4.1 - Subdivisão zonal da Cadeia Varisca Ibérica, à esquerda (adaptado de Lotze, 1945; Julivert <i>et al.</i> , 1974; Farias <i>et al.</i> , 1987); e à direita, estruturas Variscas maiores da Península Ibérica, segundo Dias & Ribeiro (1995). Legenda: TA – terrenos alóctones; TO – terrenos ofióliticos; 1 – sentido do cisalhamento Devónico; 2 – zona de cisalhamento do Devónico; 3 – estiramento segundo b; 4 – estiramento segundo a; 5 – sentido do cisalhamento do Carbonífero; 6 – zona de cisalhamento do Carbonífero. .....	59
Figura 4.2 - Limite entre o grupo das “Beiras (a sul) e grupo do “Douro” (a norte) (Sousa, 1982). ....	61
Figura 4.3 - Carta Geológica de Portugal à escala 1:1.000.000 do Atlas do Ambiente. .....	62
Figura 4.4 - Extracto da folha 14-D Aguiar da Beira da Carta Geológica de Portugal à escala de 1:50.000. ....	63
Figura 4.5 - Mina da Pestarenga. ....	65
Figura 4.6 - Pormenor de mineralizações registados na visita à mina da Pestarenga.	65

Figura 4.7 - Localização da concessão de Vigia na Carta Geológica de Portugal, folha 14-D. ....	66
Figura 4.8 - Fotografia panorâmica da Mina da Vigia.....	67
Figura 4.9 - Registos da estruturas litológicas quando da visita à mina da Vigia.....	68
Figura 4.10 - Aspectos mineralógicos registados na visita à mina da Vigia.....	69
Figura 4.11 - Localização da concessão de Venturinha na carta geológica de Portugal, folha 17-B. ....	70
Figura 4.12 - Mina Venturinha .....	71
Figura 4.13 - Registo fotográfico de mineralizações da mina da Venturinha. ....	71
Figura 4.14 - Registo fotográfico de pormenores litológicos e texturais da mina da Venturinha. ....	72
Figura 4.15 - Registo fotográfico de características mineralógicas da mina da Venturinha .....	73
Figura 4.16 - Localização da concessão de Freches na Carta Geológica de Portugal, folha 18-A. ....	74
Figura 4.17 - Registo fotográfico de pormenores mineralógicos da mina de Freches. ....	76
Figura 4.18 - Localização da concessão de Fonte da Cal na carta geológica de Portugal, folha 21-A. ....	77
Figura 4.19 - Mina da Fonte da Cal.....	79
Figura 4.20 - Registos fotográficos de pormenores característicos da mina da Fonte de Cal. ....	80
Figura 5.1 - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Pestarenga.....	85
Figura 5.2 - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Vigia. Ampliação 5x de objectiva e 10x/22CM de ocular. ....	86

Figura 5.3 - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Vigia. Ampliação 20x de objectiva e 10x/22CM de ocular. ....	87
Figura 5.4 - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Venturinha. Ampliação 10x de objectiva e 10x/22CM de ocular.....	87
Figura 5.5 - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Freches. ....	88
Figura 5.6 - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Fonte da Cal. Observação em nicóis paralelos. Ampliação 50x de objectiva e 10x/22CM de ocular. ....	89
Figura 5.7 - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Fonte da Cal. Ampliação 5x de objectiva e 10x/22CM de ocular.....	89
Figura 5.8 - Representação dos componentes principais de um espectómetro de raio-x (Gomes, 1979).....	91
Figura 5.9 - Curvas granulométricas, obtidas no ensaio para a determinação do IEQ.95	

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Propriedades mais importantes das variedades da macrocristalina e da criptocristalina (adaptado de: The quartz Page, 2008).....	7
Quadro 2.2 - Polimorfos de Sílica (Wenk et al., 2003). ....	8
Quadro 2.3 - Polimorfos de Sílica de baixa pressão (adaptado de The quartz page, 2008).....	11
Quadro 2.4 - As quatro principais categorias da Classificação Pegmatítica (segundo Černý, 1991).....	21
Quadro 2.5 - As quatro classes de granitos pegmatíticos relativamente aos elementos menores, ambiente metamórfico e relação com o granito parental e características estruturais (adaptado de Černý, 1991).....	22
Quadro 2.6 - Sistema de famílias da classificação petrológica dos pegmatíticos graníticos derivados de rochas plutónicas. Para uma classificação mais completa ver Černý e Ercit (2005).....	22
Quadro 2.7 - Consumo de quartzo (ton), Fernandes (2006). ....	36
Quadro 2.8 - Intervalos de percentagens de quartzo para os vários tipos de porcelana (Fernandes, 2006) .....	42
Quadro 5.1 - Resultados das análises da FELMICA (%). ....	91
Quadro 5.2 - Resultados das análises das amostras recolhidas (%). ....	92
Quadro 5.3 - Classificação da estabilidade química função dos valores de IEQ (Fernandes, 2006) .....	94
Quadro 5.4 - Resultados da análise granulométrica e IEQ .....	95
Quadro 5.5 – Resume dos resultados obtidos no cálculo do IEQ. ....	96
Quadro 6.1 - Resumo da validação das amostras estudadas para a sua aplicação na metalurgia .....	98

## SIMBOLOGIA

À medida que vão surgindo, os símbolos utilizados no texto são definidos de forma que os respectivos significados não suscitem dúvidas, no entanto, foi elaborada uma listagem dos mais importantes.

### Alfabeto Latino

Al	– Alumínio
B	– Boro
Be	– Berílio
C	– Carbono
Ca	– Cálcio
CaO	– Óxido de cálcio
cm	– centímetro
cm <sup>3</sup>	– centímetro cúbico
CO	– Monóxido de carbono
Cs	– Césio
F	– Flúor
Fe	– Ferro
g	– grama
Ga	– Gálio
GPa	– giga Pascal (10 <sup>6</sup> )
H <sub>2</sub> O	– Água
Hf	– Háfnio
kPa	– quilo Pascal
Li	– Lítio
MgO	– Óxido de magnésio
Zr	– Zircónio

## Simbologia

---

mm	– milímetro
Mn	– Manganês
Mo	– Molibdênio
MVA	– Mega Volt Ampere
Nb	– Nióbio
O	– Oxigênio
P	– Fósforo
pH	– Potencial hidrogênio iônico
P-T	– Relação pressão e temperatura
Rb	– Rubídio
Sc	– Escândio
Si	– Silício
SiC	– Carboneto de silício
SiO <sub>2</sub>	– Dióxido de sílica
SiO <sub>4</sub>	– Tetraedros de sílica
Sn	– Estanho
T	– Temperatura
Ta	– Tântalo
Th	– Tório
Ti	– Titânio
TiO <sub>2</sub>	– Dióxido de titânio
ton	– Tonelada
TS	– Estabilidade térmica
U	– Urânio
Y	– Ítrio

### **Alfabeto Grego**

- $\alpha$  – Alto (polimorfo)  
 $\beta$  – Baixo (polimorfo)

### **Abreviaturas**

- A – Granitos tipo A – anorogénicos, metaluminosos a peralcalinos  
AB – Abissal  
CXG – Complexo xisto-grauváquico  
E – Este  
EUA – Estados Unidos da América  
FRX – Fluorescência de raio-x  
I – Granitos tipo I – orogénicos, metaluminosos  
IEQ – Índice de estabilidade química  
IET – Índice de estabilidade térmica  
IPPC – Instituto Português de Cartografia e Cadastro  
LCT – Lítio, Césio e Tântalo  
MI – Miarolítica  
MSC – Moscovite  
MSCREL – Moscovite e elementos raros  
NE – Nordeste  
NE-SW – Nordeste-Sudoeste  
NNE-SSW – Norte nordeste – Sul sudoeste  
N-S – Norte-Sul  
NYF – Nióbio, Ítrio e Flúor

## Simbologia

---

REE	– Elementos de terras raras
REL	– Elementos raros
S	– Granitos tipo S – orogénicos, metaluminosos a peraluminosos
Sin	– Sin-tectónico
SSW	– Sul-Sudoeste
SW	– Sudoeste
Tardi	– Tardi-tectónico
TS	– Estabilidade térmica (impacto térmico)
ZCI	– Zona Centro Ibérica

---

# 1. INTRODUÇÃO

---

## 1. INTRODUÇÃO

O mineral quartzo é uma forma cristalina de sílica e a mais abundante na Terra. Areias, arenitos, quartzitos e cristais de rocha são algumas das ocorrências de quartzo, entre as inúmeras existentes na natureza. A sílica é todo o material cujos constituintes elementares são o silício (Si) e o oxigénio (O), na proporção de um para dois.

O quartzo acompanha toda a evolução da humanidade. Os primeiros instrumentos do homem foram de sílex: quartzo com fragmentação adequada em arestas aguçadas. O vidro em eras passadas já era um material fabricado a partir das areias (óxido de silício). Tudo que é moderno e fundamental, para o século XXI, utiliza dióxido de silício,  $\text{SiO}_2$ , componente do minério quartzo, nomeadamente, a óptica, electrónica, telecomunicações e informática, não existiriam sem o quartzo.

Neste contexto julgou-se oportuno efectuar uma melhor caracterização das jazidas de quartzo, tendo em vista a possibilidade do aproveitamento desta matéria-prima de capital importante para a economia nacional, nomeadamente na metalurgia.

Com este estudo pretendeu-se contribuir para um melhor conhecimento da génese e caracterização dos depósitos de quartzo em pegmatitos, designadamente um elevado aproveitamento e valorização da generalidade dos materiais deles extraídos.

O trabalho tem a seguinte disposição:

No Capítulo 2, Quartzo, descrevem-se de forma geral características mineralógicas, propriedades físicas e químicas, géneses (com especial atenção para depósitos pegmatíticos) e diversas aplicações deste mineral.

No Capítulo 3, Empresa, breve apresentação da empresa responsável pela exploração das minas em estudo.

Capítulo 4 e 5, Enquadramento Geográfico e Geológico das minas de quartzo, alvo deste estudo.

Capítulo 6, Ensaio laboratoriais, apresentação das metodologias e resultados das análises efectuadas, como também comentários sobre a possibilidade de aplicação nas diversas indústrias, referidas ao longo do documento.

Por último, no Capítulo 7, Conclusões, são efectuadas advertências sobre as questões de maior pertinência.

---

## **2. QUARTZO**

---

## 2. QUARTZO

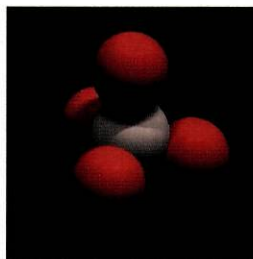
A palavra "Quarz" (na qual falta a letra "t") é conhecida desde a literatura mineira europeia que remonta ao século XIV, sendo provavelmente de origem eslava ou alemã.

Grande parte da superfície terrestre é rica em sílica, e uma das mais vulgares ocorrências deste composto é na forma de areia, consequência da meteorização das rochas, devido ao facto do quartzo ser um mineral de difícil desgaste, reflexo da sua elevada resistência física e química. As rochas graníticas e afins abarcam as maiores quantidades de quartzo, estas possuem teores entre 10-50%. A crosta terrestre contém cerca de 12% de  $\text{SiO}_2$ , a maior parte na crosta continental.

### 2.1. MINERALOGIA

A unidade química básica dos silicatos, sobre a qual se baseia toda a sua estrutura, é a molécula  $\text{SiO}_4$  (figura ao lado), em que cada ião  $\text{Si}^{4+}$  se liga a quatro oxigénios ( $\text{O}^{2-}$ ), situados no vértice de um tetraedro. Por vezes os tetraedros juntam-se em cadeias, cadeias duplas, folhas ou em estruturas tridimensionais.

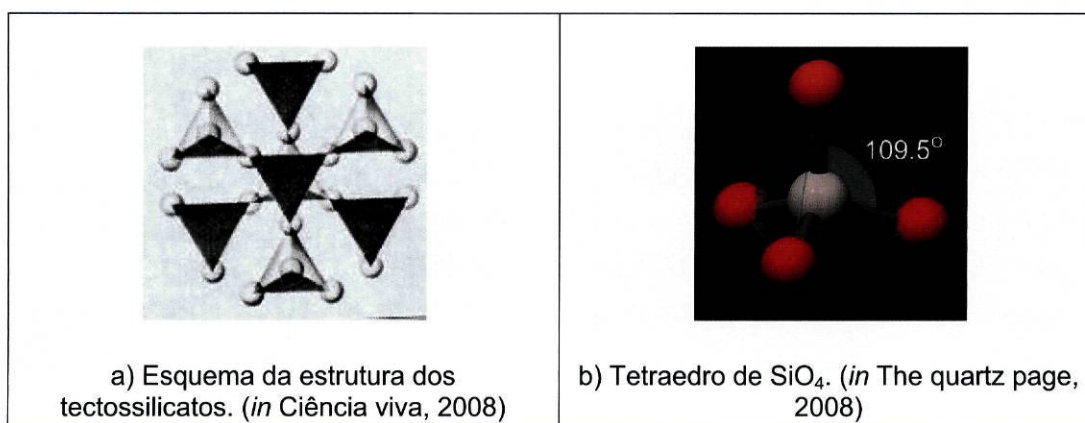
Os silicatos englobam a principal classe dos minerais constituintes das rochas que ocorrem na crosta terrestre. Apesar de muitos dos silicatos serem raríssimos outros são constituintes essenciais das rochas, com relevo para os aluminossilicatos (Figura 2.1) e tectossilicatos que por si só detêm 63% das espécies minerais existentes. Seguem-se os inossilicatos com 15-16%, os filossilicatos com 10% e os minerais não silicatos (carbonatos, óxidos, hidróxidos, ...) que representam apenas 8%.



**Figura 2.1** - Grupo da  $\text{SiO}_4$ . (in The quartz page, 2008).

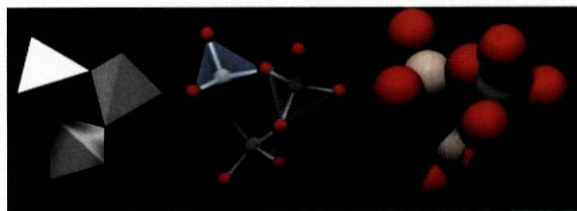
### 2.1.1. Estrutura cristalina

Os tectosilicatos (Figura 2.2 a)) são caracterizados por possuírem tetraedros ( $\text{SiO}_4$ ) (Figura 2.2 b)) ligados entre si por oxigénios em comum, produzindo uma estrutura contínua e tridimensional muito estável, sendo este o grupo mais importante entre os minerais constituintes das rochas.



**Figura 2.2** - Esquema estrutural do tetraedro de sílica e dos tectosilicatos.

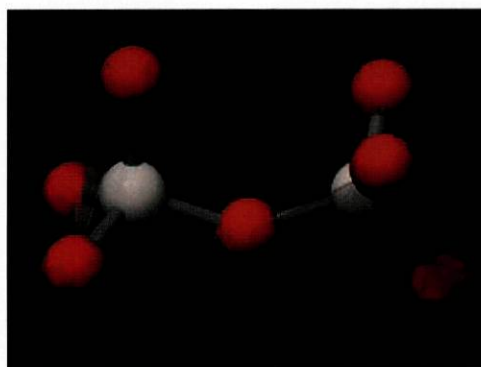
O quartzo corresponde a uma rede de tetraedros (Figura 2.3), sem qualquer substituição de átomos de silício nem quaisquer iões intersticiais, a sua composição, é  $\text{SiO}_2$ . No quartzo, a trama dos tetraedros pode assumir duas formas, uma a mais aberta e de simetria mais elevada e estável a alta temperatura (acima de  $573^\circ\text{C}$ , à pressão ambiente), e outra, correspondente ao quartzo comum estável abaixo desta temperatura. Estes dois polimorfos designam-se, respectivamente por quartzo- $\beta$  e quartzo- $\alpha$  (Borges, 1996).



**Figura 2.3** - Unidade estrutural básica do quartzo (*in The quartz page, 2008*).

### 2.1.2. Composição química mineralógica

O quartzo pertence ao grupo dos tectosilicatos e a sua estrutura cristalina trigonal é composta por tetraedros de sílica (Figura 2.4) na proporção de 46,7% de Si e 53,3% de O.



**Figura 2.4** - Forma da ligação Si-O-Si com ângulo de 144° (tetraedro de sílica) (*in The quartz page, 2008*).

### 2.1.3. Propriedades físicas

O seu hábito cristalino é um prisma de seis lados que termina em pirâmides igualmente de seis lados (embora frequentemente distorcidas e ainda colunar, em agrupamentos paralelos, em formas maciças (compacta, fibrosa, granular, criptocristalina)) e maclas com diversos pseudomorfos.

A sua classificação segundo a Escala de Mohs é definida com o valor 7, o seu peso específico é  $2,65 \text{ g/cm}^3$  e não apresenta clivagem mas exibe fractura concoidal. Por outro lado, manifesta traço incolor, brilho vítreo, no entanto, existem variedades com brilho gorduroso e intenso.

O mineral pode ser designado por quartzo incolor, se puro, transparente e cristalino, parecido com o vidro. Quando ocorrem impurezas, apresenta as mais diversas cores, conforme as suas variedades, nomeadamente: ametista (violeta), citrino (amarelo) ou quartzo fumado (cinzento a castanho). Também ocorre em formas densas sem cristais visíveis, tal como as multi-coloridas ágatas e sílex cinzento.

Têm sido atribuídos nomes às mais comuns variedades de quartzo, mas as suas diferentes formas são normalmente classificadas em dois grandes grupos:

- **Variedades macrocristalina ou cristalina** – variedades as quais formam cristais ou têm uma estrutura cristalina macroscópica. É prática comum referir quartzo macrocristalino com a designação simples de “quartzo”.

Exemplos: cristal de rocha ou quartzo hialino, citrino, quartzo rosa, quartzo fumado, ametista, quartzo hematóide, quartzo leitoso, quartzo azul, quartzo olho-de-falcão, quartzo olho-de-tigre, entre outros.

- **Variedades criptocristalina ou microcristalina** - não apresentam qualquer cristal visível e têm uma estrutura densa. Este tipo de variedade é por vezes agrupado sob a designação de calcedónia.

Exemplos: Calcedónia, ágata, carneliana ou cornalina, sárdio, crisoprásio ou crisoprase, heliotropo, ónix, ágata muscínea, sílex, jaspe.

O quadro seguinte enumera as propriedades mais importantes para efeitos de comparação.

**Quadro 2.1** - Propriedades mais importantes das variedades da macrocristalina e da criptocristalina (adaptado de: The quartz Page, 2008).

	<b>Macrocristalina</b>	<b>Criptocristalina</b>
<b>Cor</b>	Nenhuma	Nenhuma
<b>Diafaneidade</b>	Transparente a translúcido	Transparente a translúcido
<b>Brilho</b>	Vítreo	Baço
<b>Brilho nas fracturas</b>	Vítreo	Meta baço
<b>Traço</b>	Incolor a branco	Branco, ligeiramente colorido
<b>Índice de refração</b>	1,54 – 1,55	1,53-1,54
<b>Peso específico</b>	2,64g/cm <sup>3</sup>	2,40 – 2,70g/cm <sup>3</sup>
<b>Dureza</b>	7	6,5-7
<b>Teor em humidade</b>	<< 0,1%	0,1-4%
<b>Impurezas</b>	0,01% - 0,5%	1% - 20%

#### 2.1.4. Polimorfos de sílica

A sílica, SiO<sub>2</sub>, possui 11 polimorfos cristalinos e 2 polimorfos amorfos. Todos os minerais de sílica estão reunidos no grupo da sílica, de acordo com a classificação de Dana, e no grupo do quartzo, de acordo com a classificação do Strunz (Quadro 2.2) (Wenk et al., 2003).

**Quadro 2.2** - Polimorfos de Sílica (Wenk et al., 2003).

<b>SiO<sub>2</sub> Polimorfos</b>	
<b><i>Polimorfos de Sílica (Silicatos)</i></b> Quartzo- $\alpha$ Quartzo- $\beta$ Tridimite- $\alpha$ Tridimite- $\beta$ Cristobalite- $\alpha$ Cristobalite- $\beta$ Moganite, Lutcite, Lutecine Coesite Keatite	<b><i>Polimorfos amorfos</i></b> Stishovite Seifertite
<b><i>Mineralóides Amorfos</i></b> Opala (contem água) Lechatelierite, vidro de sílica	
<b><i>Compostos afins</i></b> Melanophlogite (SiO <sub>2</sub> impura) Silhydrite (SiO <sub>2</sub> impura, contém água cristalina)	

A baixas pressões existem três grupos de polimorfos de sílica e cada um dos quais possuem dois membros intimamente relacionados:

- um membro de temperatura baixa, ao qual é atribuído o prefixo  $\alpha$ ; e
- um membro de alta temperatura do mesmo nome, mas com o prefixo  $\beta$ .

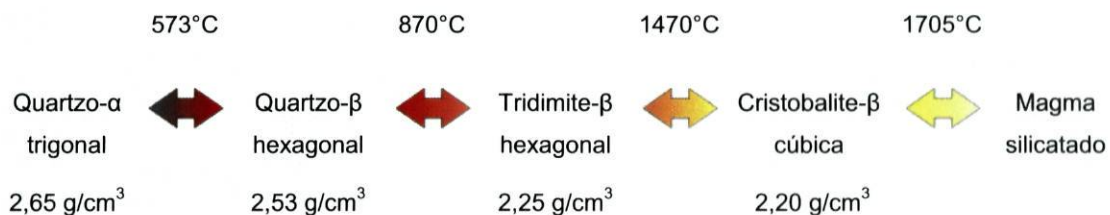
O elemento estrutural base da sílica é o tetraedro SiO<sub>4</sub>. Os tetraedros de SiO<sub>4</sub> encontram-se interligados, o que confere uma rede tridimensional rígida. Para além da ligação dos tetraedros de SiO<sub>4</sub>, no caso do quartzo, existem outras variações as quais produzem diversos polimorfos de sílica. Uma vez que todos estes são constituídos por uma rede tridimensional de SiO<sub>4</sub>, todos os minerais são classificados como silicatos. Stishovite e Seifertite são casos especiais, porque não são estruturados a partir de tetraedros de SiO<sub>4</sub> e, conseqüentemente, não são classificados como silicatos. Em vez disso, cada átomo de silício é cercado por 6 átomos de oxigénio e o acondicionamento de átomos é muito mais denso (Wenk et al., 2003).

## 2.2. GÉNESE

De todos os polimorfos de sílica, o quartzo é o único com forma estável em condições ambientais normais. Por seu lado, os outros polimorfos são estáveis em diferentes condições, e por vezes muito especiais, principalmente a altas temperaturas e a altas pressões, contudo, alguns destes podem formar-se a temperaturas e pressões baixas. Os polimorfos de sílica (à excepção do quartzo) tendam a evoluir para a estrutura do quartzo, uma estrutura mais estável.

De seguida serão apresentadas sequências de transformações de polimorfos, no sentido de se obter uma estrutura mais estável às condições ambientais:

À pressão normal, o quartzo trigonal (quartzo- $\alpha$ ) transforma-se em quartzo- $\beta$  hexagonal a 573°C, após novo aquecimento converter-se em tridimite- $\beta$  hexagonal a 870°C e mais tarde para cristobalite- $\beta$  cúbica a 1470°C. A 1705°C a cristobalite- $\beta$  finalmente funde.

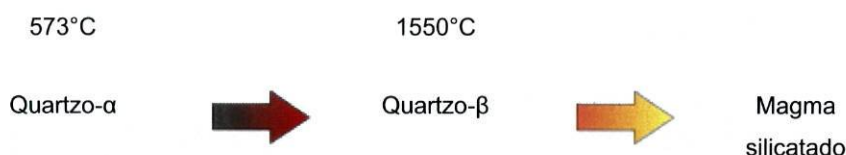


As alterações na estrutura cristalina conduzem a variações na densidade específica resultantes de um aumento da temperatura, que consequentemente corresponde a um aumento das vibrações dos átomos na rede do cristal, incidindo assim, no favorecimento das estruturas cristalinas abertas, devido à necessidade de mais espaço. *Então, porque é que os átomos não formam, inicialmente, uma estrutura aberta?*

A resposta a esta pergunta está relacionada com a necessidade da estrutura ter que estar em conformidade com as limitações da geometria dos compostos covalentes, em especial a relação angular Si-O-Si no tetraedro (SiO<sub>4</sub>)<sup>4-</sup>.

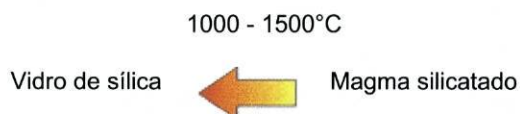
Nos casos em que a temperatura varia muito lentamente todo o processo é totalmente reversível. No entanto, quando a temperatura aumenta ou diminui de uma forma mais brusca, o processo de reversibilidade fica muito mais complexo.

Por exemplo, se for aquecido um cristal de quartzo muito rapidamente, este ainda será objecto de uma transição para a fase quartzo- $\beta$ . Mas o quartzo- $\beta$  vai passar directamente para a Tridimite- $\beta$  e sofrerá o processo de fusão a uma temperatura de 1550°C, como mostra o seguinte esquema.



Faz sentido que quartzo- $\beta$  tenha um baixo ponto de fusão, pois é um polimorfo menos estável do que cristobalite- $\beta$ , à temperatura referida, e a sua rede cristalina é facilmente quebrada. Neste contexto, verifica-se que realmente não faz sentido dizer que o  $\text{SiO}_2$  funde a 1705°C, visto que o quartzo- $\alpha$  não sofre fusão e porque esta temperatura depende da rapidez com que sobe.

No entanto, este processo (representado no esquema acima) não é reversível, isto porque, se a sílica fundida arrefecer rapidamente preserva a sua fase líquida e transforma-se em vidro de sílica amorfa, designada por lechatelierite. O vidro de sílica é simplesmente um líquido muito viscoso, não existindo um ponto de solidificação bem definido.

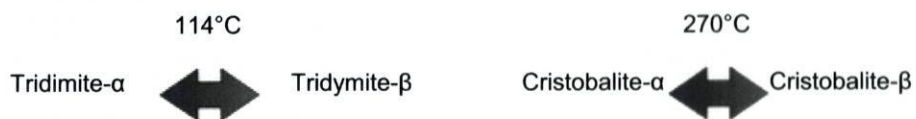


Ainda mais estranho é o que acontece com o vidro de sílica quando aquecido, tendo em conta que seria de esperar que houvesse a conversão para quartzo- $\beta$ , Tridimite- $\beta$  ou cristobalite- $\beta$ , dependendo da temperatura, mas na realidade este tipo de sílica transforma-se, simplesmente, em cristobalite- $\beta$ , tal como o magma de sílica (ver o esquema seguinte).



Esta conversão é de grande importância técnica na produção industrial do vidro de sílica, na medida em que é necessário um enorme cuidado para evitar a formação de cristais de cristobalite no interior do vidro.

No caso dos polimorfos tridimite-β e cristobalite-β serem arrefecidos rapidamente e abaixo das respectivas temperaturas de transição, as suas estruturas cristalinas são preservadas, mas uma vez alcançadas as temperaturas de 114°C e de 270°C, transformam-se em polimorfos intimamente relacionados com as estruturas, tridimite-α e cristobalite-α, respectivamente:



Estas transições são totalmente reversíveis mesmo em variações de temperaturas relativamente rápidas, tal como a passagem de quartzo-α a quartzo-β (Quadro 2.3).

**Quadro 2.3** - Polimorfos de Sílica de baixa pressão (adaptado de The quartz page, 2008).

polimorfo	Quartzo-β	Tridimite-β	Cristobalite-β
<b>Estabilidade</b>	573°C - 870°C	870°C - 1470°C	> 1470°C
<b>Metaestabilidade</b>	-	117°C - 870°C	270°C - 1470°C
<b>Sistema cristalográfico</b>	Hexagonal	Hexagonal	Cúbico
<b>Ângulo Si-O-Si</b>	153°	180°	151°
<b>Polimorfo-β</b>	Quartzo-α	Tridimite-α	Cristobalite-α
<b>Estabilidade</b>	< 573°C	-	-
<b>Metaestabilidade</b>	-	< 117°C	< 270°C
<b>Sistema cristalográfico</b>	Trigonal	Triclínico	Tetragonal
<b>Ângulo Si-O-Si</b>	144°	140°	147°

Durante a transição de  $\alpha$  para  $\beta$ , os átomos na rede cristalina têm apenas uma ligeira deslocação, mas mantêm os seus locais iniciais no interior da rede cristalina, ou seja, a transição  $\alpha$  e  $\beta$  baseia-se apenas em alterações de ângulos e comprimentos das ligações químicas. As transições, aqui referidas, são normalmente designadas por deslocativas, uma vez que apenas exigem deslocamentos relativos dos átomos sem que seja necessário romper as ligações químicas.

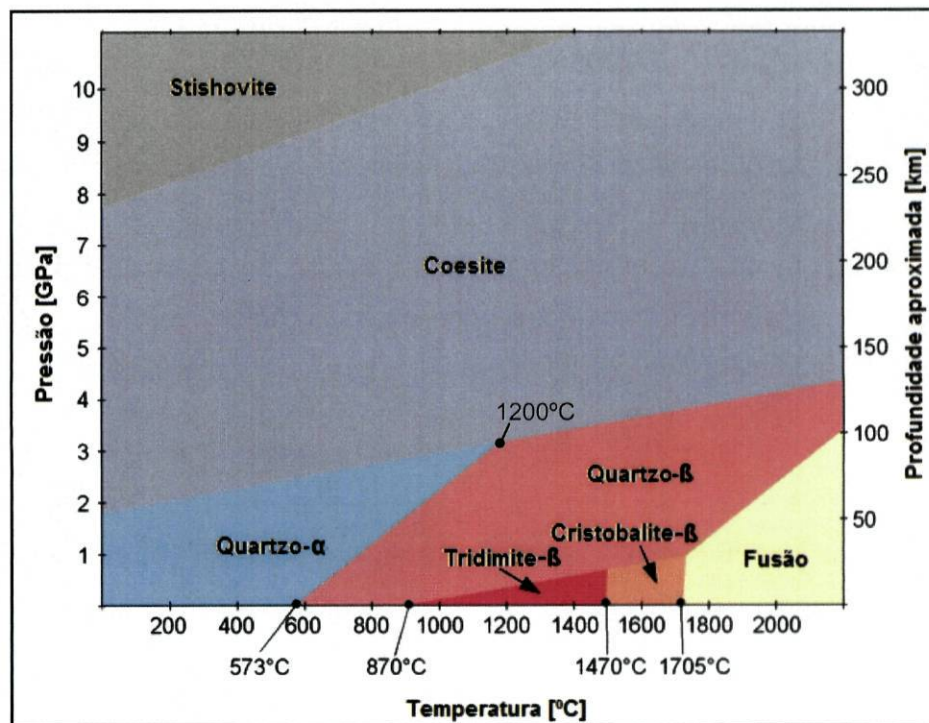
Os polimorfos de sílica de mais altas temperaturas possuem uma simetria mais elevada que a dos seus homólogos de baixa temperatura.

As transições de um polimorfo de sílica para outro (como quartzo- $\beta$  para tridimite- $\beta$ ) exigem a quebra de ligações químicas, para posteriormente haver a reconstrução e assim formar uma nova estrutura cristalina, sendo designada por transição reconstrutiva. No geral, a reconstrução completa de transições entre polimorfos necessita de muito tempo, e por outro lado, rápidas variações de temperatura não permitem uma reconstrução completa da estrutura cristalina, o que provoca que não ocorram certas transições. O quartzo- $\beta$  apresenta uma reconstrução deste tipo, fundindo directamente a 1550°C, sem transformação em tridimite- $\beta$ . Outro exemplo é a evolução da tridimite- $\beta$  em cristobalite- $\beta$ , quando são sujeitos a um arrefecimento muito rápido.

Tridimite- $\beta$  e cristobalite- $\beta$  podem ocorrer fora da gama de temperaturas a que são estáveis, porque a mudança para um outro polimorfo mais estável ocorre muito lentamente. Os polimorfos que desenvolvem este processo têm a designação de polimorfos metaestáveis.

### **Diagrama de fase de polimorfos sílica**

A Figura 2.5 mostra as condições de temperatura e de pressão dos polimorfos de  $\text{SiO}_2$  estáveis.



**Figura 2.5** - Diagrama de fases da sílica (Holleman et al., 1985; Rykart, 1995; Wenk et al., 2003, *in* The quartz page, 2008).

O diagrama de fases só inclui os polimorfos com forma pura de SiO<sub>2</sub>, que se formam a determinadas temperaturas e pressões, deixando de lado os polimorfos metaestáveis.

A maior parte dos limites das fases estão inclinadas para a direita. Por exemplo, o quartzo irá transformar-se em quartzo-β aos 573°C e a pressões normais, mas a transição da temperatura aumenta rapidamente com a pressão, ou seja, a uma pressão de 2 GPa forma-se o quartzo-β por volta dos 1000°C. A elevação da temperatura aumenta as vibrações dos átomos implicando uma maior necessidade de espaço, mas a pressão externa comprime a rede cristalina e neutraliza o efeito da temperatura.

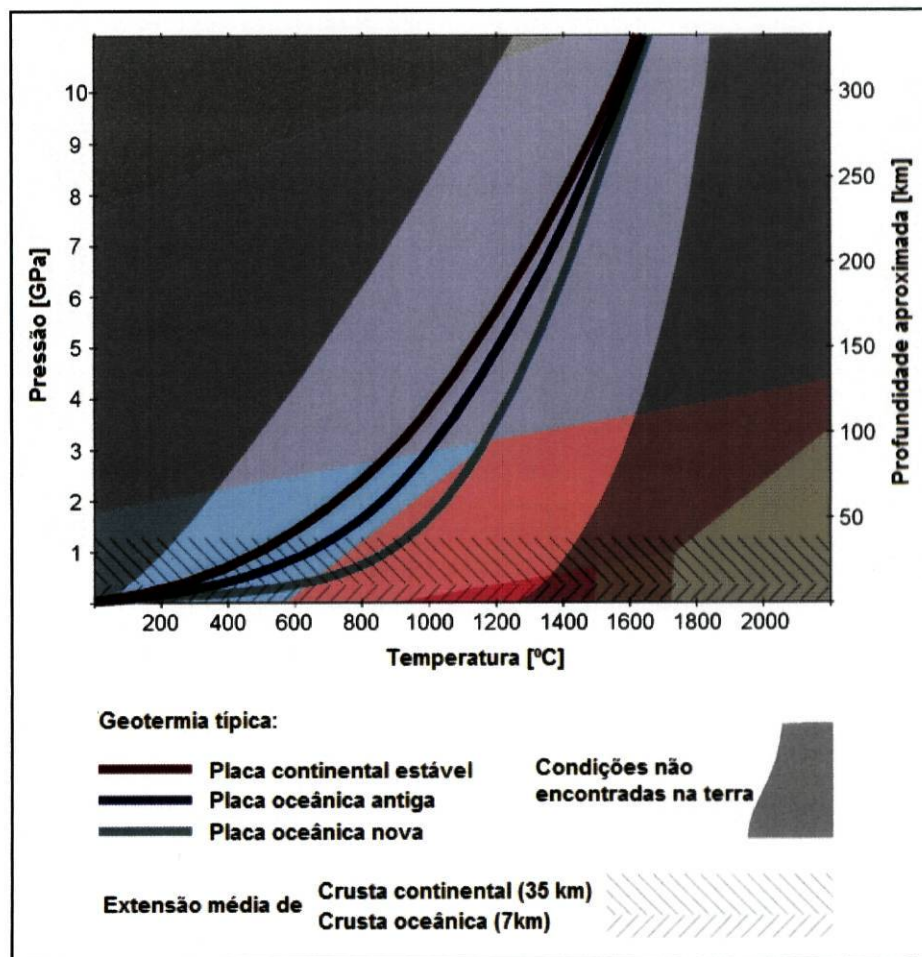
Quartzo-α, quartzo-β, tridimite-β e cristobalite-β incluem-se no grupo dos polimorfos de baixa pressão e a coesite e a stishovite são polimorfos de alta pressão. Estes dois últimos têm densidade mais elevada do que os de baixa pressão, em especial a stishovite, que tem uma densidade de 4,29 g/cm<sup>3</sup>. A coesite consiste numa estrutura de tetraedros de SiO<sub>4</sub> interconectados, ao passo que a stishovite assume uma perspectiva completamente diferente no que diz respeito ao arranjo dos átomos. Em

todos os polimorfos de baixa pressão, bem como na coesite, os átomos de silício são rodeados por 4 átomos de oxigênio e é atribuído o número de coordenação 4. O número de coordenação na stishovite é 6 e a sua estrutura cristalina não se encaixa no sistema de classificação dos silicatos, de modo que este polimorfo poderia ser considerado um não-silicato. Stishovite e coesite são ambas instáveis a pressões e temperaturas normais, mas se ocorrer uma transição de baixa pressão passam a polimorfos de sílica, pois formam-se a partir de transições da fase reconstitutiva que envolve uma completa reorganização dos átomos na rede de cristalina, sendo metaestáveis em condições normais.

O quartzo- $\alpha$  não é estável a 3 GPa e a temperaturas acima de 1200°C, pelo que o seu campo de estabilidade ocupa apenas uma pequena parte no diagrama de fases. É estável a pressões e temperaturas normais possuindo assim a capacidade de se formar na superfície da Terra.

*Onde é que podemos esperar encontrar os diferentes polimorfos no interior da Terra?*

O eixo esquerdo dos yy do diagrama da Figura 2.6 representa a pressão, enquanto o eixo direito dos yy mostra escala de profundidade na crosta e no manto da Terra (apresentando uma estimativa aproximada da relação da pressão/profundidade, dado que a pressão não exhibe um comportamento perfeitamente linear com o aumento da profundidade, variando também localmente). Desta forma, podemos sobrepor o diagrama de condições de pressão e temperatura (P-T condições) da crosta terrestre e manto superior, como mostra a Figura 2.6.



**Figura 2.6** - Características geotérmicas e condições P-T naturais sobrepostas sobre o diagrama de fases da sílica (Skinner et al., 1987; Okrusch et al., 1995; Fowler, 2004; Markl, 2004, *in* The quartzo page, 2008).

A variação da temperatura com a profundidade é designada de gradiente geotérmico, normalmente dado em graus Kelvin, 1 grau por cada 100 m. O gradiente geotérmico não é o mesmo em todos os lugares e normalmente diminui com a profundidade, ou seja, primeiro a temperatura aumenta rapidamente a profundidades superficiais e depois cada vez mais lentamente a maiores profundidades.

As eventuais condições P-T encontradas na Terra estão confinadas a um corredor lilás entre duas áreas acinzentadas sombreadas. A geotermia típica para a estabilidade da crosta continental e oceânica, jovem ou velha, é representada como linhas coloridas sólidas. A última linha do esquema, ao longo do eixo dos xx, corresponde a condições

de superfície, bem como a gama de temperaturas que compreende as rochas à superfície, aproximadamente, entre 100°C e 1300°C. As condições limite do lado esquerdo do corredor correspondem à crosta rapidamente subductada nos limites das placas. Por seu lado, as condições do lado direito equivalem à ascensão rápida do magma, por exemplo, as erupções vulcânicas.

A Figura 2.6 mostra as espessuras médias da crosta oceânica (7 km) e da crosta continental (35 km). A crosta continental apresenta grandes variações de espessura, nomeadamente onde as placas continentais colidem, podendo atingir os 90 quilómetros de espessura, no entanto nas zonas de rifts as espessuras podem alcançar os 10km.

Resumidamente, a julgar pela geotermia, o quartzo- $\alpha$  será a forma de sílica estável em toda a crosta continental e oceânica, em condições normais. Só quando o magma quente ascende rapidamente é que é possível esperar encontrar quartzo- $\beta$ . Se a crosta rica em sílica é subductada a grande profundidade, o quartzo- $\alpha$  não será transformado em quartzo- $\beta$ , mesmo que a temperatura exceda os 573°C.

### **2.2.1. Depósitos**

O quartzo é um mineral muito abundante e pode ser encontrado nos mais diversos ambientes geológicos. Esta variedade de ambientes proporciona diferentes aparências visuais, reflectindo as diferentes condições de formação.

Os minerais de quartzo de maiores dimensões ocorrem geralmente em pegmatitos graníticos e veios hidrotermais, apresentando cristais bem desenvolvidos, os quais podem atingir vários metros de extensão. A erosão de pegmatitos pode revelar bolsas expansivas de cristais, conhecidas como "catedrais" ou cavidades miarolíticas. Por outro lado, o quartzo pode ocorrer em camadas onde os cristais se desenvolvem a partir de uma matriz e, deste modo, apenas é visível uma pirâmide terminal, conforme é o caso particular de certas variedades como, por exemplo, a ametista.

### **Descrições de ocorrências**

O quartzo é um importante constituinte de rochas ígneas com excesso de sílica, como o granito, o riolito e o pegmatito granítico. É extremamente resistente ao ataque químico e físico, fazendo com que se acumulem grãos de quartzo o podem dar origem a rochas sedimentares, como o arenito. Ocorre também em rochas metamórficas, como gnaisses, xistos e quartzitos, sendo estes últimos formados praticamente por quartzo. Nas rochas, o quartzo está associado principalmente ao feldspato e à mica, ocorre em grande quantidade como areia nas praias e nos leitos de rios, além de ser um importante constituinte dos solos.

As Fontes Primárias de quartzo geralmente relacionam-se com dois modos de ocorrência: 1) Veios Hidrotermais e 2) Pegmatitos. As Fontes Secundárias são originadas pela erosão de pegmatitos e veios hidrotermais ou por outras rochas que possuem na sua composição grandes quantidades de quartzo (principalmente rochas ácidas) posteriormente concentradas e depositadas sob a forma de areias.

### **Fontes primárias**

#### **1) Veios (ou Filões) Hidrotermais**

Os veios ou filões hidrotermais fornecem normalmente o quartzo hialino (cristal de quartzo, cristal de rocha ou, simplesmente cristal) e fragmentos ou lascas de quartzo, ou na forma cristalina. Essas ocorrências são quase que exclusivamente formadas por este mineral, daí também serem conhecidas como "veios de quartzo". Entretanto, a grande massa dos veios é formada por quartzo leitoso, material de qualidade menor (contém maior quantidade de impurezas) que o quartzo hialino.

É importante ainda referir que os veios hidrotermais de quartzo estão comumente encaixados em unidades essencialmente quartzíticas e, secundariamente pelíticas.

## **2) Veios Pegmatíticos**

Os pegmatitos ou diques ou veios pegmatíticos, por sua vez, contêm vulgarmente o quartzo leitoso juntamente com feldspatos, micas e outros minerais (alguns constituindo gemas). Em cavidades existentes dentro dos pegmatitos podem ser encontrados cristais de quartzo hialino ou semi-hialino de alta pureza (cristal de rocha).

## **Depósitos Secundários**

Os depósitos secundários, geralmente, são depósitos detríticos coluvionares ou aluvionares, gerados pela erosão de veios de quartzo e posterior concentração. Devido à sua dureza ser uma das mais altas dos minerais constituintes dos diversos tipos de rochas e não possuir clivagem, o quartzo é um mineral que resiste à meteorização com mais eficiência que a maioria dos minerais, como são os casos dos feldspatos e das micas. Deste modo, o quartzo também é encontrado na forma de grãos fragmentados em leitos de rios, depósitos litorais (praia, terraços marinhos), nos cordões de dunas associados com os depósitos litorais ou fluviais, entre outros. É também encontrado em cavidades de rochas denominadas por geóides, como normalmente se verifica no tipo de quartzo ametista.

### **2.2.1.1. Depósitos pegmatíticos**

Vulgarmente, o termo pegmatito é usado para se referir a pegmatitos graníticos e é geralmente entendido por se referir à composição do conjunto de rochas graníticas quando é utilizado sem um adjectivo qualificativo (por exemplo, pegmatito gabrótico). Os pegmatitos graníticos são predominantemente constituídos por quartzo e feldspatos, e as micas ocorrem como acessórios.

Contudo, a definição geral de pegmatitos diz-nos que são essencialmente rochas ígneas intrusivas, comumente de composição granítica, com textura muito grosseira por vezes com minerais de grandes dimensões.

Os pegmatitos são definidos mais pelo seu atributo textural do que pela sua composição, sendo que os atributos texturais, a seguir mencionados, individualmente ou combinados, podem ser suficientes para classificar uma rocha ígnea como um pegmatito (London, 2008):

- granulometria de dimensões elevadas em relação a rochas ígneas ou a rochas de composição similar;
- variedade extrema da granulometria, que geralmente aumenta com a espessura do pegmatito de forma sistemática a partir das margens para o centro;
- nitidamente delimitadas espacialmente pelo zonamento mineral;
- proeminência de intercrescimento gráfico;
- “fabric” anisotrópico elevado normalmente manifestado com um forte alinhamento dos minerais ao longo das margens do corpo.

As características que suscitam interesse dos mais famosos pegmatitos graníticos do mundo são uma combinação de cristais de tamanho gigantesco, o enriquecimento extremo em elementos raros e a formação de geodes coloridos. Os pegmatitos exibem a maior variedade de tamanho dos minerais, desde o milímetro até dezenas de metros. As texturas pegmatíticas podem-se desenvolver em qualquer tipo de rocha ígnea intrusiva, desde as ultramáficas às composições graníticas e sieníticas.

Nenhum modelo é universalmente aceite para explicar a génese destas rochas e todas as suas diversas características. No entanto, a génese a partir da derivação de magmas residuais, através da cristalização fraccionada dos granitos é defendida pela maior parte dos investigadores, os componentes incompatíveis, agentes de fluxo, voláteis e elementos raros, concentram-se nos magmas residuais. Por seu lado, os agentes de fluxo e os voláteis baixam a temperatura de cristalização, diminuem as taxas de nucleação, polimerização e viscosidade do magma e aumentam as taxas de difusão e solubilidade. Estes efeitos são considerados como sendo fundamentais para o desenvolvimento de grandes cristais e de texturas pegmatíticas.

### **Modelo com mais aceitação**

Avanços significativos na compreensão da gênese dos pegmatitos têm sido feitos ao longo dos últimos 40 anos. Na década de 70 e 80 do séc. XX o modelo de gênese dos pegmatitos mais amplamente aceite foi o de Richard Jahns (Jahns, 1955, 1982; Jahns & Burnham, 1969), que defendeu a ideia de que os pegmatitos evoluem do magma granítico residual. Jahns & Burnham (1969) e Jahns & Tuttle (1963) citam evidências experimentais que explicam a formação dos pegmatitos por cristalização fraccionada num meio em equilíbrio e pela coexistência do magma granítico e de fluidos no ponto de fusão do granito ou ligeiramente abaixo deste. Jahns & Burnham (1969) também estabelecem firmemente o conceito de que a água actua como uma fase incompatível, que aumenta no magma residual com o progresso da cristalização até o vapor de água se separar do magma rico em silicatos. No modelo referido é a interacção do magma com as fases de vapor que dão origem a texturas pegmatíticas, e a transição de granito em pegmatito começa no ponto de saturação do fluido H<sub>2</sub>O. A presença de uma discreta fase aquosa é, essencial para a formação do pegmatito e, por outro lado, para explicar as grandes dimensões dos cristais dos pegmatitos. Embora a mais recente evidência experimental de London (1992 e 2005), fundamentada no modelo apresentado por Jahns & Burnham (1969) revele que a presença de uma fase de vapor hidratada não é essencial para o desenvolvimento da textura pegmatítica.

### **Recentes desenvolvimentos**

#### **Classificação dos pegmatitos**

Os esquemas mais modernos de classificação de pegmatitos são fortemente influenciados pelo modelo de instalação de corpos graníticos em profundidade, publicado por Buddington (1959) e Ginsburg et al. (1960 & 1979). Esta classificação dos pegmatitos está de acordo com o seu local de instalação em profundidade, com o grau de metamorfismo e os tipos de granitos. A revisão de Černý (1991) desse sistema de classificação (Quadro 2.4) é o mais amplamente utilizado, hoje em dia como classificação de pegmatitos. A classificação de pegmatitos de Černý (1991) tem fornecido importantes descobertas sobre a origem dos magmas pegmatíticos e dos

seus graus relativos de fraccionamento, tendo como base a combinação da localização em profundidade, gradiente metamórfico e o conteúdo em elementos menores. Esta classificação tem sido amplamente aceite e é, em geral, usada por quase todos os investigadores hoje em dia.

**Quadro 2.4** - As quatro principais categorias da Classificação Pegmatítica (segundo Černý, 1991).

As quatro classes de granitos pegmatíticos (adaptado de Černý, 1991)					
Classe	Família	Elementos menores típicos	Ambiente metamórfico	Relação com o granito	Características estruturais
Abissal	-	U, Th, Zr, Nb, Ti, Y, REE, Mo Mineralização pobre (a moderada)	(limite anfibolítico superior até) facies granulítica de baixa a elevada-P ~4-9kbar ~700-800°C	Nenhuma (segregação de leucossoma anatótico)	Veios transversais concordantes
Moscovite	-	Li, Be, Y, REE, Ti, U, Th, Nb>Ta Mineralização pobre (a moderada), micas e minerais cerâmicos	Facies anfibolítica Barroviana (kianite-silimanite) elevada-P ~5-8kb ~650-580°C	Nenhuma (corpos anatóticos) a marginal e externa	Quasi-concordantes a transversais
Elementos raros	LCT	Li, Rb, Cs, Be, Ga, Nb<>Ta, Sn, Hf, B, P, F Mineralização pobre a abundante, depósito de gemas minerais industriais	Baixa-P, anfibolítica Abukuma até limite superior da facies xistos verdes (andaluzite-silimanite) ~2-4kb ~650-500°C	(interior a marginal) exterior	Quasi-concordantes a transversais
	NYF	Y, REE, Ti, U, Th, Zr, Nb>Ta, F Mineralização pobre a abundante, minerais cerâmicos	Variável	Interior a marginal	Bolsadas interiores, Interios de estruturas finas e alongadas, corpos externos concordantes a transversais
Miarolítica	NYF	Be, Y, REE, Ti, U, Th, Zr, Nb>Ta, F	Superficial a sub-vulcânico~1-2kb	Interior a marginal	Bolsadas interiores e filões transversais

**Quadro 2.5** - As quatro classes de granitos pegmatíticos relativamente aos elementos menores, ambiente metamórfico e relação com o granito parental e características estruturais (adaptado de Černý, 1991)

<b>Classes Pegmatíticas</b> (baseadas normalmente na profundidade de formação)	
<b>Abissal – AB</b>	elevado grau, elevado a baixo grau de pressão
<b>Moscovite – MSC</b>	elevada pressão, baixa temperatura
<b>Moscovite REL – MSREL</b>	transição entre MSC e MSREL
<b>Elementos Raros – REL</b>	baixa temperatura e pressão
<b>Miarolítica – MI</b>	nível superficial

Recentemente Černý e Ercit (2005) publicaram uma nova revisão da classificação de Černý, (1991). Os autores propõem algumas mudanças para a classificação dos pegmatitos NYF e para a classificação petrogenética dos pegmatitos derivados de rochas plutónicas. Novas subclasses das famílias NYF e LCT são introduzidas e as assinaturas geoquímicas são alargadas. A classificação petrogenética modificada é um “sistema de famílias” para classificar os granitos pegmatíticos de derivação plutónica (Quadro 2.6).

**Quadro 2.6** - Sistema de famílias da classificação petrológica dos pegmatíticos graníticos derivados de rochas plutónicas. Para uma classificação mais completa ver Černý e Ercit (2005).

Família	Sub-classe	Assinatura geoquímica	Composição global dos pegmatitos	Granitos Associados	Composição global dos granitos	Litologias de origem
LCT	REL-Li MI-Li	Li, Rb, Cs, Be, Sn, Ga, Ta>Nb, (B,P,F)	Peraluminoso a subaluminoso	Sinorogénicos a tardi-orogénicos (a anarogénicos)	Peraluminoso Tipo S, I ou misto S+I	Gnaisses do embasamento crustal
NYF	REL – REE MI-REE	Nb > Ta, Ti, Y, Sc, REE, Zr, U, Th, F	Subaluminoso a metaluminoso (a subalcalino)	Sin, tardi, pós a maioritariamente anarogénicos; quasi-homogéneos	Peraluminoso a subaluminoso e metaluminoso tipos A e I	Granitóides juvenis, ou granulitos crustais
Mistos	Cruzado de LCT & NYF	Mistos	Metaluminoso a moderadamente peraluminoso	Pós-orogénico a anarogénico; heterogéneo	Subaluminoso a levemente peraluminoso	Protólitos mistos ou assimilação de supracrustais por granitos NYF

\* peraluminoso, A/KCN>1; subaluminoso A/KCN~1; metaluminoso A/KCN<1 e A/NK>1; subalcalino A/NK<1, onde A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, KCN = K<sub>2</sub>O + CaO + Na<sub>2</sub>O, e NK = Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O (tudo em valores moleculares, Černý 1991).

### **Temperaturas de formação**

Actualmente existem várias propostas de temperaturas para os estádios finais de cristalização dos pegmatitos (Simmons et al., 2007):

- Jahns e Burnham (1969) – aproximadamente e/ou igual às temperaturas de fusão, cerca de 600°C;
- Taylor et al. (1979) – 525 a 700°C (baseando-se em estudos de isótopos estáveis nos pegmatitos de San Diego, Califórnia);
- London (1984) – Limite superior 700°C para pegmatitos ricos em Lítio (baseando-se no equilíbrio de fases de aluminossilicatos de lítio e quartzo);
- London (1986) – cerca de 450° C, para as porções ricas em lítio dos pegmatitos de Tanco;
- Simmons et al. (1987) – 500 a 550°C (termometrias com dois feldspatos utilizando composições reintegradas de pertite das zonas intermédias dos pegmatitos NYF de South Plate, Colorado);
- Morgan e London (1999) – 400 a 435°C junto às margens e 350 a 390°C junto à bolsa pegmatítica e um acentuado decréscimo para 240 a 275°C nas bolsas de feldspato potássico pertítico (termometria com dois feldspatos sem evidências de exsolução dos pegmatitos “Little Three”, Califórnia);
- Nabelek et al. (1992a e b) – cerca de 350°C na coexistência de quartzo e feldspato de potássio no centro de vários pegmatitos de “Black Hills”
- Sirbescu e Nabelek (2003a e b) – sugerem 350 a 400°C de temperatura de cristalização dos pegmatitos “Tin Mountain”, de Black Hills em South Dakota.

### **Voláteis e agentes de fluxo nos magmas pegmatíticos**

London (1992, 2005), no seu trabalho experimental, mostrou que a saturação em água, tal como foi proposto por Jahns e Burnham (1969), não é necessária nem normal nas mais precoces cristalizações de pegmatitos. As suas experiências mostraram que outros agentes de fluxo como B, F, P e Li em conjunto com H<sub>2</sub>O desempenham um papel crítico na formação dos elementos raros dos pegmatitos. A presença destes agentes de fluxo altera a mistura (London, 1992, 2005 e Simmons et al., 2003):

- baixando apreciavelmente a temperatura de cristalização
- decrescendo os rácios de nucleação
- baixando a polimerização do magma
- baixando a viscosidade
- aumentando os rácios de difusão, e
- aumentando a solubilidade do magma.

Simmons et al. (2007) acrescenta ainda que os agentes de fluxo agem como modificadores de rede que importam ou exportam a formação de “núcleos” e aumentam os rácios de difusão de iões para os poucos núcleos que sobrevivem e começam a crescer. Assim, os modificadores de rede agem impedindo a formação de “núcleos” e ao mesmo tempo aumentam a eficácia da difusão. A combinação destes dois efeitos facilita a migração de iões para maiores distâncias e promove o crescimento dos poucos núcleos que conseguem formar-se, resultando em poucos cristais mas de maior tamanho.

### **Inclusões fluidas**

As inclusões podem reter o registo completo do desenvolvimento composicional dos sistemas pegmatíticos, porque as inclusões fluidas são pequenas porções de silicatos fundidos aprisionados em minerais na fase de cristalização, a pressões e temperaturas magmáticas.

Thomas et al. (2002, 2002 e 2006a) desenvolveu uma técnica designada por "Confocal Micro-Raman Spectroscopy", para estudar as inclusões muito pequenas em quartzo, feldspato, topázio, turmalina, berílio, granada e micas. Os resultados indicaram concentrações de água que variam de 0,05% a 35%.

Com base nos trabalhos sobre inclusões fluidas, Thomas et al. (2005 e 2006a) e Veksler & Thomas (2002) descobriram evidências de coexistência estável de três fases imiscíveis:

- magma aluminosilicatado,
- magma hidrosalino e
- fluido aquoso de baixa salinidade em complexos naturais com sistemas multi-componentes, abrangendo pressões e temperaturas variadas.

E ainda subdividem os componentes químicos dos sistemas pegmatíticos em três grupos:

1. os principais constituintes dos magmas aluminosilicatados ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$  e outros óxidos menos abundantes);
2. boratos, fosfatos, fluoretos, cloretos alcalinos e elementos alcalino-terrosos;
3. voláteis, principalmente  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ .

É importante referir que estudos recentes indicam o extremo enriquecimento dos pegmatitos em P, F e B (Webster et al., 1997, Thomas et al., 2000, 2005 e 2006b), no entanto, em alguns tipos de pegmatitos, particularmente nas variedades mirolíticas e de elementos raros, a abundância de componentes de fluxo não silicatados pode atingir níveis de baixo teor (Simmons et al 2007). Por outro lado, Thomas et al. (2006a

e 2006b) acreditam que a cristalização fraccionada dos magmas graníticos inicialmente peraluminosos e ricos em F e H<sub>2</sub>O provocam o enriquecimento progressivo do magma residual com componentes voláteis até que no ponto de saturação o magma se divide em duas fracções imiscíveis, uma com peraluminosidade acrescida e a outra com peralcalinidade acrescida. Devido às diferentes composições das duas fracções de magma, estas fraccionarão elementos incompatíveis de forma diferenciada e de rápida separação.

### **Elevados rácios de arrefecimento e cristalização de desequilíbrio**

Em Geologia, foi muitas vezes assumido que o tamanho dos cristais nas rochas ígneas é um indicador directo dos rácios de crescimento dos cristais e da história do arrefecimento magmático, ou seja, os pequenos cristais crescem rapidamente num magma que arrefece rápido produzindo texturas de grão fino (afaníticas). Os grandes cristais crescem de forma mais lenta num magma que também arrefece mais lentamente produzindo texturas de grão grosseiro (faneríticas). Claramente este paradigma não se verifica em muitos pegmatitos (nem em rochas graníticas), particularmente quando se olha para os pegmatitos de grão grosseiro e aplitos-pegmatitos de grão fino relacionados geneticamente, sem invocar grande variabilidade na história do arrefecimento dentro de um corpo pegmatítico individual (isto é, arrefecimento rápido seguido de um arrefecimento lento e uma cristalização lenta).

Os pegmatitos apresentam uma notável variabilidade em termos de tamanho do grão do pegmatito desde finas camadas como filões com espessura de menos de 1 metro até uns 20 metros, até pegmatitos elipsoidais ou em forma de lágrimas, muitos das quais com pronunciados zonamentos de larga escala e que mostram muitas vezes núcleos de quartzo bem desenvolvidos.

Outra característica notória dos pegmatitos é a textura heterogénea, no que diz respeito à morfologia dos cristais. Os estudos experimentais de Swanson & Fernn (1986), MacLellan & Trembath (1991), e Fenn (1986) sobre a cristalização de quartzo em magmas graníticos demonstraram que a morfologia e a estrutura do quartzo nos granitos reflecte o rápido crescimento do cristal a partir de uma mistura sub-arrefecida.

O trabalho experimental de Lofgren (1974, 1980) demonstrou que a morfologia dos cristais varia de euédrica para “esquelética” e para radial conforme o aumento do grau de arrefecimento.

As relações das texturas minerais nos pegmatitos reflectem o seu grau de arrefecimento, rácio de nucleação e rácio de crescimento. Uma fonte de arrefecimento é requerida para explicar as características de textura de muitos pegmatitos, incluindo morfologias esqueléticas e dendríticas dos cristais, cristais alongados e por vezes em forma de cunha e o desenvolvimento de estruturas em pente ao longo do contacto entre o pegmatito e a rocha encaixante. Cristais com formas mais alongadas (tipo agulha, esquelética, ramificações, cunha) são favorecidas pelas taxas rápidas de arrefecimento, elevados graus de sub-arrefecimento, elevados rácios de crescimento e poucos locais de nucleação, enquanto que, formas lamelares são favorecidas por taxas de arrefecimento mais lentas, baixos graus de sub-arrefecimento, baixos rácios de crescimento e abundantes locais de nucleação.

Baseando-se, em parte, nas relações entre texturas pensa-se agora que muitos dos pegmatitos superficiais arrefeceram de forma extremamente rápida, tendo em conta a avaliação quantitativa em diversos pegmatitos (pegmatito “Harding” no Novo México (Chakoumakos & Lumpkin, 1990); the George Ashley, Mission, Stewart and Himalaya dikes, San Diego Country, Califórnia (Webber et al., 1997, 1999); e o pegmatito de Little Three, San Diego Country, Califórnia (Morgan & London, 1999)). Esta avaliação tornou claro que esses pegmatitos arrefeceram rapidamente (em dias ou meses, não em milhares ou milhões de anos como previamente se acreditava) restringindo assim os rácios de crescimento dos cristais à história do arrefecimento dos pegmatitos.

### **Arrefecimento químico**

Segundo Simmons et al. (2007), os pegmatitos alojados em rochas metamórficas profundas podem ocasionalmente exibir estruturas em pente e cristais em cunha que são indicativos de uma rápida cristalização, embora seja claro que termicamente devem arrefecer mais lentamente que os pegmatitos superficiais. O mecanismo de cristalização rápida dos magmas pegmatíticos profundos, que arrefecem mais

lentamente, pode sofrer arrefecimento químico. Este processo envolve a remoção de solventes, tais com B ou F, a partir de uma fase de cristalização rápida do magma, desde que este já não seja mantido líquido pelo componente removido. Por exemplo, as fases de cristalização de turmalina ou da fluorite podem resultar de um magma que é rapidamente arrefecido mesmo que as rochas envolventes e o próprio magma se mantenham aproximadamente à mesma temperatura.

### **Origem da “Line-Rock”**

No passado foram avançadas várias hipóteses para a origem da “line-rock”, na camada aplítica de grão fino e em veios aplito-pegmatíticos. Estes veios são tipicamente finos, horizontais a sub-horizontais, em camadas de pequena espessura normalmente com porções aplíticas na jazida, que mostram uma pronunciada deposição mineralógica caracterizada por baixa granulometria, faixas ricas em granada ou turmalina alternando com faixas ricas em quartzo e albite. O contraste do tamanho dos cristais entre o pegmatito de grão grosseiro e o aplito de grão fino tem sido objecto de numerosas investigações. De seguida serão referidas algumas destas investigações:

- Jahns e Tuttle (1963) sugeriram que as camadas de aplito podiam ser explicadas pela perda periódica de vapor de água, um mecanismo viável de arrefecimento por abaixamento de pressão (mudanças na zona limite do feldspato alcalino-quartzo com as alterações da pressão de vapor relacionadas com a desgasificação “epizonal”).
- Kleck (1996) propôs uma deposição por gravidade dos cristais como explicação para a “line-rock” do filão “George Ashley”.
- Webber et al., (1997, 1999) propuseram um mecanismo de nucleação e cristalização oscilatória controlada pela difusão a partir de um magma fortemente arrefecido para a formação da “line-rock” em San Diego Country, em veios de aplito-pegmatíticos. Sugeriram que o início da “line-rock” poderia ser causado por vários mecanismos, incluído o termal, o químico e o arrefecimento por pressão.

- Morgan e London (1999) propuseram o refinamento da zona constitucional para o pegmatito de “Little Three”, Califórnia.
- London (2002) defendeu que um significativo arrefecimento térmico também poderia produzir as camadas. Em 2005, reproduziu experimentalmente a deposição em alcalinos, na qual não houve flutuações de pressão.
- Frindt e Haapala (2004) propuseram que a nucleação oscilatória controlada pela difusão e o rápido crescimento a partir do magma arrefecido, combinada com as alterações na pressão do vapor, podiam explicar as camadas aplíticas e as texturas de sub-arrefecimento do Gross Spitzkoppe, Namibia.
- Simmons, et al. (2007) acreditam que a “line-rock” de aplito se forma por nucleação e cristalização oscilatórias que podem ser iniciadas por arrefecimento apenas ou por um factor exterior, como a redução da pressão devida à dilatibilidade do veio (propagação de fractura). Qualquer evento que resulte num forte sub-arrefecimento tem o potencial de iniciar a formação da “line-rock”.

O grau de sub-arrefecimento do magma pode aumentar e funcionar como meio para desestabilizar a dinâmica de cristalização de sistemas pegmatíticos através (Simmons, et al., 2007):

- da deposição do magma em rochas encaixantes relativamente frias (arrefecimento térmico),
- do arrefecimento químico resultante, por exemplo, da cristalização da turmalina que efectivamente remove o boro do magma (Rockhold et al., 1987), e
- da rotura ou dilatação do veio (essencialmente por pressão).

Tais eventos podem dar origem a uma rápida nucleação heterogénea e o crescimento oscilatório de cristais, bem como a formação de uma camada de componentes excluídos no início da linha de cristalização e a formação da “line-rock”.

### 2.3. APLICAÇÕES

Segundo Luz et al. (2003), o cristal de quartzo pode ser utilizado na forma natural ou como quartzo sintético (por crescimento hidrotérmico em autoclave). Actualmente, quase todas as aplicações piezoeléctricas e ópticas utilizam quartzo sintético, assumindo assim, particular importância como matéria-prima em diversos sectores industriais:

- Cerâmica,
- Metalúrgica,
- Abrasivos,
- Refractários,
- Electrónica, como uma das principais fontes de silício.

As designações comerciais do quartzo são de dois tipos:

- Quartzo de 1.<sup>a</sup> qualidade (Tipo I),
- Quartzo de 2.<sup>a</sup> qualidade (Tipo II).

**O quartzo de 1.<sup>a</sup> qualidade (Tipo I)**, é caracterizado, geralmente, por uma cor branca ou rosa, baixos teores em alumina e em óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,05\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 < 0,10\%$  (Fernandes, 2006) e é produzido em diferentes granulometrias (desde 0,30mm a 50,00mm). As principais indústrias consumidoras deste tipo de quartzo em granulometrias de dimensões menores são: do vidro, da cerâmica, da química e das tintas.

Por seu lado, **o quartzo de 2.<sup>a</sup> qualidade (Tipo II)** apresenta cor branca, algumas vezes acinzentada e contém impregnações de óxidos de ferro, o que lhe confere uma coloração acastanhada.

O emprego do quartzo nos diversos segmentos industriais é em função do conteúdo em impurezas, defeitos estruturais e outras especificações (Luz et al., 2003).

Os principais destinos do quartzo britado são a Inglaterra, a Irlanda, a Bélgica e a Holanda, onde é usado em cobertura de placas, abrasivos e painéis ornamentais para a construção (Fernandes, 2006).

As lascas de quartzo de alta pureza, além de serem usadas na produção de quartzo sintético, são utilizadas na produção do quartzo fundido, cerâmicas especiais e carga para microcircuitos de alta integração (Arcoverde, 1988).

O quartzo de menor pureza tem uma grande aplicação nas indústrias de vidro (vidros planos, vasilhames, vidraria especial e vidraria geral) e na siderúrgica (aços especiais, ligas especiais) (Luz et al., 2003).

Por outro lado, o quartzo tem um vasto aproveitamento em electrónica, óptica, cerâmica, abrasivos, e instrumentos científicos (sacarímetros, medidores de pressão, balança de precisão). Pode ser usado como fundente, como abrasivo e na manufactura do vidro e dos tijolos de sílica.

Quando fundido, o quartzo, é aplicado numa vasta gama de indústrias de elevado valor: óptica, equipamentos eléctricos, química de base, cerâmicas especiais e de precisão e fibra óptica (Luz & Braz, 2000). O quartzo é utilizado nos aparelhos ópticos e científicos, devido à sua transparência às porções do espectro tanto infravermelho como ultravioleta e à capacidade de fazer girar o plano de polarização da luz (produzindo luz monocromática de comprimentos de onda diferentes). Por seu lado, as cunhas de quartzo, cortadas de cristais transparentes, utilizam-se como um acessório para microscópio polarizante. Quando placas pequenas, orientadas, de quartzo são usadas como osciladores de rádio para permitirem tanto a transmissão como a recepção de uma frequência fixa. Esta propriedade também o torna útil nas medições de pressões de elevação instantânea, como as que resultam do disparo de um canhão ou de uma explosão atómica.

No entanto, como areia, o quartzo é largamente aplicado na argamassa, e por outro lado, quando em forma de pó, é empregue nas porcelanas, nas tintas, nas lixas e nas massas destinadas a alisar a madeira antes de ser pintada. Enquanto sob a forma de quartzito e arenito, é usada como pedra de construção e para fins de pavimentação.

### 2.3.1. Metalurgia

A indústria metalúrgica utiliza 80-90% do Si produzido sob as formas: Si, Fe-Si, Al-Si, Ca-Si, com, na globalidade, os seguintes teores (Velho, 1998):

- Sílica superior a 99,4%;
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,1\%$ ;
- $\text{Al}_2\text{O}_3 < 0,1\%$ ;
- $\text{CaO} < 0,1\%$

O silício é produzido num forno de arco eléctrico submerso de 25 MVA de acordo com a reacção:

- $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow 2\text{CO} + \text{Si}$  (1554°C).

No entanto, é importante ter em consideração as seguintes reacções secundárias:

- $\text{SiO}_2 + 3\text{C} \rightarrow \text{SiC} + 2\text{CO}$  (1255°C);
- $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{SiO} + \text{CO}$  (1457°C);
- $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{SiC} + \text{CO}$  (1507°C) (Velho, 1998).

As reacções descritas anteriormente indicam a necessidade de fontes de carbono, sendo que as mais comuns são nomeadas de seguida:

- Coque<sup>1</sup> de petróleo,
- Hulha,
- Carvão vegetal ou estilha<sup>2</sup> de madeira.

---

<sup>1</sup> Coque: espécie de carvão que se obtém da destilação da hulha.

<sup>2</sup> Estilha: lasca de madeira; farpa; fragmento.

Por outro lado, as principais matérias-primas usadas na produção de metal silício são as seguintes:

- Ferrosilício e haletos<sup>3</sup> de silício,
- Quartzito britado,
- Aglomerados de novaculite,
- Quartzito arredondado,
- Seixos de quartzito (de depósitos fluviais),
- Arenitos conglomeráticos.

Geralmente as características do material à base de sílica cumprem os seguintes pontos:

- Não friável,
- Elevada resistência ao choque térmico,
- Isento de finos,
- Não deve decrepitar ou fraccionar-se em finos quando aquecido.

É importante referir que o quartzito é a rocha preferida como matéria-prima, apesar dos conteúdos em  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  serem elevados, porque o quartzito filoniano (forma de quartzito que contém baixos teores em  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ ) é mais quebradiço e, conseqüentemente, gera excesso de finos durante o processamento e também, tendo em conta que as inclusões fluidas, normalmente, contidas neste tipo de quartzito provocam pequenas explosões quando submetidas às altas temperaturas dos fornos.

---

<sup>3</sup> *Haletos: são compostos químicos que contêm átomos dos elementos do grupo VII halogéneos (flúor (F), cloro (Cl), bromo (Br), iodo (I) e astato (At)) em estado de oxidação -1.*

Os finos não são admissíveis em fornos de arco eléctrico submerso, porque reduzem a porosidade da carga eléctrica e provocam o bloqueio do fluxo de gases, assim como a fusão prematura e a formação de crosta, originando uma estruturação do gás e a produção de um sopro que desliga o forno (Fernandes, 2006).

Segundo Fernandes (2006) a novaculite de elevada pureza também tem sido utilizada na produção de silíciometal e ferrosilício, mas os finos que gera criam uma espuma (quando aquecidos) que se acumula e induz na limpeza periódica, induzindo no fecho do forno, o que significa custos por paragem.

### 2.3.1.1. Produção de silíciometal

A produção de silíciometal incide no quartzo ou quartzito caracterizado por grão de diâmetro superior a 2,54cm, ponto de amolecimento mínimo de 1700°C e não apresenta tendência a decrepitar a temperaturas inferiores a 950°C.

Por outro lado, as pedras ("lumps"<sup>4</sup>) devem possuir dimensões entre 1,27 e 10,16cm ou 12,70cm de diâmetro médio e a rocha deve cumprir os seguintes critérios:

- 98,50% ou 99,00% de SiO<sub>2</sub> (tipicamente de 99,30% a 99,80% de SiO<sub>2</sub>)
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <0,10%,
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <0,15%,
- CaO < 0,30%
- MgO < 0,20%.

A qualidade do silício metalúrgico está relacionada com o valor das perdas por ignição, (é directamente proporcional à tendência da rocha para decrepitar quando aquecida), as quais devem ser inferiores a 0,20%, e com a quantidade de impurezas, sendo que o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o CaO são impurezas especialmente críticas.

---

<sup>4</sup> Lump: concentrado compacto "in natura".

Algumas qualidades de metal silício requerem matérias-primas com teores inferiores a:

- 0,050% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,
- 0,100% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- 0,005% de  $\text{CaO}$ ,
- 0,002% de  $\text{TiO}_2$ .

### **2.3.1.2. Produção Ferro-silício**

Por seu lado, a produção de ferro-silício incide fundamentalmente em rocha siliciosa com 0,32 e 10,16cm de diâmetro, sendo que esta dimensão deve variar em proporção directa com o teor de silício de halogeneto a produzir.

As componentes principais da rocha são as seguintes:

- Mais de 96% de  $\text{SiO}_2$  (preferencialmente > 98%),
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  menor que 0,40% (usualmente < 0,25%),
- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  menos que 0,20%.

Os teores em enxofre na rocha devem ser muito baixos e os teores de fósforo podem atingir 0,10%. Os teores em ferro e em carbono não são tão importantes quanto os teores em alumina, álcalis e metais terrosos alcalinos.

É de referir que o consumo de energia eléctrica durante a fusão é influenciado pela percentagem de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , podendo atingir 40% a 45% dos custos de produção.

A título de exemplo, alguns produtores nos EUA aceitam teores máximos com as seguintes percentagens:

- 0,03% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,
- 0,20% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- 0,01% de  $\text{CaO}$ ,
- 0,02% de  $\text{TiO}_2$ .

**Consumo de quartzo para produção de uma tonelada de Si e Fe-Si**

O quadro seguinte representa o consumo de quartzo para produção de uma tonelada de Si e Fe-Si, segundo Fernandes (2006). Ou seja, estão anunciadas as respectivas quantidades de quartzo a utilizar para a obtenção de uma tonelada de produto final.

**Quadro 2.7 - Consumo de quartzo (ton), Fernandes (2006).**

<b>Aplicação</b>	<b>Quartzo utilizado (ton) / ton de produto final</b>	<b>Qualidade</b>
Metal Silício	2,60 - 3,50	99,70%
Ferrosilício 50	1,05 - 1,10	50,00%
Ferrosilício 75	1,70 - 2,00	75,00%
Ferrosilício 90	2,30 - 2,50	90,00%

**2.3.1.3. Produção de silício para a indústria química**

Rocha siliciosa utilizada para a produção de silício para a indústria química deve apresentar alta reactividade e baixo teor em alumina e por outro lado, não deve conter impurezas, tais como:

- Fósforo,
- Enxofre,
- Arsénio (são particularmente indesejadas pelo facto de produzirem gases venenosos no forno).

As características químicas do quartzo necessárias para a respectiva utilização na indústria química são indicadas de seguida:

- 99,00% de  $\text{SiO}_2$  (mínimo);
- 0,10% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (máximo);
- 0,20% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (máximo);
- 0,10% de  $\text{CaO}$  (máximo);
- 0,10%  $\text{MgO}$  (máximo);
- 0,02% de  $\text{TiO}_2$  (máximo).

### **2.3.1.4. Produção de silício manganês**

A rocha siliciosa, na produção de silício manganês, não necessita ser tão pura como nos casos anteriores, e as percentagens, globais, dos seus compostos principais são:

- 75% de Si,
- 35% de Mn.

### **2.3.1.5. Produção de carboneto de silício**

A produção de carboneto de silício consiste no extrair, filtrar e limpar do gás através do leito de rocha siliciosa que é colocado no fundo do forno, com diâmetro superior a 2,50cm e inferior a 10,00cm.

As rochas siliciosas preferidas são as granulares de origem fluvial, arredondadas, pois permitem uma compactação solta, constituindo assim um leito mais permeável.

### **2.3.1.6. Carga para alto-forno e fornos de fornalha aberta utilizados no fabrico de aço**

Geralmente, são utilizados seixos de rio, crivados e lavados para carga de alto-forno e fornos de fornalha. Sendo que os calibres destes seixos devem ser superiores a 0,60cm e inferiores a 2,60cm ou superiores a 0,80cm e inferiores a 2,54cm e por outro lado devem conter mais de 99% de silício e serem adquiridos localmente a baixo custo (no geral).

### **2.3.1.7. Produção do elemento fosforoso em fornos eléctricos**

O elemento fosforoso é produzido através do quartzo “lump” de calibre superior a 0,30cm e inferior a 2,50cm. Podendo ser também utilizado seixo de quartzo proveniente de depósitos fluviais de calibres compreendidos entre 0,60 e 3,20cm.

As características principais do quartzo ou quartzito habitualmente aproveitadas nesta aplicação são descritas de seguida:

- Mais de 90,00% de  $\text{SiO}_2$ ,
- Menos de 1,50% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- 1,50% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,
- 0,20% de CaO e MgO combinados.

### 2.3.2. Indústria electrónica e óptica

As propriedades que tornam o cristal de quartzo aplicável às comunicações de rádio foram descobertas a partir de 1918, desde então verificou-se uma melhoria das técnicas de processamento de quartzo cristal natural, que envolveu novas tecnologias. Este embora se trate, maioritariamente, de um produto fabricado e não extraído em mina.

As indústrias de electrónica e de óptica consomem os cristais naturais com maior dimensão e com padrões de qualidade rigorosos (componentes ópticos consomem em menor escala). Outros cristais de menor dimensão e fragmentos são usados para produzir sílica vítrea. Duas das características mais importantes do quartzo, nestas indústrias, são:

- O efeito dieléctrico – não conduz uma corrente eléctrica mas permite a existência e a interacção de campos eléctricos através deste.
- O efeito piezoeléctrico - quando uma placa de quartzo é deformada mecanicamente contra a sua natural resistência à flexão, é-lhe conferida a capacidade de se deixar carregar negativamente numa superfície e positivamente noutra, oposta.

Nos casos em que a placa é libertada rapidamente da tensão que lhe é aplicada, as cargas desaparecem à medida que vão readquirindo a forma original, mas por outro lado, devido ao momento mecânico dá-se a deformação da placa em sentido oposto (agora com menor intensidade) e as superfícies correspondentes adquirem novamente carga na direcção inicial.

No entanto, se ambas as superfícies forem revestidas “finamente” com metal e ligadas através de arames flexíveis, estas cargas podem tornar-se circuitos electrónicos.

O efeito piezoeléctrico invertido conduz à deformação de uma placa, em cujas superfícies tenham sido aplicadas uma carga eléctrica instantânea devido ao movimento de uma corrente ao longo dos arames. Tal situação extrapolada para um fluxo de corrente alterna leva a admitir o surgimento de uma oscilação mecânica quando aquele tipo de corrente atravessa os arames, o que permite uma variação de

frequência da vibração mecânica num largo espectro, através do controle da espessura da placa.

Os principais segmentos da indústria de quartzo cristal são essencialmente três:

- Quartzo cristal natural - extraído em mina e aplicável no fabrico de unidades piezoeléctricas;
- “Lasca”- quartzo extraído em mina usado como matéria-prima na produção de quartzo de cultura-sintético;
- Quartzo de cultura - produzido de “lascas” pelo processo de crescimento de cristais em autoclave sob determinadas condições de temperatura, pressão e tempo.

A aplicação de quartzo em electrónica depende do cumprimento das seguintes características dos seus cristais:

- Peso compreendido entre 50 e 100g;
- ? - Material sem qualquer defeito  $\geq 16,40\text{cm}^3$ ;
- Sem espectro, fissuras, bolhas de inclusões líquidas, fibras de rútilo ou incrustações de outros minerais.

### **Nutriente**

Nas aplicações como nutriente em culturas de crescimento (sintéticas) de cristais de quartzo podem ser utilizados:

- Pedacos de cristal de quartzo com pesos entre 10 e 30g;
- Material com acabamento defeituoso das qualidades de quartzo cristal piezoeléctrico, desde que os respectivos teores de ferro e alumina sejam suficientemente baixos;

- Para o crescimento de cristais pode usar-se um nutriente que contenha menos de 50ppm (total) de impurezas, muito embora o material que contenha entre 50 a 100ppm de impurezas também possa ser usado em aplicações de menor exigência;
- Os contaminantes mais importantes são o ferro e alumina, porque eles determinam a quantidade de sódio e lítio indesejável que entra no cristal durante o processo de crescimento.

Por outro lado, os fragmentos de quartzo (nas qualidades não piezoelétricas) ultrapuro com peso entre 10 e 30g podem ser fundidos e utilizados para fibras ópticas (varas e tubulação), óptica de precisão e modelos electro-ópticos, tubos de lâmpadas especiais, cadinhos para semicondutores electrónicos e aplicações laboratoriais do tipo ensaio de desgaste.

Quando para produção de quartzo fusível (sílica vítrea ou vidro de quartzo) é exigido produtos transparentes, que contenham menos de 30ppm (0,003%) de total de impurezas, o que significa um teor de sílica de pelo menos 99,997%, e a pureza em sílica na produção de vidro de quartzo fusível opaco é 99,800% versus 99,970%, para produtos translúcidos.

### 2.3.3. Indústria cerâmica

No sector cerâmico o quartzo é incorporado fundamentalmente nos produtos designados de cerâmicos tradicionais, ou seja, tijolo, telha, azulejo, mosaico e porcelana e em alguns dos produtos cerâmicos avançados, na forma de compostos simples como o carboneto de silício (SiC). Esta incorporação é devida essencialmente à capacidade do quartzo em construir um excelente componente refractário, causa fundamental do seu elevado ponto de fusão.

O quadro seguinte demonstra os intervalos de percentagem, normalmente, necessários para o fabrico dos vários tipos de porcelana. (Fernandes, 2006).

**Quadro 2.8** - Intervalos de percentagens de quartzo para os vários tipos de porcelana (Fernandes, 2006)

Tipos de porcelanas	(%) Quartzo
Porcelana mole	30 - 40
Porcelana fina (louça de mesa)	12 - 35
Porcelana artística	20 - 32
Porcelana sanitária	24 - 45
Porcelana química técnica	10 - 15
Porcelana eléctrica	22 - 40

#### 2.3.4. Indústria de abrasivos

Na indústria de abrasivos o tipo de quartzo normalmente utilizado em moinhos de pulverização e equipamentos de desagregação, são:

- Quartzito,
- Seixo,
- Jaspe,
- Novaculite.

No entanto, o quartzo tem que apresentar algumas características, para que seja possível a sua aplicação nesta indústria, como é referido de seguida:

- Alta resistência à compressão;
- Peso específico alto;
- Elevada tenacidade;
- Durabilidade elevada;
- Alto grau de pureza;

- Homogeneidade;
- Dureza;
- Resistência à contaminação;
- Resistência à fractura;
- Resistência à lascagem e à alta temperatura.
- Baixa porosidade;
- Sem substâncias tóxicas;
- Sem colorações escuras (impurezas metálicas: ferro e manganês)
- Forte cimentação;
- Quimicamente inerte (na presença de álcalis e ácidos fortes).

É importante referir que a forma e a dimensão dos grãos constituintes, assim como a respectiva clivagem e fractura, são igualmente importantes. O “meio” deverá ter forma arredondada e de dimensionamento apertado e conseqüentemente deverá produzir pulverizado branco quando friccionado.

### **Agentes de moagem**

As propriedades determinantes para a aplicação da rocha siliciosa como agentes de moagem são as mesmas que determinam as aplicabilidades como revestimento em moinhos de pulverização. No entanto, a novaculite e o quartzito normalmente não são aceites como agente de moagem, isto porque:

- Novaculite apresenta baixo peso específico, carácter friável e baixa resistência à fractura pelo impacto durante a moagem,
- Quartzito britado também não é usualmente satisfatório para aplicações com impactos elevados, porque a britagem pode produzir microfissuras na rocha, podendo assim ocorrer fracturação durante o uso.

O comportamento do agente abrasivo é avaliado em termos de:

- Razão de corte;
- Razão de desgaste;
- Eficiência de corte;
- Qualidade de acabamento final na parte metálica, que deverá apresentar-se isenta de riscos.

### **2.3.5. Torres e tanques para ácido**

A utilização de blocos de arenito e de quartzito em revestimento de tanques de ácido, torres e caixas de colectores é limitada aos ácidos sulfúricos e clorídricos, isto porque, só a este tipo de ácido é que estas rochas apresentam resistência, sendo excluídos os ácidos fluorídricos e fosfórico a alta temperatura.

Por outro lado, para que os blocos apresentem uma melhor funcionalidade, estes devem ostentar boa resistência à abrasividade, tensão de compressão de  $55 \times 10^3$  a  $70 \times 10^3$  kPa e tensão tangencial de  $8,3 \times 10^3$  a  $9 \times 10^3$  kPa.

No caso de utilização de seixo de quartzo e quartzito usados como “meio” de acondicionamento em torres de ácido, devem ostentar as seguintes características:

- Baixa porosidade (isto é <3%),
- Lata tensão de corte,
- Alto grau de coeficiente de uniformidade granulométrica,
- Alta superfície específica por metro cúbico.

É exigida baixa porosidade para que seja permitida uma baixa absorção de ácido e uma lata tensão de rotura, a fim de minimizar a produção de finos que podem bloquear os orifícios por onde passa o gás ou qualquer outro equipamento na base da torre. O leito de seixo deve conter elevado índice de vazios por metro cúbico.

Por seu lado, o seixo deverá ser:

- Resistente à dissolução pelo ácido sulfúrico,
- Ter um pH neutro a levemente ácido (pH de 7,5 ou superior pode causar problemas).

### **2.3.6. Pré – aquecimento de ar**

É frequente a utilização de seixo quartzoso de terraço fluvial, altamente puro, em três das quatro camadas que servem como meio de transferência de calor nas câmaras de pré-aquecimento de ar. O critério de aplicação nas diferentes camadas depende do diâmetro do seixo:

- 12 e 15mm é usado no fundo (1.<sup>a</sup> camada), o que constitui cerca de 5% do leito;
- 3 e 5mm de diâmetro é usado na 2.<sup>a</sup> e 4.<sup>a</sup> camada do leito, ocupando cerca de 70% do leito.

Além do diâmetro, o seixo tem que cumprir certos critérios, como de seguida são nomeados:

- $\text{SiO}_2 > 99\%$ ;
- Esférico (para que a transferência de calor e decréscimo de pressão seja adequada);
- Condutividade térmica alta;
- Lata capacidade de armazenamento de calor;
- Alta eficiência térmica ( $\pm 98\%$ );
- Granulometria apertada.

Estes critérios tem como função fundamental garantir a transferência de calor e decréscimo de pressão, isto porque, o leito é caracterizado por fragmentos angulares e um volume e dimensão de vazios que proporcionam o restringir do fluxo de ar.

### **2.3.7. Filtros**

Filtros de gravidade rápidos para instalações de tratamento de águas municipais são constituídos na base por seixos de quartzo de diâmetro de cerca 2,54cm, que vai diminuindo gradualmente até atingir 3,20mm no topo da camada, para um total de espessura de leito de 30,50cm e 45,70cm.

Certas associações, como por exemplo a American Water Works Association, apenas aceitam material não britado para ser empregue em instalações de tratamento de águas municipais, uma vez que o “meio” de filtração deve conter menos de 25% de fragmentos alongados ou do tipo plano com relações comprimento:largura de 5:1, ou mais.

Ora, a rocha britada apresenta-se com formas angulares, portanto com fragmentos alongados e planos que tendem a criar bloqueios no leito do filtro, o que faz com que possa ser rejeitada em instalações de tratamento de águas.

O seixo de quartzo de forma arredondada não bloqueia o leito, para além de garantir um índice de vazios de cerca de 35% ou 40%, tal como deve acontecer num leito de filtração.

Neste tipo de aplicação não é exigido material de elevada pureza química, mas deverá apresentar um peso específico alto, baixa solubilidade ácida, alto coeficiente de uniformidade granulométrica e uma dimensão efectiva própria para especificação de filtros.

Em instalações de filtros de percolação a rocha siliciosa com dimensão 3,80cm e 11,40cm é usada como suporte do “meio”, no qual as bactérias crescem para digestão dos efluentes brutos.

A rocha deve apresentar elevada pureza química, mas não necessariamente alta densidade. A forma deve ser angulosa, de modo a garantir elevada superfície específica.

Leitos de filtros usados na secagem de efluentes impuros, para a aplicação em adubos químicos, requerem seixo silicioso com coeficiente de uniformidade granulométrica alto e uma distribuição da dimensão grão entre 3,20mm e 12,70mm.

A pedra com diâmetro superior a 15,90mm é usada em instalações de lixiviação séptica.

### **2.3.8. Indústria de refractários**

Na manufactura de produtos refractários é utilizado o quartzito, pedra de quartzo e quartzo filão, estes são normalmente britados até se obterem calibres entre 0,24 e 3,80cm e devem possuir as seguintes características:

- Baixo teor em ferro, álcalis e fósforo (principais impurezas neste tipo de aplicação);
- Baixa porosidade ( $T > 1500^{\circ}\text{C}$ );

Ao passo que, depois de fundidos devem (geralmente) cumprir os seguintes critérios:

- Quartzitos de grão fino: + baixa porosidade;
- Quartzitos de grão grosseiro: - baixa porosidade.
- Novaculite tem de obedecer a especificações químicas mais restritivas quando usada na produção de vidros siliciosos especiais.

### 2.3.9. Outras aplicações

Além de todas as aplicações já referenciadas é importante referir o possível emprego em agregados de betão polimerizado, carregado com 90% de humidade. Para que seja possível esta aplicação é necessário que a rocha siliciosa possua as seguintes características:

- Formas angulosas,
- Dimensões compreendidas entre 44 $\mu$ m e 6,35mm,
- Subprodutos obtidos nas operações de britagem de quartzo, aplicações que se devem fundamentalmente a duas razões,
- Ordem económica,
- Recuperação de um material susceptível de aplicação.

Nos casos em que o quartzo é de qualidade inferior é possível aplicar:

- No sector da construção civil, como granulados a utilizar em revestimentos de coberturas de edifícios, agregados em painéis de betão projectado ou agregados para betão polimerizado a utilizar em locais sujeitos a ataques ácidos,
- Em agregados para construção de sub-bases de estradas e de balastros de caminhos-de-ferro,
- Na decoração de taludes,
- No ornamentação de jardins,
- Em agregados para reboco de piscinas,
- Na pavimentação de zonas pedestres ou de muito baixo tráfego rodoviário (acessos particulares a casas de habitação ou outras).

Dada a concorrência a que as empresas produtoras se encontram submetidas, torna-se extremamente importante o aproveitamento e comercialização de todos os produtos obtidos numa instalação, de forma a rentabilizar, tanto quanto possível, os equipamentos existentes e, conseqüentemente, obter baixos custos de produção

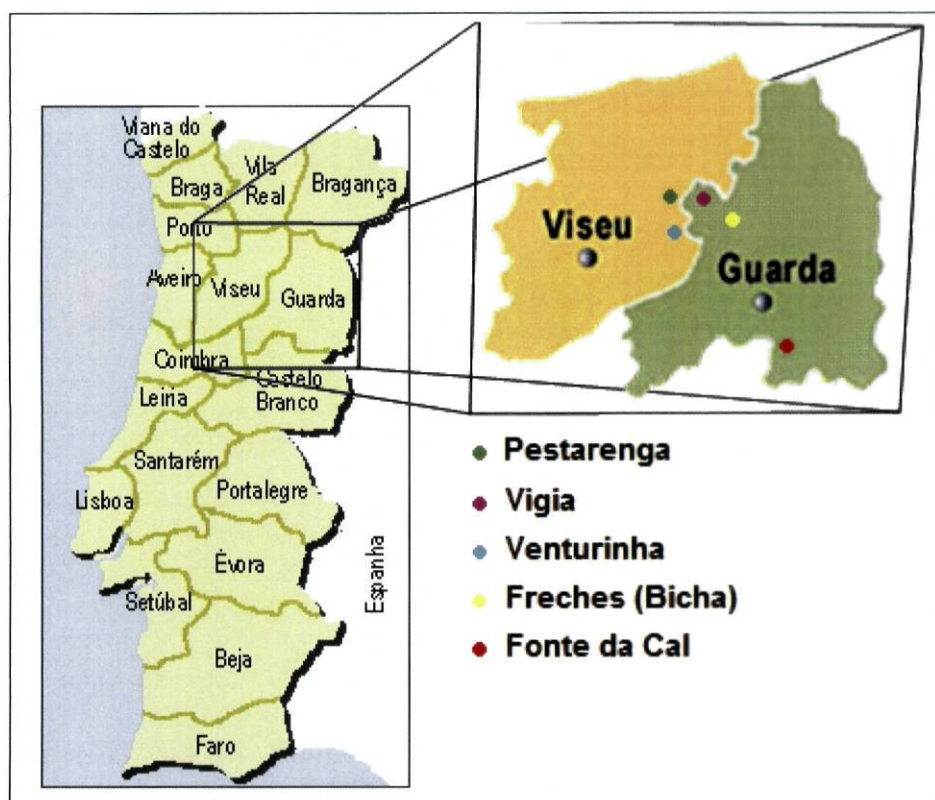
---

### **3. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO**

---

### 3. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

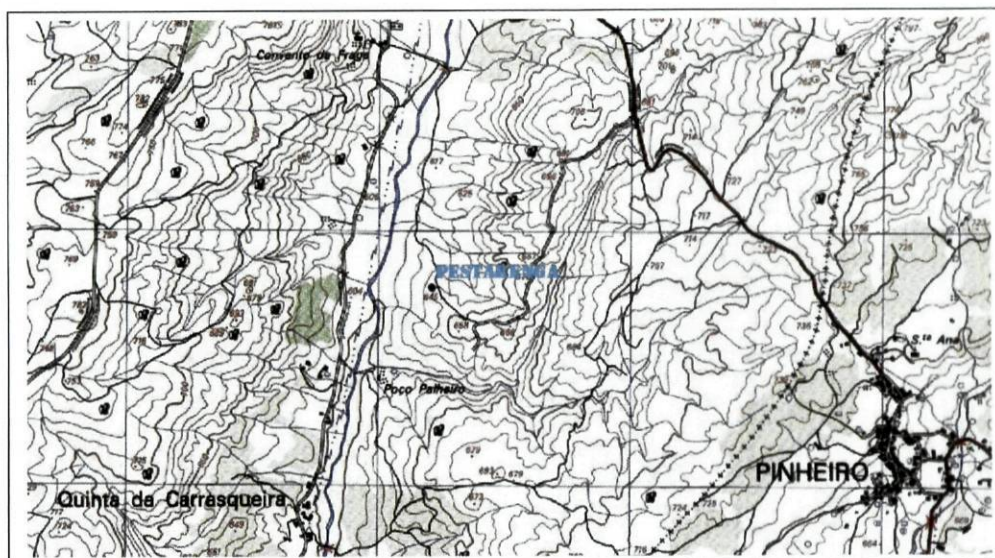
O estudo incidiu sobre 5 minas distribuídas pelo norte e centro de Portugal Continental. O seu enquadramento geográfico será realizado de uma forma breve mas elucidativa da localização de cada uma delas. A Figura 3.1 mostra de uma forma geral a localização dos locais de estudo.



**Figura 3.1** - Localização a nível nacional dos locais de estudo (adaptado de Mapas, 2008).

Para uma melhor percepção da localização a nível distrital e regional serão apresentados, em seguida, mapas de distritos e concelhos, e posteriormente, excertos de cartas geográficas do Instituto Cartográfico do Exército com a localização de cada mina.



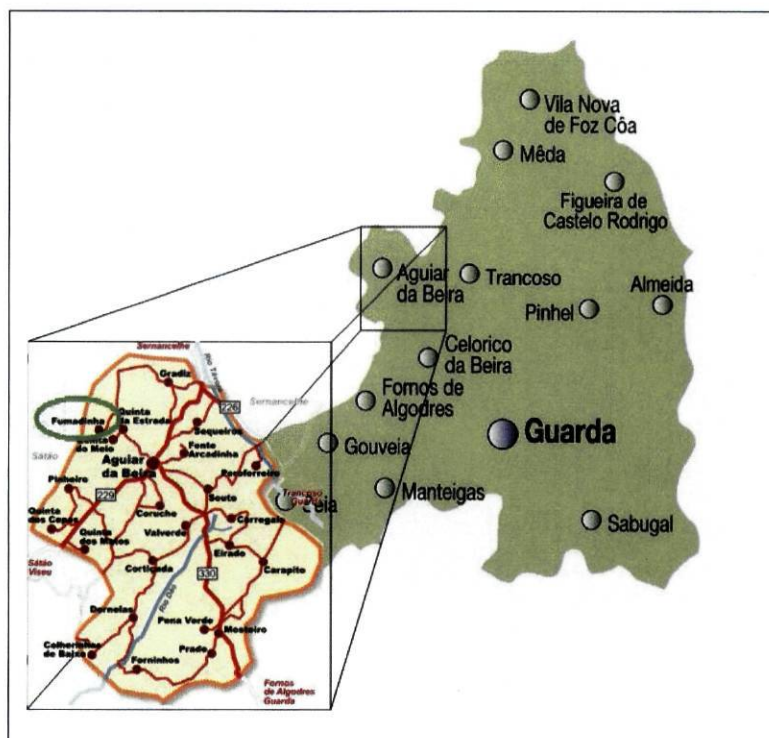


**Figura 3.3** - Localização geográfica da Concessão de Pestarenga. Excerto da folha nº168 à escala 1:25.000 – Carta Militar de Portugal - Instituto Geográfico do Exército.

A mina da Pestarenga situa-se na margem esquerda do Rio Vouga, que desce em vale apertado e percurso quase rectilíneo, na direcção NNE-SSW. A partir das proximidades de Rãs encurva para W, seguindo com percurso sinuoso até deixar a área abrangida pelo mapa.

### **3.2. VIGIA**

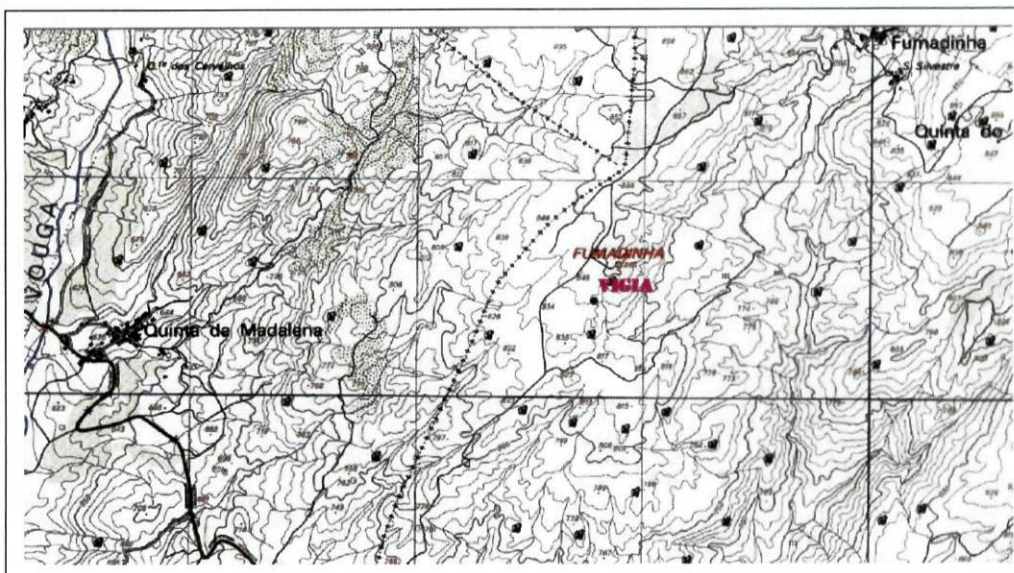
A mina da Vigia localiza-se no Distrito da Guarda, Concelho de Aguiar da Beira (Figura 3.4), Freguesia Aguiar da Beira.



**Figura 3.4** - Mapa do Distrito da Guarda e do Concelho de Aguiar da Beira com a localização da Freguesia a que pertence a mina Vigia (adaptado de Mapas, 2008).

Esta mina localiza-se na região de Aguiar da Beira, a qual faz parte da extensa área planáltica da Beira, com uma altitude média de 850m e leves ondulações que variam entre os 900m e os 960m de altura. Contudo, existem zonas baixas, avidamente aproveitadas do ponto de vista agrícola, atingindo altitudes inferiores a 550m.

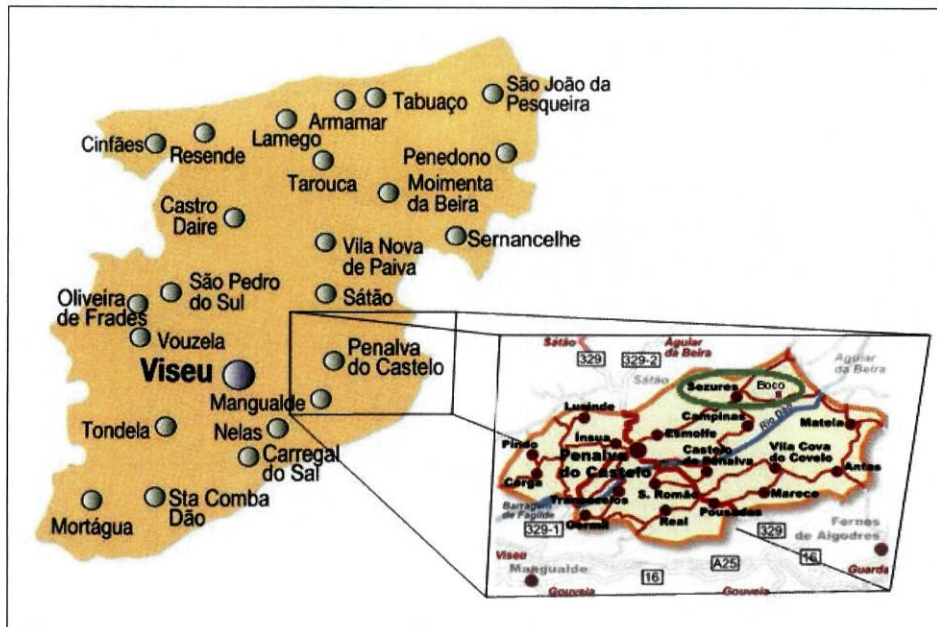
A mina localiza-se perto do marco geodésico da Fumadinha, a SW da localidade com o mesmo nome (Fumadinha). A Figura 3.5 mostra um extracto da folha nº168 da Carta Militar de Portugal à escala 1:25.000 do Instituto Geográfico do Exército com a localização da mina da Vigia, que corresponde ao quarto quadrante da Carta Geológica de Portugal 14-D à escala 1/50.000. Segundo o sistema das coordenadas IPPC, a sua localização assume os seguintes valores:  $x=45.538,264m$ ;  $y=128.583,210m$  e cota 835m.



**Figura 3.5** - Localização geográfica da Concessão da Vigia. Excerto da folha nº168 à escala 1:25.000 – Carta Militar de Portugal - Instituto Geográfico do Exército.

### 3.3. VENTURINHA

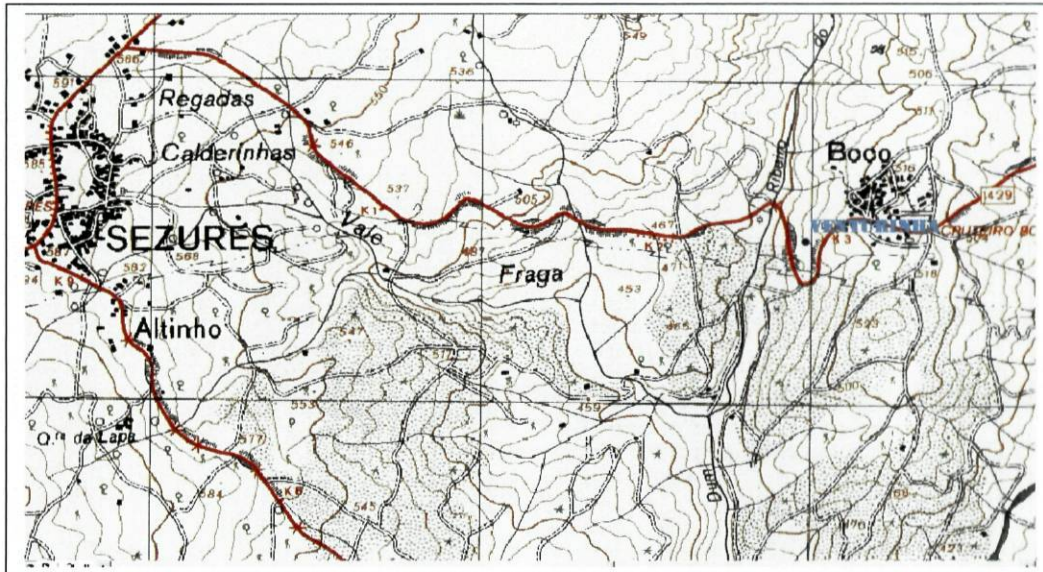
A mina da Venturinha localiza-se no Distrito de Viseu, Concelho de Penalva do Castelo, Freguesia de Sezures (Figura 3.6). A localidade mais próxima desta concessão é denominada por Boco e encontra-se a Este daquela Freguesia.



**Figura 3.6** - Mapa do Distrito de Viseu e do Concelho de Penalva do Castelo com a localização da Freguesia a que pertence a mina da Venturinha (adaptado de Mapas, 2008).

A mina da Venturinha localiza-se na folha nº 179 (escala 1:25.000), das Cartas geográficas do Instituto Geográfico do Exército, delimitada no primeiro quadrante da Carta Geológica de Portugal 17-B à escala 1:50.000.

A Figura 3.7 apresenta um excerto da folha n.º 179 da Carta Militar de Portugal, na qual está assinalada a localização da mina da Venturinha, que se encontra nas coordenadas  $x=40.412,821m$   $y=116.387,934m$  e cota 480m do sistema de coordenadas IPPC.



**Figura 3.7** - Localização da concessão da Venturinha sobre o excerto da Carta Militar de Portugal - Instituto Geográfico do Exército, folha n.º 179, à escala 1:25 000.

A região de Penalva do Castelo é cortada por diversas ribeiras exibindo leves ondulações com uma altitude média de 600m. No que diz respeito à área circundante da zona da mina, as linhas de água com maior expressão são o ribeiro do Boco a Oeste e a ribeira da Várzea a Este.

### 3.4. FRECHES (BICHA)

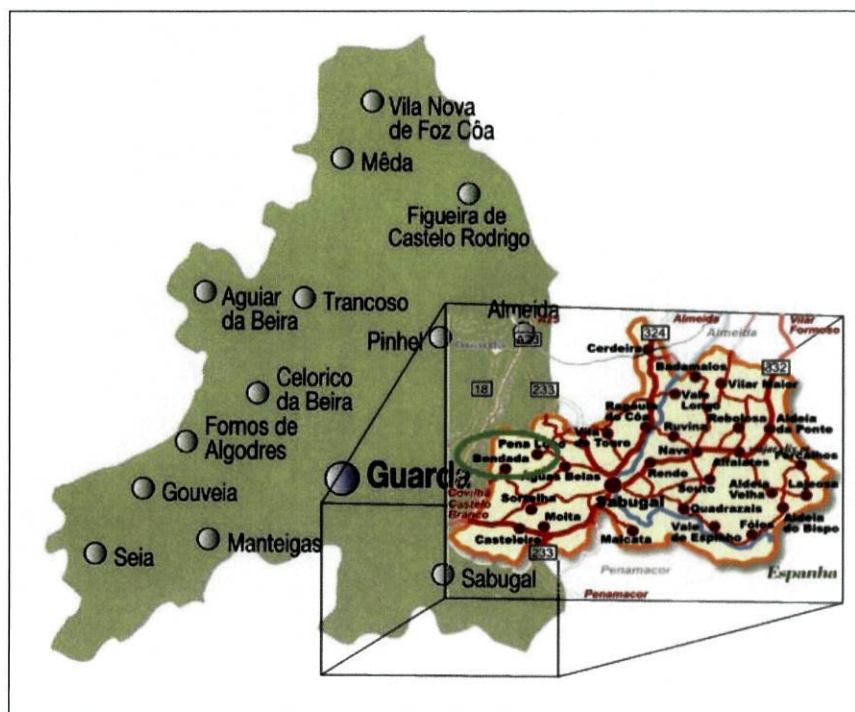
A mina de Freches (Bicha) fica situada no Distrito da Guarda, Concelho de Trancoso, Freguesia de Freches (Figura 3.8). A Carta Militar de Portugal à escala 1:25.000 do Instituto Geográfico do Exército onde se localiza aquela mina pertence à folha n.º181 (Figura 3.9), incluída no primeiro quadrante da Carta Geológica de Portugal 18-A à escala 1:50.000. A localização pormenorizada, e segundo sistema de coordenadas IPPC, corresponde às coordenadas  $x=65.623,351m$ ;  $y=117.366,401m$  e cota 467m.



A região abrangida pelo mapa de Vila Franca das Naves pertence, em grande parte, à extensa zona aplanada que se estende a norte da Guarda, cujas altitudes oscilam entre 750m e 800m. No que diz respeito à área circundante da zona da mina, a linha de água com maior expressão é a ribeira das Canadas que muda de nome a Sul da mina passando para Ribeira do Frechão.

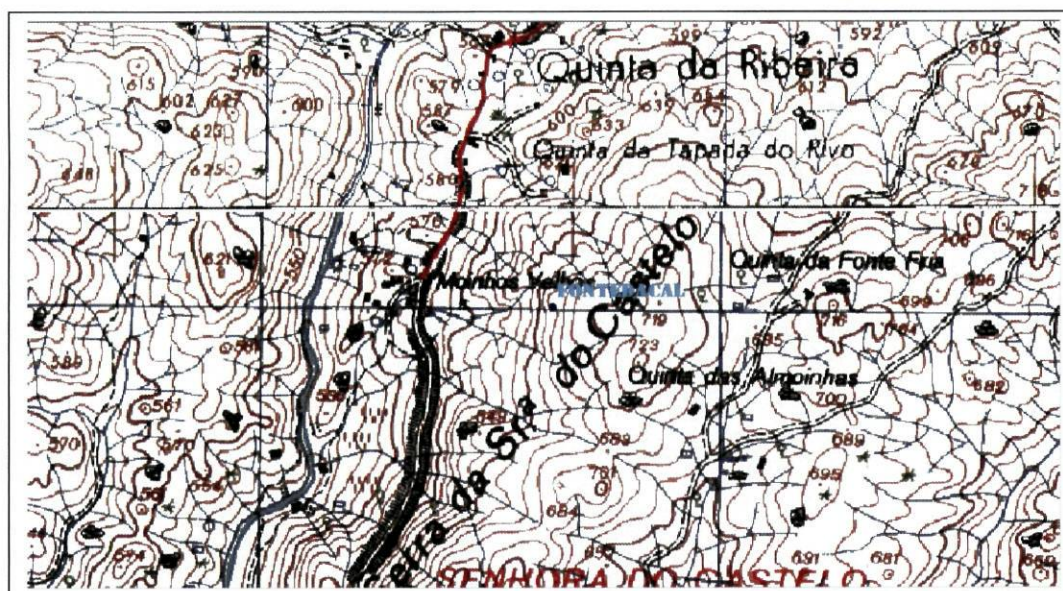
### 3.5. FONTE DA CAL

A Mina Fonte da Cal situa-se no Distrito da Guarda, Concelho Sabugal e Freguesia da Bendada, como mostra a Figura 3.10.



**Figura 3.10** - Mapa do Distrito da Guarda e do Concelho de Sabugal, com a localização da freguesia a que pertence a mina Fonte da Cal (adaptado de Mapas, 2008).

A mina da Fonte da Cal pertence à Carta Geológica de Portugal 21-A à escala 1:50.000, a que corresponde, no seu segundo quadrante a folha n.º 225 à escala 1:25.000 da (Figura 3.11) Carta Militar de Portugal - Instituto Geográfico do Exército. As coordenadas correspondentes segundo o sistema de coordenadas IPPC são:  $x=74.940,151m$ ;  $y=79.948,929m$  e cota 705m.



**Figura 3.11** - Localização da mina da Fonte da Cal, excerto da folha n.º 225 da Carta Militar de Portugal - Instituto Geográfico do Exército.

O ponto culminante da região granítica encontra-se no monte de São Cornélio, com 1008m de altitude. A erosão provocada pelas inúmeras ribeiras originou vales, primeiro muito encaixados, mas que vão alargando com a aproximação ao rio Zêzere, entre estes vales destacam-se alguns relevos, nomeadamente a Senhora do Castelo com 718m onde se encontra a mina de Fonte da Cal.

---

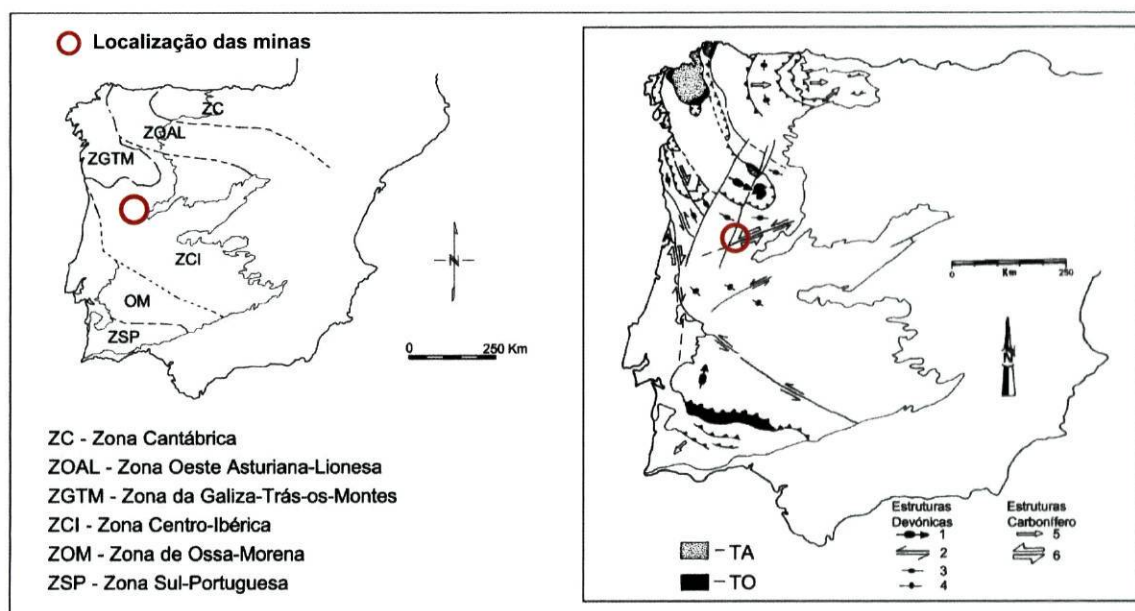
## **4. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO**

---

## 4. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

As áreas em estudo integram-se no Maciço Hespérico ou Maciço Ibérico que constitui uma das unidades estruturais da Península Ibérica e um segmento da Cordilheira Varisca da Europa. A edificação desta estrutura, pela actuação de forças compressivas, iniciam-se no Devónico, há cerca de 380 Ma (milhões de anos), tendo-se prolongado até ao Pérmico (280 Ma) – orogenia Hercínica ou Varisca.

O Maciço Ibérico apresenta-se dividido, definindo-se habitualmente seis zonas (Figura 4.1), com características estratigráficas, metamórficas, tectónicas e magmáticas distintas. A área em estudo situa-se na Zona Centro-Ibérica (ZCI), que é a mais extensa dos domínios do Maciço Ibérico e a mais interna da Cadeia Varisca.



**Figura 4.1** - Subdivisão zonal da Cadeia Varisca Ibérica, à esquerda (adaptado de Lotze, 1945; Julivert *et al.*, 1974; Farias *et al.*, 1987); e à direita, estruturas Variscas maiores da Península Ibérica, segundo Dias & Ribeiro (1995). Legenda: TA – terrenos alóctones; TO – terrenos ofióliticos; 1 – sentido do cisalhamento Devónico; 2 – zona de cisalhamento do Devónico; 3 – estiramento segundo b; 4 – estiramento segundo a; 5 – sentido do cisalhamento do Carbonífero; 6 – zona de cisalhamento do Carbonífero.

Esta Zona é caracterizada por formações do Ordovícico, que ocorrem em sinclinais estreitos e compridos, e têm carácter discordante e transgressivo sobre os terrenos ante-ordovícicos ao contrário do que acontece na Zona Cantábrica e na Zona Astúrico Ocidental – Leonesa. A ZCI, consoante a natureza das rochas em que assentam as sequências ordovícias, pode ser subdividida em dois grandes domínios (Azevedo, 2006) **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**(Figura 4.1)

- Domínio de Olho-de-sapo, situado na parte norte, e composto por formações de pórfiros e gnaisses glandulares de idade Câmbrio inferior / Ordovícico inferior.
- Domínio do Complexo Xisto-Grauváquico (formação metassedimentar arenosa – pelítica ante-Ordovícica), ocupa a parte meridional da ZCI, com uma idade que não é conhecida com exactidão devido à ausência generalizada de microfósseis. Admite-se actualmente uma idade Proterozóico superior – Câmbrio inferior para esta sequência.

Segundo Rosário (2006), a ZCI é a zona axial da Cadeia Varisca Ibérica. Na parte Norte, as dobras são deitadas, com vergência para E e NE, enquanto o sector meridional é caracterizado por dobras de plano axial vertical ou vergentes para SW. O metamorfismo regional varia de baixo a alto grau e o plutonismo granítico é muito abundante.

Do ponto de vista estratigráfico, os aspectos mais distintos da Zona Centro Ibérica são: predominância de rochas do Câmbrio e Precâmbrio; ausência de sequências do Câmbrio Médio e Superior e carácter discordante e transgressivo dos quartzitos do Ordovícico inferior sobre o Câmbrio e Precâmbrio (Julivert et al., 1974; Díez Balda et al., 1990).

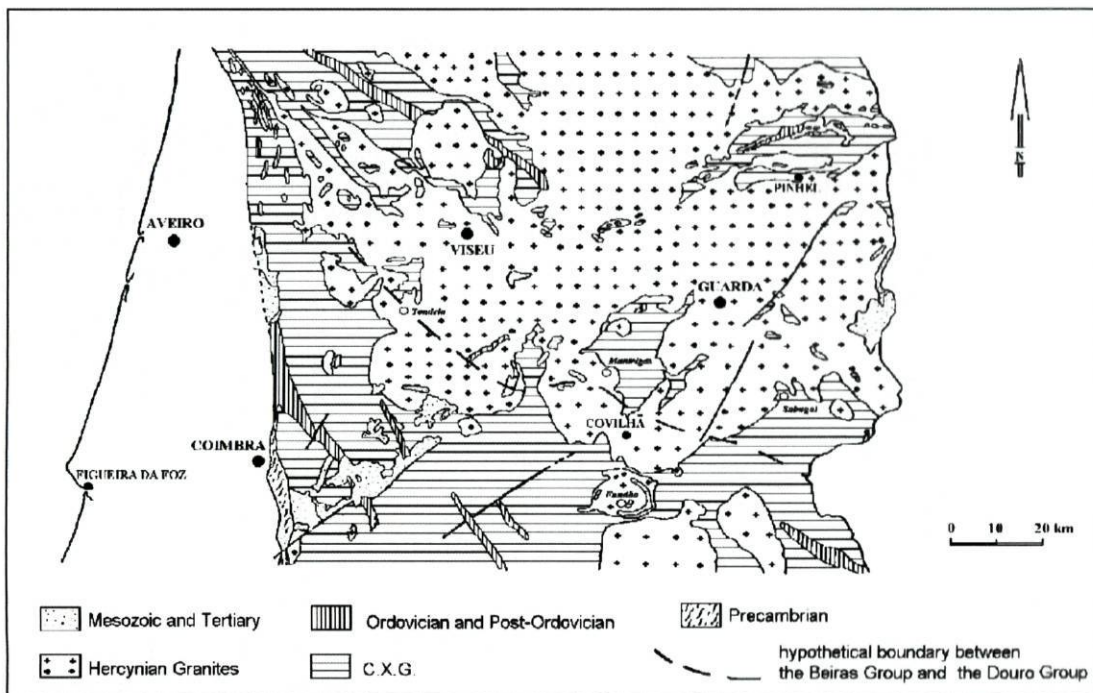
Os terrenos Câmbrio e Precâmbrio estão largamente representados no sector central e meridional da ZCI. Constituem uma espessa sequência de xistos e metagrauvaques, com níveis esporádicos de conglomerados e rochas carbonatadas. Contudo, a distinção entre Câmbrio e Precâmbrio nem sempre é possível devido ao carácter monótono da sucessão pré-ordovícica e ao seu fraco conteúdo fossilífero. Delgado (1905) agrupou estes terrenos num conjunto único que designou por

“Formação Xistosa das Beiras” e que veio a ser denominado, mais tarde, por Costa, J. (1950) como “Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovícico (CXG)”. Com base em estudos mais recentes, admite-se que as unidades inferiores do Complexo Xisto-Grauváquico sejam do Precâmbrico Superior e as superiores do Câmbrio Inferior (Sousa, 1982, Aguado, 1992).

Em Portugal, o CXG foi subdividido por Sousa (1982) em dois grandes grupos (Figura 4.2):

- Grupo das “Beiras”
- Grupo do “Douro”

O grupo das “Beiras” aflora a sul do limite marcado na Figura 4.2. É formado por um conjunto rítmico de grande espessura (6-7 Km) em que alternam metapelitos e metagrauvaques quartzosos.



**Figura 4.2** - Limite entre o grupo das “Beiras (a sul) e grupo do “Douro” (a norte) (Sousa, 1982).

O Grupo do Douro é mais heterogéneo, sendo constituído por unidades arenítico – pelíticas, em que se intercalam pelitos com magnetite, níveis calcários e conglomeráticos.

A região em estudo insere-se no Grupo das “Beiras”, englobando vários depósitos de quartzo, dos tipos filoneano, pegmatítico e aplito-pegmatítico. Segundo a Carta Geológica de Portugal à escala 1:1.000.000 do Atlas do Ambiente (Figura 4.3), no global, as principais formações que caracterizam a zona em estudo são:

- $\chi$  – Complexo Xisto-Grauváquico, Pré-câmbrico a Câmbrico;
- $\gamma_3$  – Granitóides Pós-Estefanianos (Granitos calco-alcálinos), Rochas eruptivas de idade Hercínica
- $\gamma_2$  – Granitóides Ante-Vestefalianos (Granitos alcalinos), Rochas eruptivas de idade Hercínica

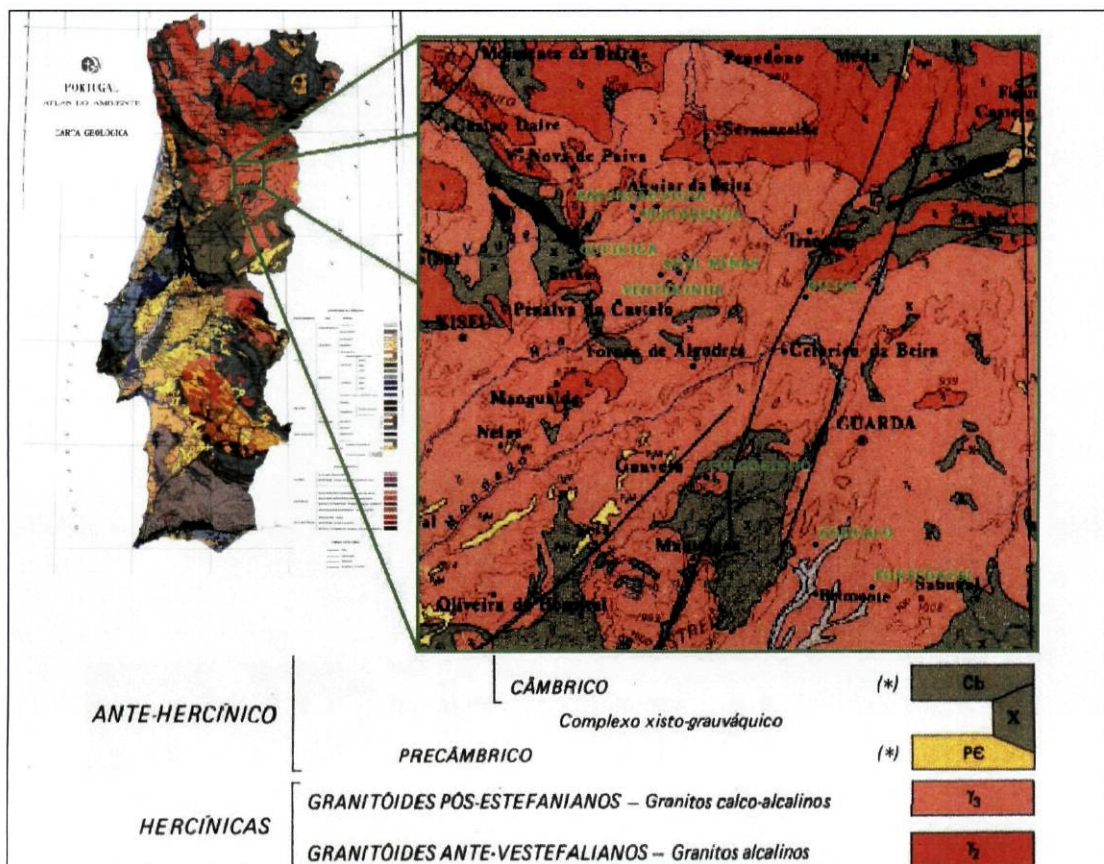


Figura 4.3 - Carta Geológica de Portugal à escala 1:1.000.000 do Atlas do Ambiente.

#### 4.1. PESTARENGA

A área da folha de Aguiar da Beira (14-D) é ocupada, quase na totalidade, por rochas granitóides, com predominância dos granitos. Os granitos são variados, quanto ao aspecto textural, desde os porfiróides grosseiros aos não porfiróides de grão fino, e do ponto de vista da composição, desde os alcalinos aos calco-alcalinos, com termos de passagem entre os dois. O contacto com as rochas vizinhas é, de modo geral, nítido, embora, às vezes seja bastante menos distinto, como acontece na zona de transição para o granito da Lamosa (Teixeira, et al., 1972).

A área correspondente à mina da Pestarenga está contida na folha 14-D (Aguiar da Beira) da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50.000, editada pelos Serviços Geológicos de Portugal (Figura 4.4), na qual se encontram granitos calco-alcalinos ( $\gamma\pi m$ ). Na local em estudo o granito é caracterizado por ser leucocrático, porfiróide, de grão médio a grosseiro, de duas micas essencialmente biotítico.

A constituição deste tipo de granito inclui oligoclase, albite-oligoclase, microclina-perthite, quartzo, biotite e moscovite como constituintes essenciais, apatite, zircão, monazite e rútilo como acessórios comuns. O quartzo, em secções xenomorfas, exhibe extinções irregulares e raramente ondulantes (Teixeira, et al., 1972).

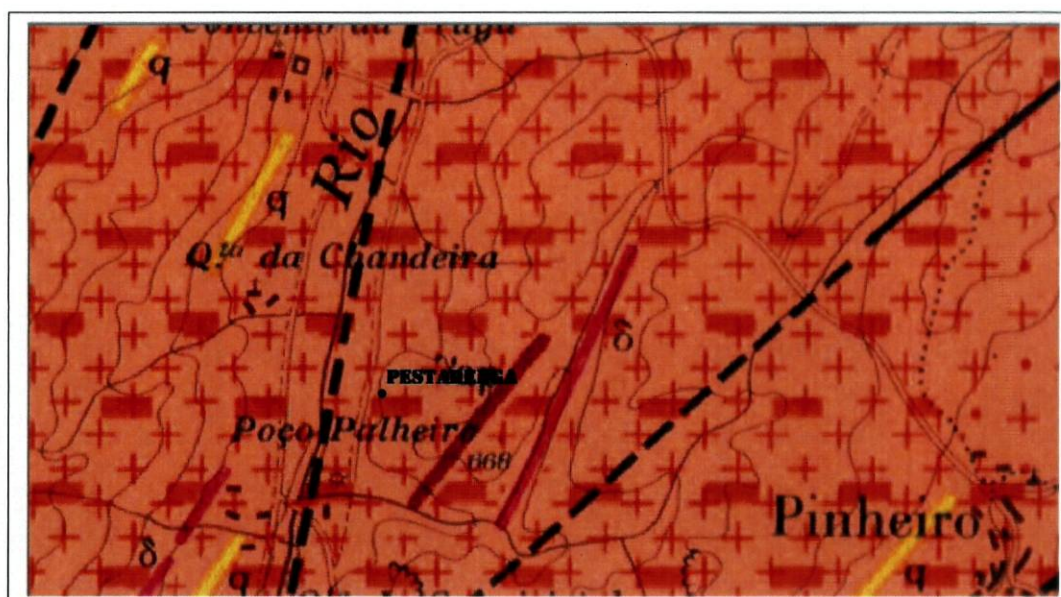


Figura 4.4 - Extracto da folha 14-D Aguiar da Beira da Carta Geológica de Portugal à escala de 1:50.000.

São também referenciados na mesma folha 14-D e com base na notícia explicativa correspondente, afloramentos de rochas filonianas, que no geral tem direcção NE-SW:

- Zonas de filões e massas aplito-pegmatíticas;
- Filões doleríticos;
- Filões e massas aplito-pegmatíticos;
- Filões e massas de quartzo;

São numerosos os filões de quartzo constituídos, na maior parte dos casos, por quartzo branco, leitoso. Mas existe, também, quartzo acinzentado, quartzo fumado ou ferruginoso; havendo alguns de natureza brechóide, com os fragmentos de quartzo cimentados por silicificação posterior à tectonização. Os encostos são, às vezes, ferruginosos e mais raramente jaspóides. As direcções dominantes na zona de concessão N-S e NE-SW (Teixeira, et al., 1972).

Alguns destes filões mineralizados deram origem a tentativas de exploração mineira e estão, por isso, em parte desmantelados. Os filões aplito-pegmatíticos são frequentemente horizontais ou sub-horizontais (Teixeira, et al., 1972).

O maciço granítico foi cortado por uma rede apertada de falhas e zonas de esmagamento, nalguns destes acidentes instalaram-se filões quartzosos e outros. A orientação geral destes acidentes é NE-SW ou NNE-SSW, como é habitual nesta parte da Beira.

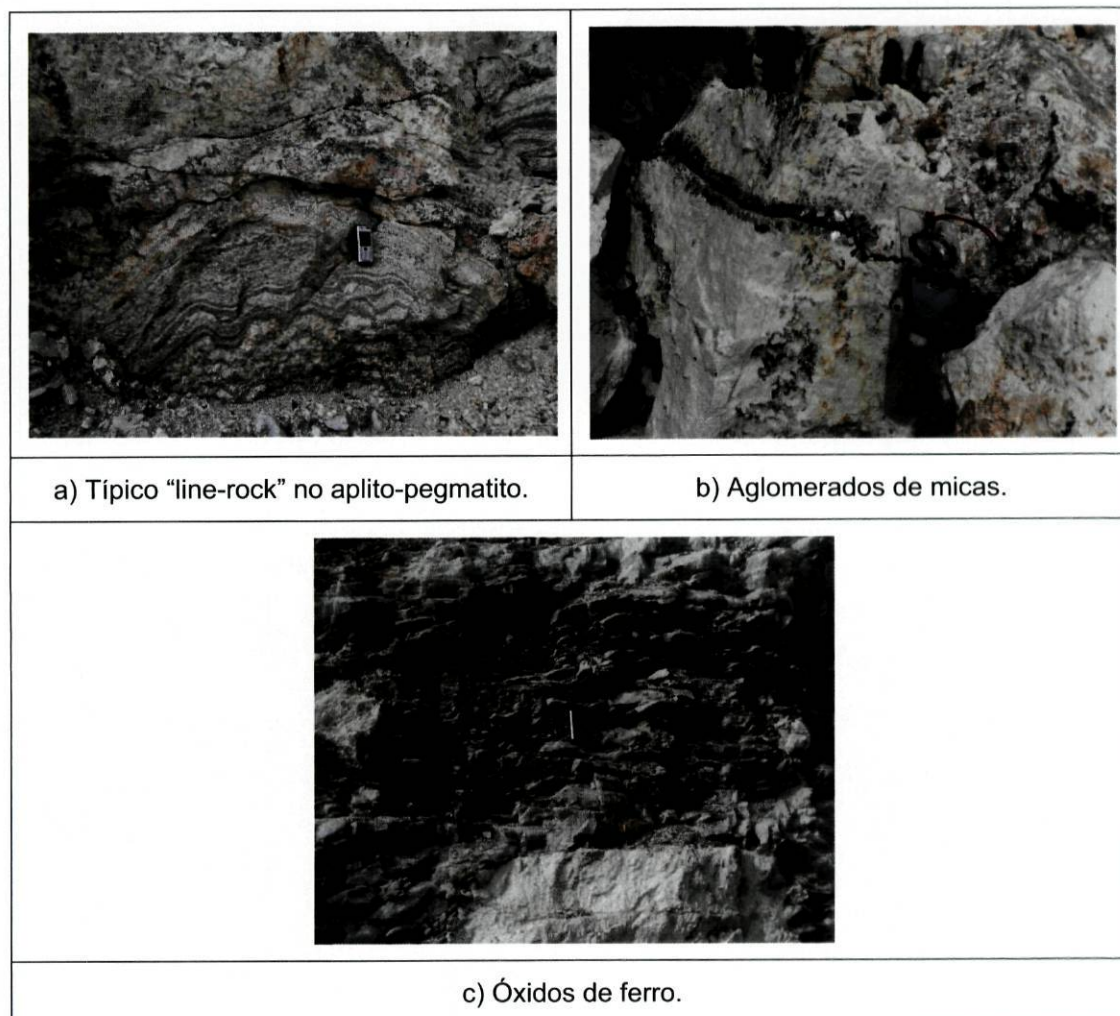
### **Visita à Mina da Pestarenga (Poço Palheiro)**

Na Figura 4.5 é evidenciada a litologia granítica característica desta concessão, bem como alguns filões de quartzo. No entanto, é importante referir que à data e à profundidade já tinha sido desmontado o afloramento quartzoso principal, sendo esta a causa da fotografia não evidenciar blocos de quartzo com expressão significativa.



**Figura 4.5** - Mina da Pestarenga.

Em maior pormenor foi possível detectar lineações aplíticas e pegmatíticas (Figura 4.6 a)), aglomerados de micas (Figura 4.6 b)) e zonas com óxidos de ferro (Figura 4.6 c)).



**Figura 4.6** - Pormenor de mineralizações registados na visita à mina da Pestarenga.

## 4.2. VIGIA

De acordo com a folha 14-D, (Aguiar da Beira), da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50.000, editada pelos Serviços Geológicos de Portugal (Figura 4.7), a concessão de Vigia encontra-se na área de granitos calco-alcálicos ( $\gamma\pi\pi$ ) predominantemente biotíticos, porfíroide de grão médio a grosseiro, como na mina referida anteriormente, Pestarenga. Estas duas minas encontram-se sobre a mesma formação geológica e visto que toda a informação referida para a mina da Pestarenga é aplicável para a Mina da Vigia, não será repetida essa informação.

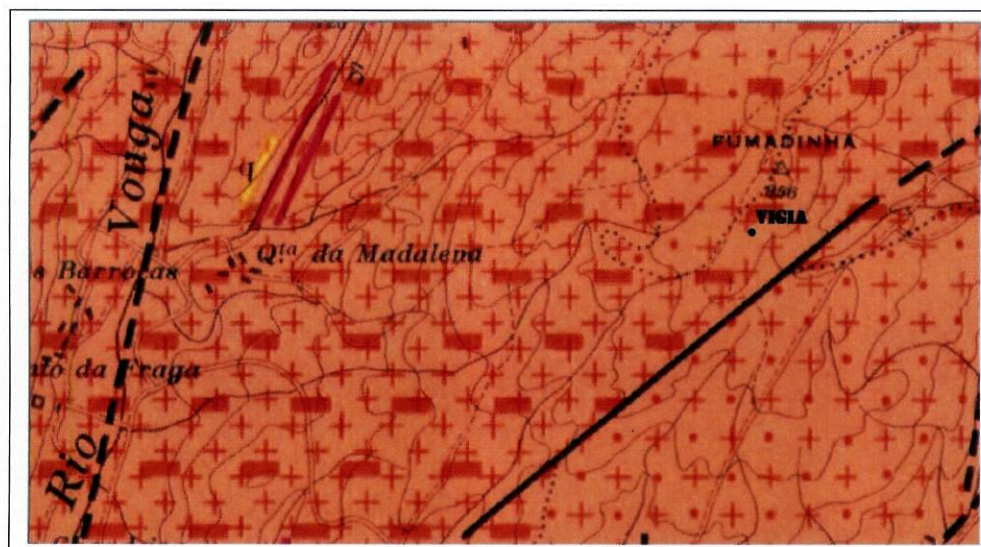


Figura 4.7 - Localização da concessão de Vigia na Carta Geológica de Portugal, folha 14-D.

No entanto, é importante referir que a mina da Vigia se encontra muito próxima da transição do granito de grão médio para grosseiro, designado pela simbologia  $\gamma\pi g$  (granito porfíroide de grão grosseiro de duas micas com biotite predominante), como também a variante deste granito com rochas filonianas (filões e massas aplito-pegmatíticas), na folha 14-D.











### Visita à Mina da Vigia

A Figura 4.8 é alusiva à zona de extracção da mina da Vigia, evidenciando assim um local onde já foi removido o material com possível valor económico.



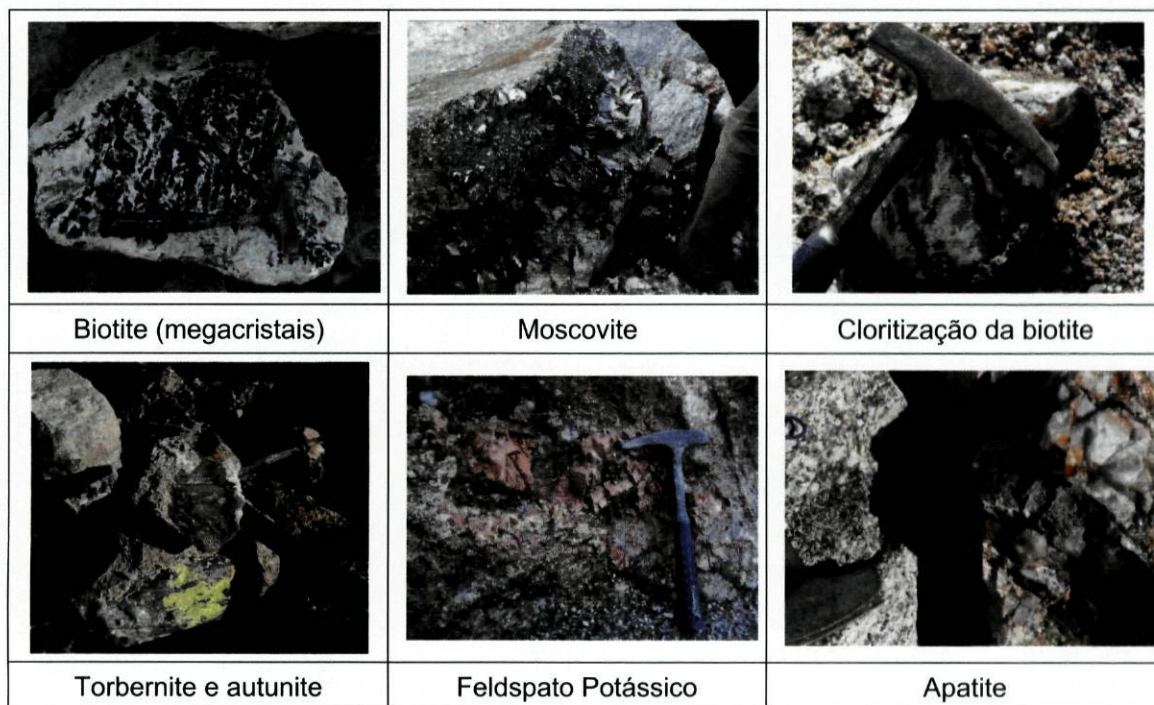
**Figura 4.8** - Fotografia panorâmica da Mina da Vigia

Foram registadas várias estruturas litológicas aflorantes nesta mina, havendo uma variação entre estruturas pegmatíticas (Figura 4.9 a)), aplito-pegmatíticas (Figura 4.9 b) e c)), contacto da estrutura aplítica com o encaixante (Figura 4.9 d)), bolsas pegmatíticas (Figura 4.9 e)), diferentes tipos de granito (Figura 4.9 f), g), h) e i)) (granito porfiróide biotítico, um granito intermédio e granito porfiróide róseo, processo de episienitização) e filões (Figura 4.9 j)).

		
<p>a) Estrutura aplito-pegmatítica</p>	<p>b) Estrutura aplito-pegmatítica</p>	<p>c) Aplito</p>
		
<p>d) Estrutura aplítica no meio do encaixante</p>	<p>e) Bolsas pegmatíticas</p>	<p>f) Granito cinza e filão e granito róseo</p>
		
<p>g) Granito porfiróide (feldspato)</p>	<p>h) Granito porfiróide róseo</p>	<p>i) Diferentes tonalidades de granito</p>
		
<p>j) Pegmatito e filão aplítico</p>		

**Figura 4.9** - Registos da estruturas litológicas quando da visita à mina da Vigia.

Também foram registados aspectos mineralógicos de relevância, tendo em conta a ocorrência e as características da mina. Foram registados cristais de biotite de grande dimensão, alteração da biotite para clorite (cloritização), moscovite, autunite, torbernite, feldspato potássico, granadas, apatite, (Figura 4.10) e berilo.



**Figura 4.10** - Aspectos mineralógicos registados na visita à mina da Vigia.

### 4.3. VENTURINHA

A mina da Venturinha encontra-se descrita, geologicamente, na folha 17-B, da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50.000, editada pelos Serviços Geológicos de Portugal (Figura 4.11). Verifica-se que a mina da Venturinha está intruída, em granitos calco-alcalinos predominantemente biotíticos, porfiróide de grão grosseiro.

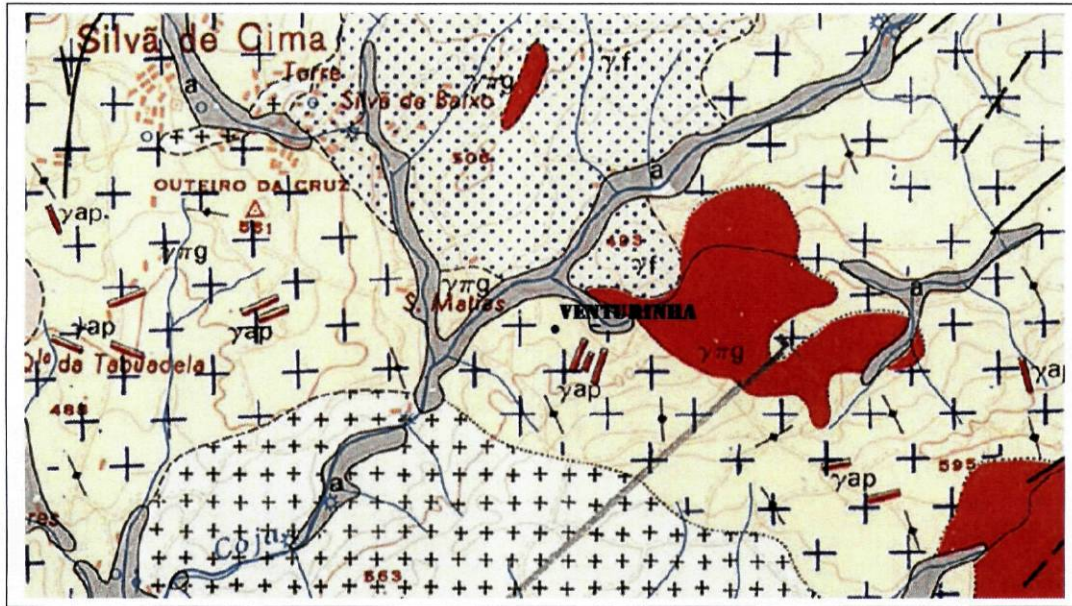


Figura 4.11 - Localização da concessão de Venturinha na carta geológica de Portugal, folha 17-B.

O granito porfiróide, predominante na região, é uma rocha essencialmente de grão grosseiro ou por vezes, de grão grosseiro a médio. No meio deste granito porfiróide destacam-se numerosos afloramentos de granito de texturas diversas que representam diferenciações mais ou menos extensas da mesma rocha.

São também evidenciados na mesma folha afloramentos de rochas filoneanas:

- Filões e massas aplito-pegmatíticos
- Filões e massas de quartzo

Estando no granito porfiróide de grão médio ( $\gamma\pi m$ ), com rochas filonianas:

- Filões e massas de quartzo

Os filões de quartzo, nas zonas graníticas, por vezes são muito desenvolvidos, e em geral, estão orientados segundo a direcção NE-SW ou NNE-SSW. O quartzo é leitoso, frequentemente zonado (com bandas alternantes de quartzo branco e de quartzo defumado), no entanto não é raro, a ocorrência de estruturas brechóides e a presença de jaspe. Por outro lado, os filões aplito-pegmatíticos ocorrem dispersos no granito, apresentando-se com atitudes horizontais e sub-horizontais.

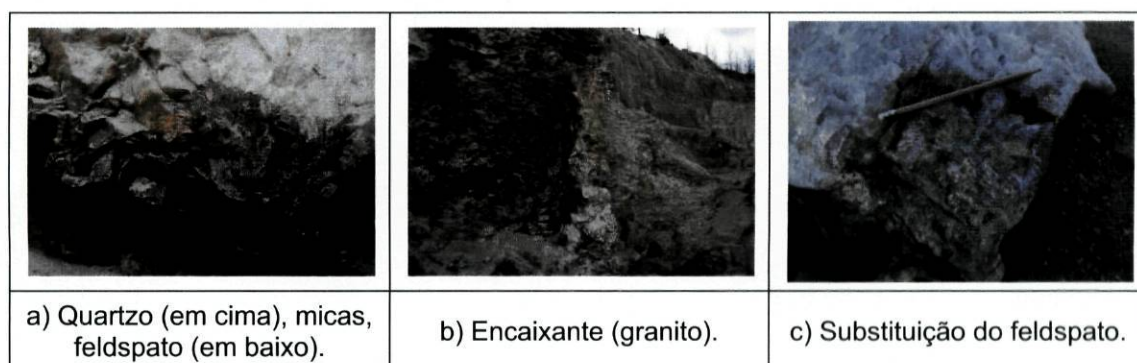
### Visita à Mina da Venturinha

Na Figura 4.12 é evidenciada a litologia granítica característica desta concessão e o contacto com o pegmatito, com megacristais de quartzo a cotas superiores, micas a cotas inferiores e por fim feldspato a cotas ainda mais profundas.





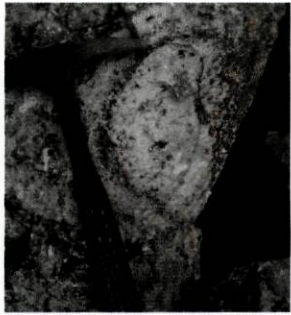
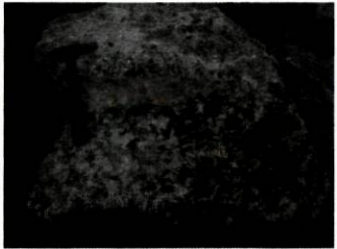
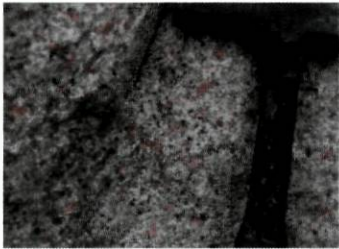
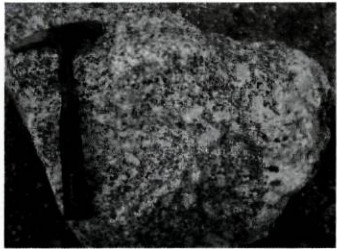


**Figura 4.12 - Mina Venturinha**

Na visita à concessão da Venturinha foi possível detectar megacristais de micas e feldspato (Figura 4.13 a)), a bordejar o coração de quartzo. Em determinadas zonas o feldspato encontra-se substituído por apatite (Figura 4.13 b)). O granito é a rocha encaixante (Figura 4.13 c))



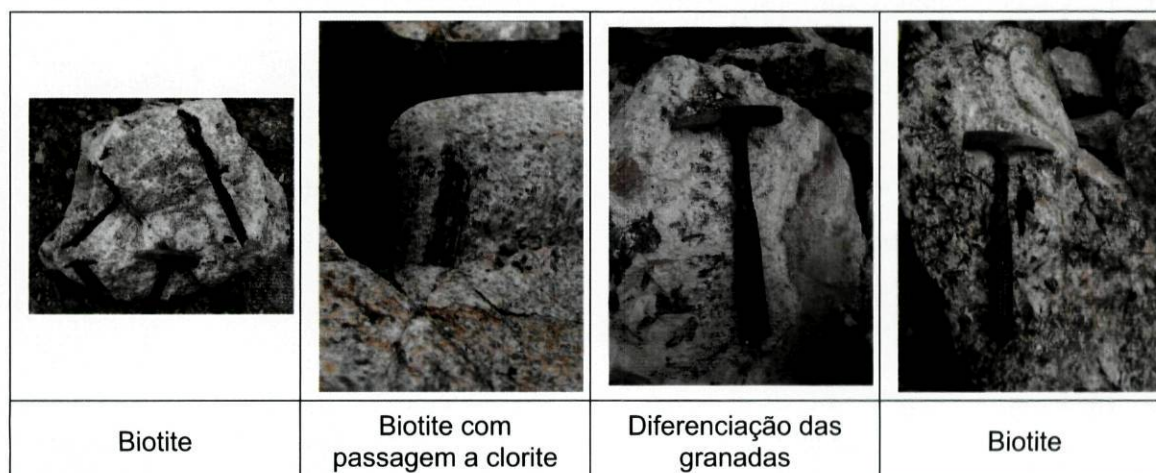
**Figura 4.13 - Registo fotográfico de mineralizações da mina da Venturinha.**

Também foram registadas litologias aplíticas, aplito-pegmatíticas, aplito com feldspato, granito porfiróide (feldspato), texturas gráficas e aplíticas, como mostra a Figura 4.14.

		
Quartzo superior, micas e feldspato	Aplito - pegmatito	Aplito
		
Pegmatito	Estrutura aplítica com grãos maiores de feldspato	Granito porfiróide
		
Estrutura gráfica	Estrutura gráfica	

**Figura 4.14** - Registo fotográfico de pormenores litológicos e texturais da mina da Venturinha.

Em termos mineralógicos foram encontrados cristais alongados de biotite, cristais de apatite, granadas, berilo e fosfatos (Figura 4.15).



**Figura 4.15** - Registo fotográfico de características mineralógicas da mina da Venturinha

O granito ocupa a maior parte da área abrangida pelo mapa, pertence à grande mancha da Beira, de idade Hercínica. A intrusão desta rocha atingiu fortemente as rochas xistentas, que então cobriam a região, deformando-as e originando acções de metamorfismo de contacto bastante intensas.

Além do granito porfiróide, ocorreram diferenciações que apenas se separam deste, pelo menos aparentemente, quanto à textura. Estas diferenciações, por vezes extensas, formam ilhotas, no geral, de contornos sinuosos, no meio do granito porfiróide.

Ainda em relação à intrusão granítica Hercínica, formaram-se, em fase tardia, numerosos filões pegmatíticos, aplito-pegmatíticos e quartzos, alguns deles com interesse mineiro.

#### 4.4. FRECHES (BICHA)

A geologia da área correspondente à mina de Freches (Bicha) está descrita na folha 18-A (Vila Franca das Naves), da Carta Geológica de Portugal, editada pelos Serviços Geológicos de Portugal (Figura 4.16), na qual se verifica a predominância de granito porfiróide de grão médio a fino,  $\gamma\pi m$ , e granito de grão muito grosseiro, frequentemente porfiróide,  $\gamma\pi'g$ .

O granito de grão médio a fino ( $\gamma\pi m$ ), aflorante na zona da mina é caracterizado por uma textura porfiróide, com megacristais grandes mas não muito abundantes, principalmente microclina-pertite. Por outro lado, é vulgar a associação micropegmatítica de quartzo e de feldspato potássico.

Este granito possui, por vezes, concentrações melanocráticas biotíticas, formadas por quartzo, biotite, ortoclase e plagioclase, tendo como minerais acessórios magnetite (abundante), zircão e esfena e, ainda, diversos minerais secundários, como clorite, caulinite, sericite, epidoto, entre outros.

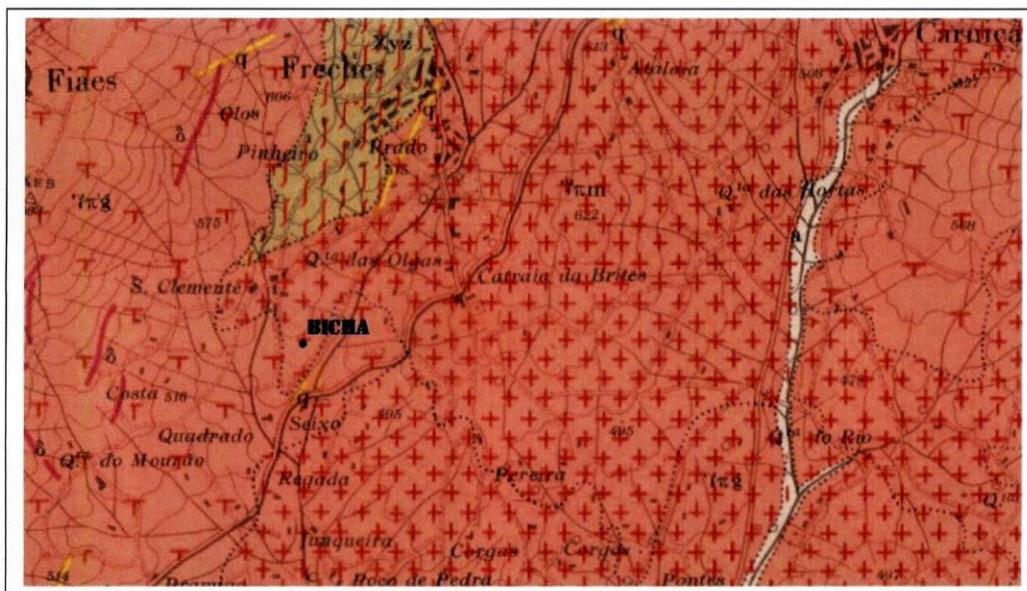


Figura 4.16 - Localização da concessão de Freches na Carta Geológica de Portugal, folha 18-A.

O granito de grão médio a fino,  $\gamma\pi m$ , constitui diversas manchas, nomeadamente a mancha de Carnicães, a qual engloba a mina de Freches, na qual se encontra o contacto com o granito porfiróide, caracterizada por um afloramento relativamente

extenso, que continua para a região de Trancoso. A rocha contacta com formações xisto-migmatíticas e passa lateralmente, nalguns pontos, a gnaiss. Os megacristais de feldspato são abundantes, embora pequenos e por vezes orientados.

No lado Oeste da mina ocorre granito de grão muito grosseiro, frequentemente porfiróide,  $\gamma\pi'g$  que não é mais que uma fácies do granito porfiróide, diferenciado pela fraca individualização dos megacristais. Evidencia um aspecto de granito de grão muito grosseiro, embora com passagem frequente e gradual ao granito porfiróide típico. Todavia, em alguns pontos, há separação nítida entre estes dois tipos de granito.

A mancha mais próxima da mina de Freches é a “Mancha de Fiães”, caracterizada por granito grosseiro que constitui uma pequena mancha no canto da área cartografada, prolongando-se para lá dos limites desta. A rocha, geralmente, é muito fracturada e enrugada e contém andaluzite e silimanite.

São frequentes, na região, os filões pegmatíticos e aplito-pegmatíticos, que têm desenvolvimento reduzido. Os filões cartografados mais próximos da mina são os de quartzo, e são numerosos na região abrangida pelo mapa de Vila Franca das Naves.

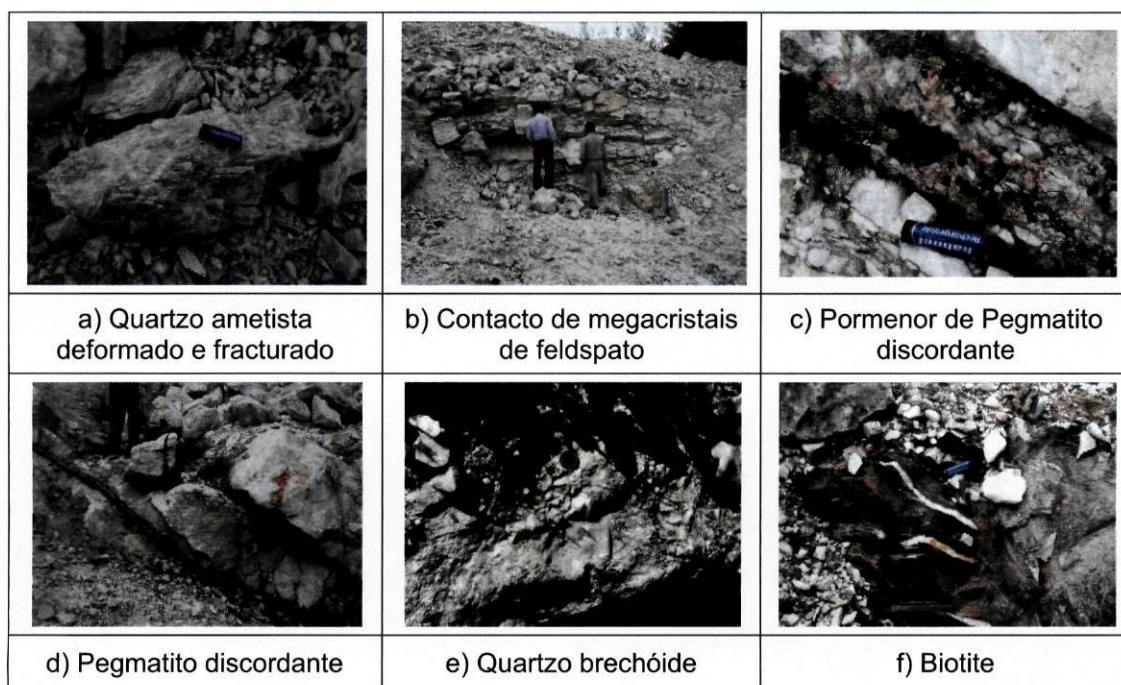
O quartzo é, no geral, branco leitoso, mas por outro lado, existem, igualmente, filões de quartzo brechóides e jaspóides com encostos ferruginosos. Estes últimos são habitualmente acompanhados por mineralizações uraníferas.

Muitos filões quartzosos são mineralizados por estanho e volfrâmio e a sua localização é predominante na região a WSW de Freixo e na zona entre Salgueiral e Penha Forte. Normalmente, os filões são de pequena espessura, orientados entre as direcções N20°W e E-W, aproximadamente. É importante mencionar que na primeira destas zonas, os referidos filões foram largamente explorados.

Por seu lado, na região de Freixedas ocorrem filões quartzosos, com mineralizações de estanho, volfrâmio e urânio, com direcção, aproximadamente, N30°E, os quais foram intensamente explorados.

**Visita à Mina de Freches (Bicha)**

Esta mina é constituída por um coração de quartzo (Figura 4.17 a)) com um afloramento de megacristais de feldspato (Figura 4.17 b)) e filões pegmatíticos discordantes da estrutura pegmatítica anterior (Figura 4.17 c) e d)). Por outro lado, nas redondezas, afloram também estruturas de quartzo brechóide (Figura 4.17 e)), que evidenciam uma zona de falha. Na zona de contacto com o encaixante verifica-se o afloramento de grandes concentrações de biotite (Figura 4.17 f)).

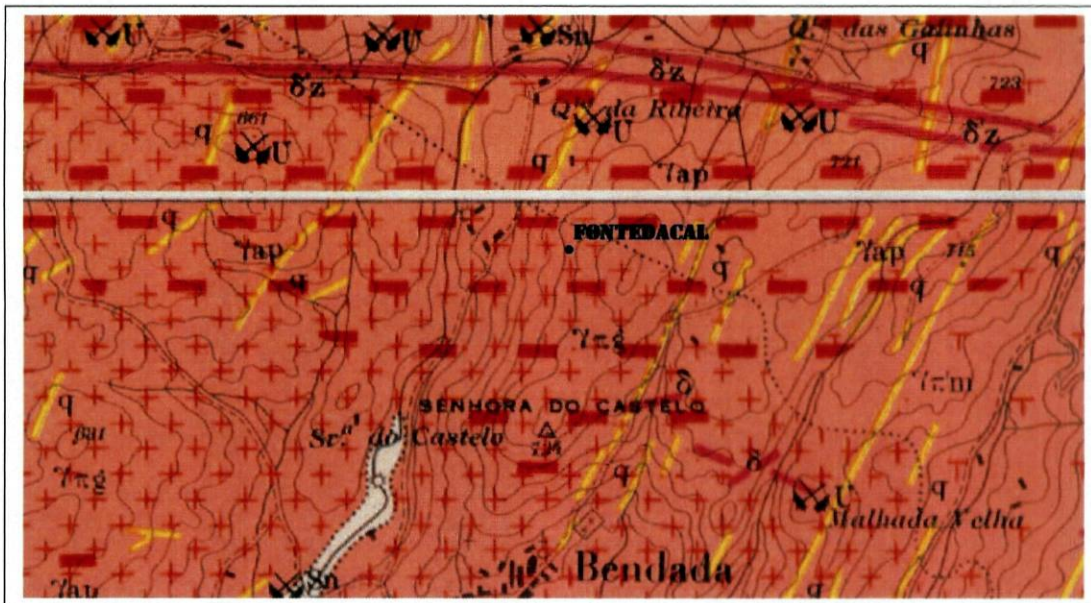


**Figura 4.17** - Registo fotográfico de pormenores mineralógicos da mina de Freches.

Os granitos que afloram nesta área pertencem ao grande batólito granítico das Beiras, cuja intrusão ocorreu no final do Carbonífero. Os diferentes tipos de granito referidos correspondem apenas a diferenciações texturais da mesma rocha. Quer devido ao desenvolvimento de tensões internas, quer pela actuação de forças compressivas externas, o enorme maciço rígido foi dividido por inúmeras fracturas, nas quais se instalaram, em muitos casos, filões de natureza diversa. Os mais antigos são, sem dúvida, os aplito-pegmatitos e os filões quartzosos hipotermiais com mineralização em volframite, no entanto, alguns são posteriores à formação de filões de rochas básicas.

#### 4.5. FONTE DA CAL

A mina Fonte da Cal encontra-se descrita geologicamente, na folha 21-A, da Carta Geológica de Portugal, editada pelos Serviços Geológicos de Portugal (Figura 4.18), a qual evidencia a existência de granito porfiróide de grão grosseiro,  $\gamma\pi g$ , e granito de grão médio e médio a fino,  $\gamma\pi'm$ .



**Figura 4.18** - Localização da concessão de Fonte da Cal na carta geológica de Portugal, folha 21-A.

O granito porfiróide de grão grosseiro ( $\gamma\pi g$ ), leuco-mesocrático, de duas micas, com predominância de biotite, ocupa quase a totalidade da metade da área cartografada. A rocha mostra abundantes megacristais de feldspato, geralmente, euédricos e, por vezes, muito desenvolvidos.

A norte da Bendada, no contacto dos filões pegmatíticos, observam-se zonas em que o granito aparece empobrecido de feldspatos, constituindo verdadeiros gnaisses.

Quanto às características mineralógicas, estes granitos têm constituição bastante uniforme. O quartzo é abundante, por vezes fracturado, apresenta quase sempre extinções ondulantes, nalguns casos fortes, podendo ainda conter rútilo acicular. Os feldspatos estão representados por oligoclase, albite-oligoclase, microlina-pertite, micropertite e microclina, mostrando-se sempre alterados, sobretudo caulinizados,

sendo fraca a sericitização. É possível a observação de algumas plagioclases zonadas, em que o núcleo se mostra mais cálcico do que a periferia. Os feldspatos potássicos englobam, por vezes, pequenos cristais de plagioclase. É referida ainda a existência de alguns intercrescimentos do tipo mirmequite, tendo sido também observada alguma biotite esverdeada. Estas micas estão quase sempre frescas, sendo em geral fraca a cloritização e, nestes casos, pode exsudar rútilo acicular e esfena, a biotite mostra abundância de halos pleocróicos, cujos núcleos são cristais de zircão, de apatite ou pontuações negras; por descoloração a biotite dá origem, nalguns casos, à formação de moscovite, com menor frequência, observa-se simultânea exsudação de ilmenite castanha translúcida. A moscovite é frequentemente de origem secundária, formada a partir dos feldspatos e da biotite. Foram observados intercrescimentos de moscovite e feldspato. Como minerais acessórios foram observados apatite, zircão rútilo acicular e minerais negros de ferro; mais raramente, turmalina e fluorite (Teixeira, et al., 1965).

A N-NE aflora um granito de grão médio e médio a fino ( $\gamma\pi'm$ ), uma das diversas manchas no seio do granito porfiróide, designada pela Mancha de Quarta-Feira. O contacto das duas rochas é por vezes brusco e bem marcado, havendo, porém, também a passagem gradual de um granito para o outro. A rocha patenteia grão uniforme, notando-se a presença de biotite e moscovite. Todavia, em certos casos, a biotite desaparece quase completamente, tomando a rocha aspecto aplítico.

A zona é caracterizada por numerosos filões, nomeadamente de quartzo, pegmatitos e aplito-pegmatitos, que coincidem com a zona de contacto entre as várias fácies graníticas referidas.

Os filões de quartzo apresentam alguma regularidade, espessura e extensão, havendo alguns com mais de 10m de espessura. A orientação faz-se, no geral, nos quadrantes NE-SW, variando entre N10°E e N60°E, com predominância dos valores entre N30°E e N50°E, no entanto, existem algumas excepções que adquirem uma direcção, aproximadamente, E-W. Nesta região também se verifica a existência de grupos de filões paralelos.

Por outro lado, os filões pegmatíticos e aplito-pegmatíticos exibem posições quase sempre horizontais ou sub-horizontal, ao contrário dos de quartzo, que são geralmente verticais. A composição mineralógica dos pegmatitos é variada, além de quartzo e feldspato potássico e de moscovite, contêm berilo, turmalina, cassiterite, litiofilite, sulfuretos, entre outros.

### Visita à mina de Fonte da Cal

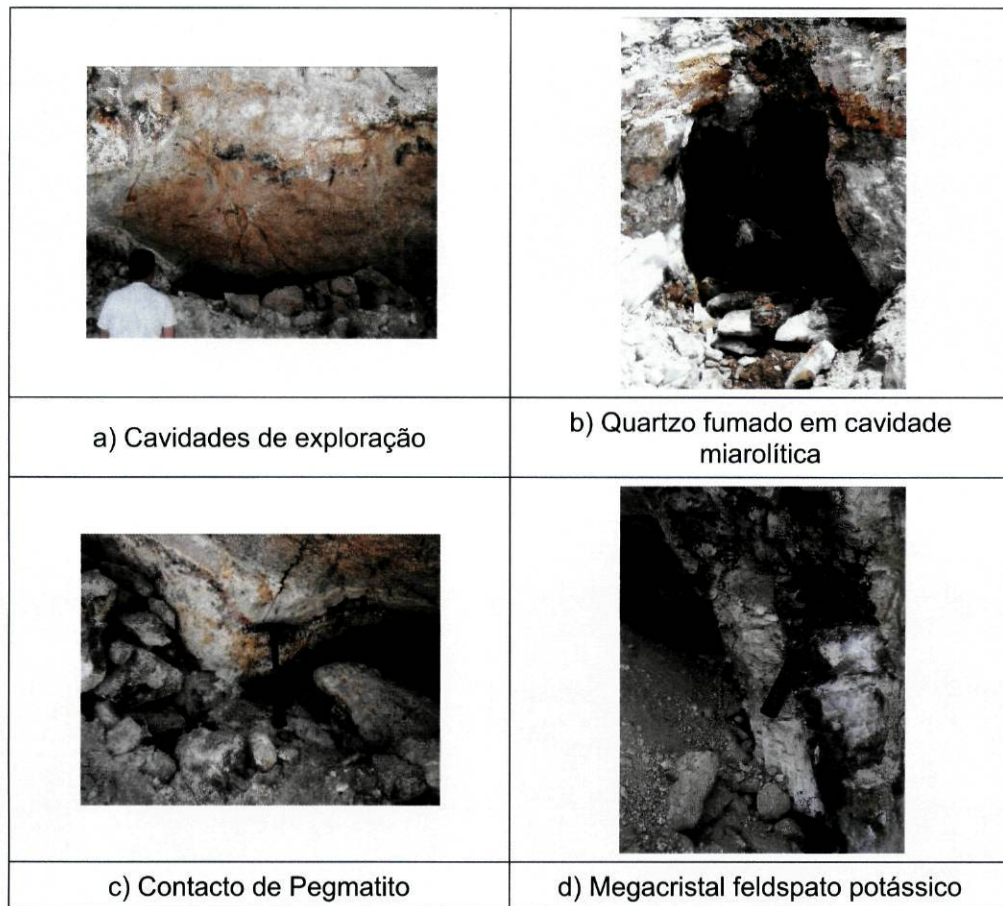
A Figura 4.19 elucida quanto ao panorama geral, nomeadamente no que diz respeito à extensão da mina e ao seu desmorte.



**Figura 4.19** - Mina da Fonte da Cal

Na visita à mina da Fonte da Cal foram detectadas cavidades de exploração de urânio (Figura 4.20 a)), e outras de cavidades miarolíticas em que muitas delas deram origem a grandes cristais de quartzo fumado (Figura 4.20 b)) e estruturas pegmatíticas (Figura 4.20 c)).

Em termos de mineralogia mais relevante, além do quartzo fumado, foram encontrados megacristais de feldspato potássico (Figura 4.20 d)).



**Figura 4.20** - Registos fotográficos de pormenores característicos da mina da Fonte de Cal.

Nos afloramentos graníticos é evidente sobretudo o sistema de fracturas de direcção NE-SW, preenchidas por filões quartzosos.

A fase de intrusão do granito é claramente posterior aos xistos, devendo estar relacionada com a actividade Hercínica. A origem dos filões aplito-pegmatíticos relaciona-se com o granito. Contudo, de idade mais recente, são os filões básicos que cortam o granito e os filões de quartzo que preenchem fracturas de idade Alpina (Teixeira, et al., 1965).

---

## **5. ENSAIOS LABORATORIAIS**

---

## 5. ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios laboratoriais realizados têm como principal objectivo determinar as características mineralógicas e químicas do quartzo, como também as propriedades mais importantes para as respectivas indústrias.

### 5.1. ANÁLISE PETROGRÁFICA

Durante o levantamento geológico das várias minas em estudo, recolheram-se amostras representativas do quartzo explorado em cada mina. Foram executadas lâminas polidas das amostras referidas, das quais se segue o estudo realizado no microscópio óptico polarizante Nikon Elipse, E 400 Pol. A obtenção do registo fotográfico dos diferentes aspectos microscópicos considerados relevantes foi efectuada pelo programa Axiovision 3.1.

#### **Características gerais do quartzo ao microscópico**

##### **Nicóis paralelos**

Cor: incolor

Clivagem: não apresenta

Macla: não apresenta

Relevo: muito fraco

Refringência:  $N_g = 1,5533$ ,  $N_p = 1,5442$

**Nicóis cruzados:**

Cor: vários tons de cinzento (luz polarizada em cinza e branco 1.<sup>a</sup> ordem)

Birrefringência: fraca ( $N_g - N_p = 0,0091$ ).

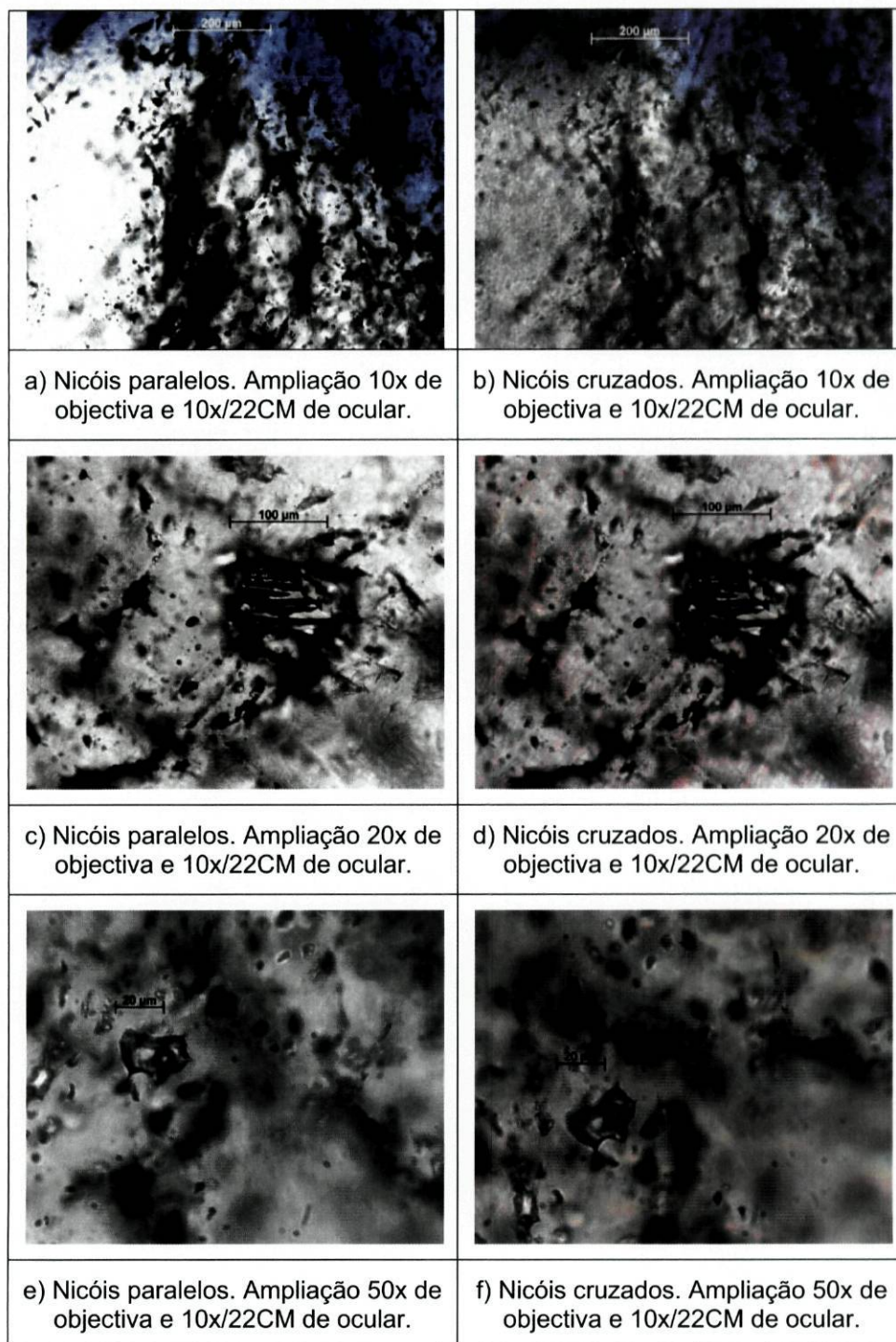
Uniaxial positivo, frequência biaxial anormal em comum com os esforços indícios de tectónica ( $2V = 0$  a  $25^\circ$ ) figuras muito nítidas.

**Observações:**

Presença às vezes de inclusões aciculares (turmalina, rútilo, etc.) ou inclusões líquidas ou gasosas ( $H_2O$ ,  $CO_2$ , etc), sob a forma de bolhas muito pequenas, cujas informações são observáveis a alta ampliação. Essas inclusões são muitas vezes dispostas em trilhas mais ou menos regulares.

**5.1.1. Pestarenga**

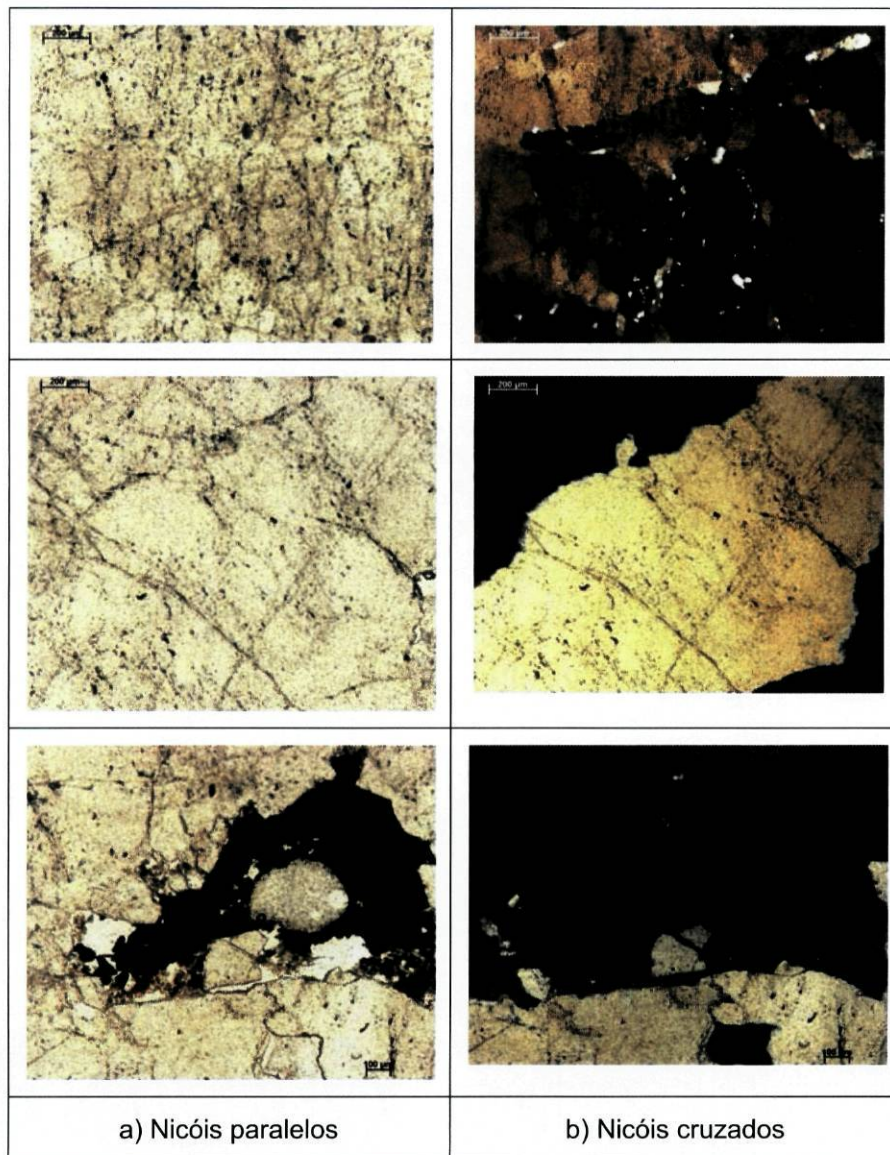
O quartzo observado nesta mina, raramente apresenta extinção ondulante e por outro lado são visíveis inclusões fluidas e impurezas (Figura 5.1).



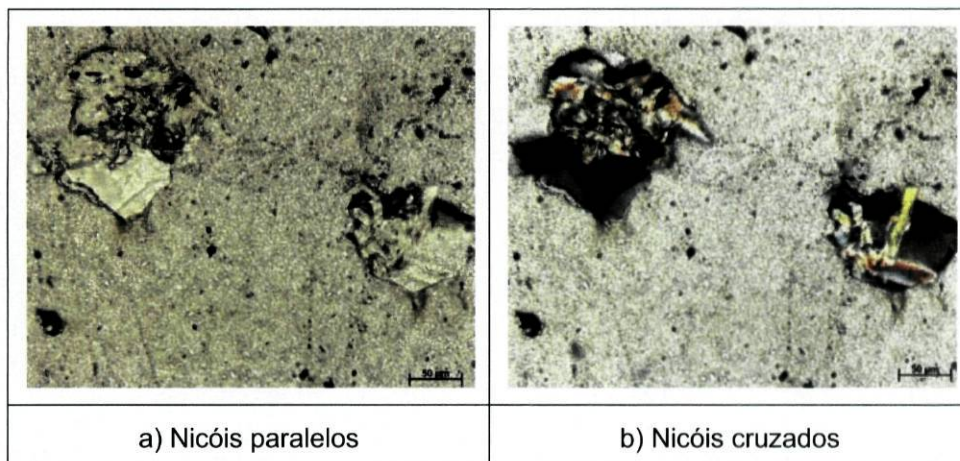
**Figura 5.1** - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Pestarenga.

### 5.1.2. Vigia

O quartzo analisado é normalmente anédrico, muito raramente apresenta extinção ondulante. São visíveis inclusões fluidas, limites pouco distintos entre os vários grãos, dimensões variadas, e por vezes existe orla de contacto entre os grãos (Figura 5.2). Foram também detectadas impurezas de óxidos e hidróxidos sem uma forma geométrica definida, como mostram as últimas fotografias da Figura 5.2, e outro tipo de impurezas registadas na Figura 5.3.



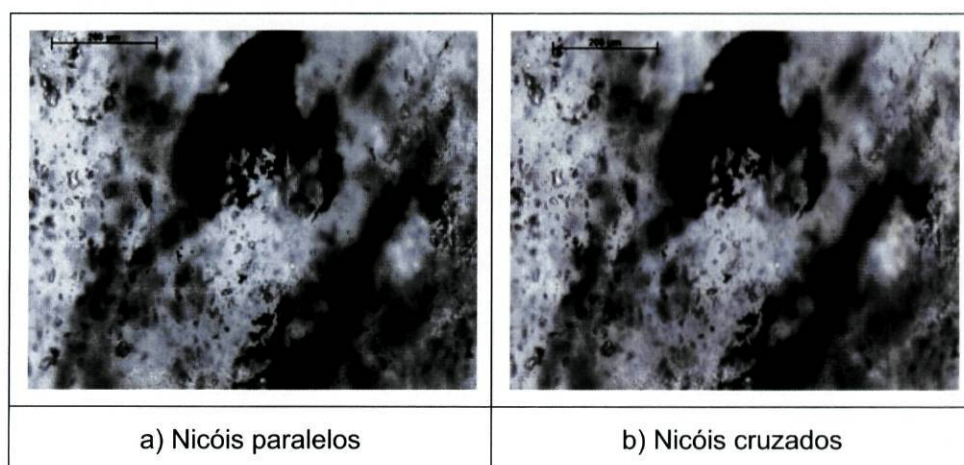
**Figura 5.2** - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Vigia. Ampliação 5x de objectiva e 10x/22CM de ocular.



**Figura 5.3** - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Vigia. Ampliação 20x de objectiva e 10x/22CM de ocular.

### 5.1.3. Venturinha

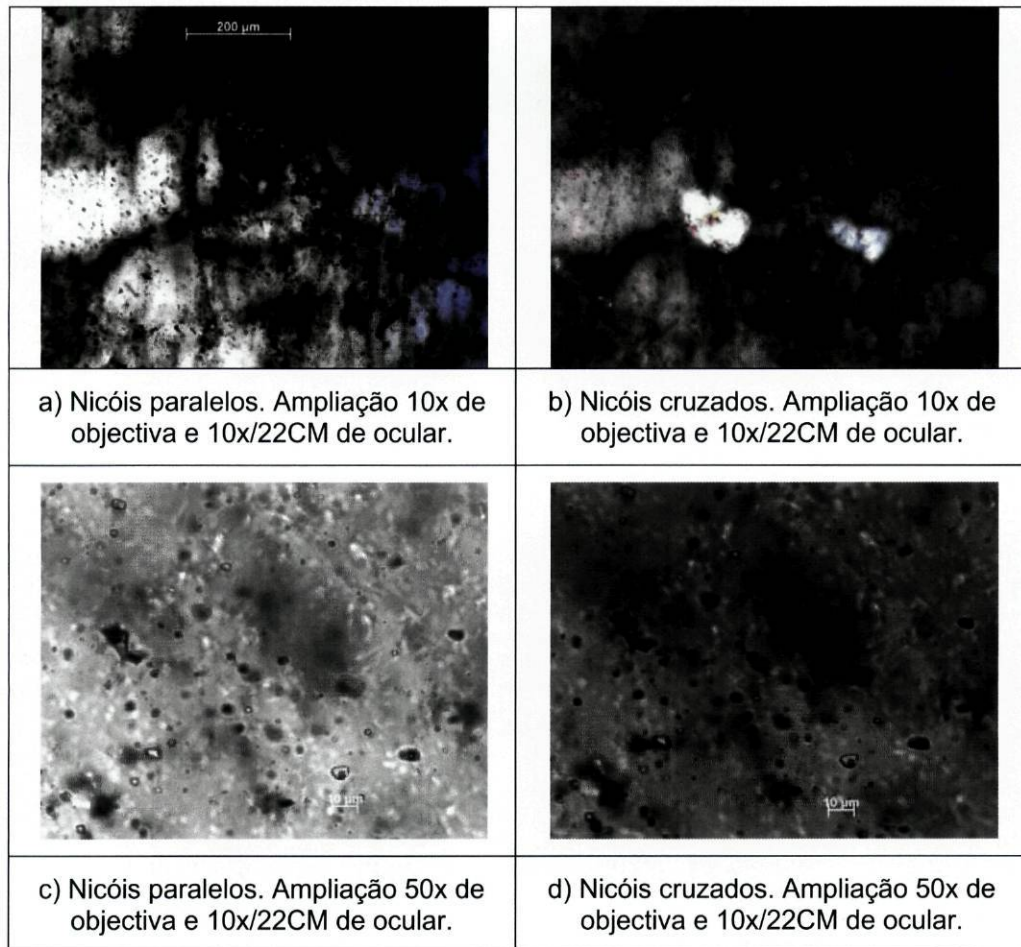
Nesta mina, como na anterior (estas duas minas estão contidas na mesma formação geológica, tal como foi referido no capítulo Enquadramento Geológico), o quartzo apresenta extinção ondulante quase inexistente, sendo visíveis inclusões fluidas e impurezas como mostra a Figura 5.4.



**Figura 5.4** - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Venturinha. Ampliação 10x de objectiva e 10x/22CM de ocular.

### 5.1.4. Freches (Bicha)

Na mina de Freches o quartzo apresenta extinção ondulante quase inexistente, são visíveis inclusões fluidas e impurezas como apresentam as fotografias incluídas na Figura 5.5.



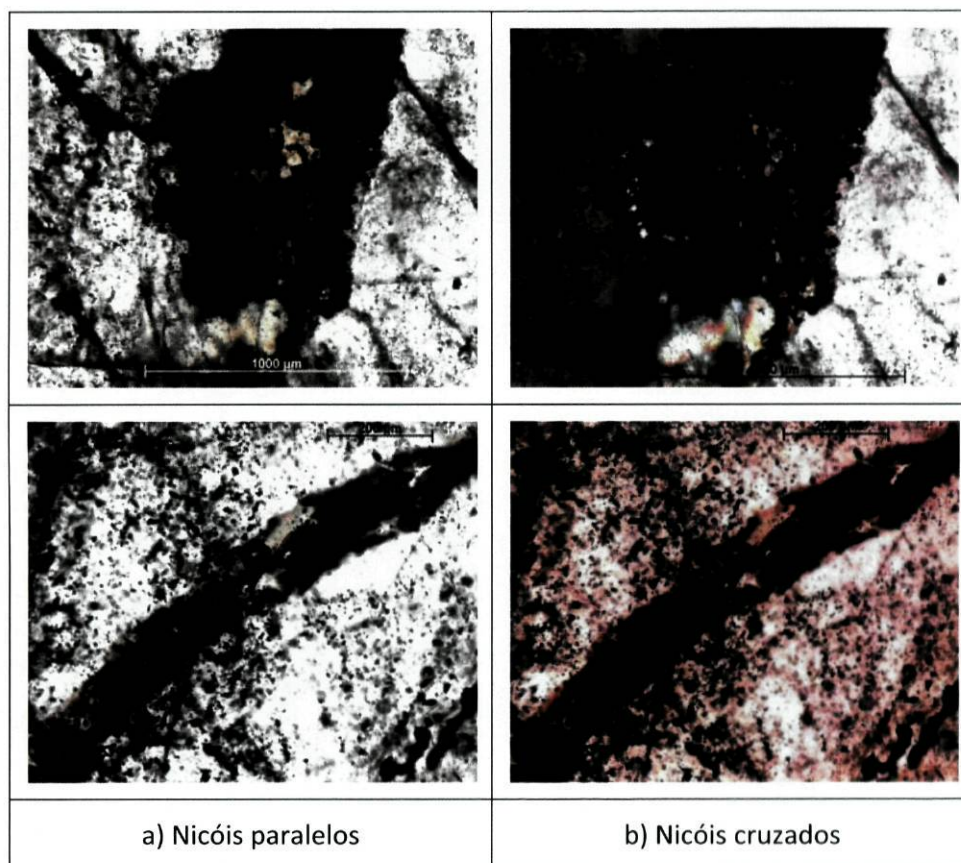
**Figura 5.5** - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Freches.

### 5.1.5. Fonte da Cal

O quartzo, da mina da Fonte da Cal, analisado apresenta extinção ondulante quase inexistente, inclusões fluidas (Figura 5.6), impurezas de óxidos e hidróxidos sem uma forma geométrica definida, e outro tipo de impurezas (Figura 5.7).



**Figura 5.6** - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Fonte da Cal. Observação em nicóis paralelos. Ampliação 50x de objectiva e 10x/22CM de ocular.



**Figura 5.7** - Fotografia microscópica da amostra de quartzo da Fonte da Cal. Ampliação 5x de objectiva e 10x/22CM de ocular.

A análise petrográfica das lâminas delgadas evidenciou uma certa homogeneidade entre as amostras, estando o quartzo praticamente isento de extinção ondulando e possuindo, em geral, grãos de grandes dimensões, muito pouco fracturados, e pontualmente evidência impurezas e abundantes inclusões fluidas.

Contudo, as lâminas do quartzo de Vigia e Fonte da Cal apresentam óxidos e hidróxidos sem uma forma geométrica definida.

## **5.2. ANÁLISES QUÍMICAS POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)**

A espectrofotometria de fluorescência de raios-x (FRX) é uma técnica que permite a análise de elementos químicos maiores (Si, Al, Mg, Ca, Ti, Na, K, P), como também elementos químicos menores (Rb, Sr).

A base técnica de FRX é denominada efeito de absorção fotoelétrica traduzido no seguinte modo: todos os elementos químicos presentes num espécime são excitados por um feixe policromático de raios-x primário com determinadas energias, emitindo radiações secundárias ou de fluorescência. Estas radiações são dispersas por cristais analisadores ou dispersores de modo que as radiações secundárias dos elementos possam ser resolvidas, e depois captadas por detectores dos tipos proporcionais e cintilações.

Finalmente, é necessária a correlação das intensidades medidas com os teores dos elementos químicos presentes (Figura 5.8).

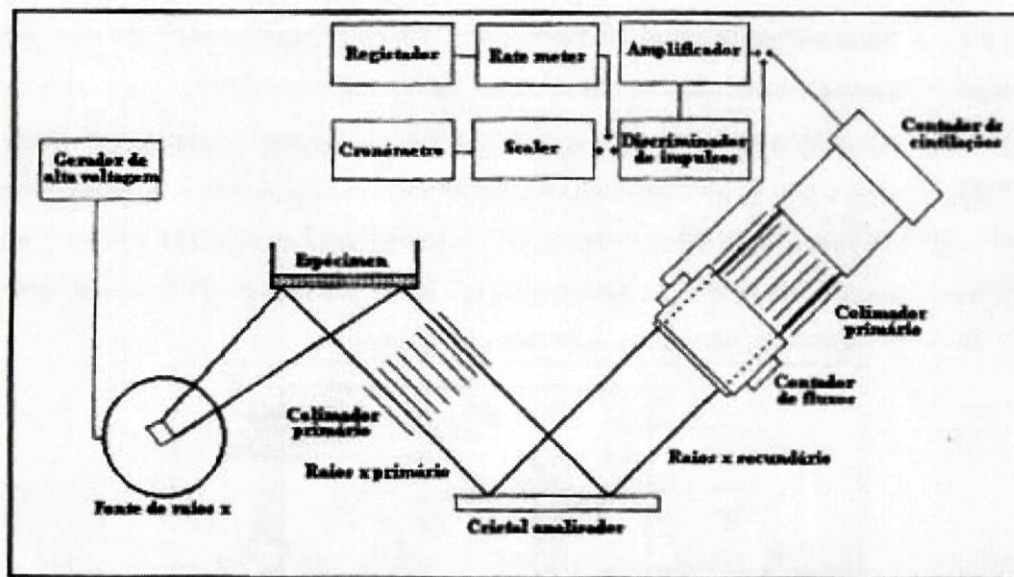


Figura 5.8 - Representação dos componentes principais de um espectómetro de raio-x (Gomes, 1979).

### 5.2.1. Apresentação e análise de resultados

O Quadro 5.1 apresenta os resultados das análises químicas anteriormente efectuadas pela FELMICA. Neste mesmo quadro estão presentes as proporções de aceitação dos respectivos elementos químicos por um determinado cliente da FELMICA\*.

Quadro 5.1 - Resultados das análises da FELMICA (%).

	Cliente *	Vigia	Vigia	Bicha	Venturinha	Fonte da Cal
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,0100/0,0500	0,0040	0,0050	0,0060	0,0030	0,0070
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,0500/0,1000	0,1200	0,1100	0,0900	0,0700	0,0700
<b>CaO</b>	0,0050/0,0100	0,0040	0,0020	0,0020	0,0010	0,0020
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,0015/0,0020	0,0008	0,0020	0,0060	0,0014	0,0027
<b>TS</b>	70,00	85,60	85,60	88,50	87,40	93,20
<b>Legenda:</b>		Valores abaixo do intervalo de aceitação do cliente				
		Valores dentro do intervalo de aceitação do cliente				
		Valores acima do intervalo de aceitação do cliente				

Pela análise do Quadro 5.1 verifica-se que em relação aos óxidos de ferro e de cálcio todas as minas estão abaixo do intervalo de aceitação do cliente, apresentando valores de qualidade superior do que a solicitada pelo cliente. Por outro lado os óxidos de alumínio e de titânio, no geral, ou respeitam o intervalo ou têm valores superiores a este.

Em termos globais dos elementos químicos a mina da Venturinha é a única que apresenta sempre valores abaixo do limite superior requerido pelo cliente, oferecendo assim qualidade superior à requerida pelo cliente.

**Quadro 5.2** - Resultados das análises das amostras recolhidas (%).

	<b>Pestarenga</b>	<b>Vigia</b>	<b>Venturinha</b>	<b>Freches</b>
SiO <sub>2</sub>	99,692	99,671	99,699	99,722
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,115	0,17	0,111	0,152
TiO <sub>2</sub>	0,018	0,013	0,013	0,010
Fe <sub>total</sub>	0,038	0,012	0,019	0,067
MgO	0,057	0,056	0,056	0,022
Na <sub>2</sub> O	0,044	0,049	0,046	0,025
K <sub>2</sub> O	0,010	0,011	0,013	0,013
CaO	0,024	0,019	0,034	0,011
Total	99,998	100,001	99,991	100,022
Rb	3,3	3,5	3,7	4,1
Sr	5,7	5,5	5,6	5,9

Na análise do Quadro 5.2, para a produção de silíciometal verificamos que todas as amostras respeitam o intervalo típico de sílica como também nos óxidos de ferro, cálcio e magnésio. Em termos de óxido de alumínio depreende-se a única amostra que ultrapassa o limite de referência, é a da mina da Vigia. De uma forma global verifica-se que estas minas não apresentam valores mínimos requeridos nos casos em que a qualidade de silíciometal requer intervalos mais apertados.

Para a produção de ferrosilício as amostras das minas Vigia e Venturinha exibem teores inferiores aos recomendados, por outro lado as amostras das minas de Pestarenga e Freches são reprovadas pelo teor em óxido de ferro.

Todas as amostras referidas no Quadro 5.2 respeitam os limites requeridos na produção de silício para a indústria química, como carga para alto-forno e fornos de fornalha aberta utilizados no fabrico de aço, e para a produção do elemento fosforoso em fornos eléctricos.

Contudo, quando se avança para uma indústria a qual requer um índice de impurezas extremamente baixo, electrónica e óptica, ou seja, um mínimo de 99,97% de sílica, as amostras em questão revelam não possuir tal pureza.



### **5.3. ÍNDICE DE ESTABILIDADE TÉRMICA IET (APLICÁVEL AO QUARTZO)**

Na metalúrgica o quartzo não deve decrepitar ou fraccionar em finos quando aquecido, isto porque, tal desenvolvimento provoca a redução da porosidade e da carga eléctrica. As principais consequências desta redução são o bloqueio do fluxo de gases e a fusão prematura, o que pode provocar a formação de crosta, e assim originar uma estruturação do gás e a criação de um sopro que desliga o forno.

Uma forma de avaliar a decrepitação do quartzo quando submetido a determinadas temperaturas elevadas, é a realização de Ensaio de Estabilidade Térmica.

Segundo Fernandes (2006), recentemente, as maiores empresas electrometalúrgicas sedeadas na Europa adoptaram um ensaio para a determinação do Índice de Estabilidade Térmica que, segundo as referidas empresas, reflecte de modo satisfatório a resistência do quartzo ao choque térmico.

Este ensaio consiste na recolha de quatro amostras dos lotes de cada mina, com calibres entre 25mm e 30mm. Este material é aquecido até atingir 1200°C, posteriormente a temperatura aumentará de 30 em 30°C em cada 30 min, até alcançar os 1300°C, permanecendo assim durante um período de duas horas.

O passo seguinte consiste no crivar do material de cada amostra por uma série de peneiros com aberturas de 20mm, 10mm, 4mm e 2mm, depois de arrefecido.

A partir dos resultados obtidos na crivagem, calcula-se o Índice de Estabilidade Térmica (ou química, IEQ), segundo a equação seguinte:

$$IEQ = \frac{\% \text{Acum. Ret.} > 20\text{mm} + \% \text{Acum. Ret.} > 10\text{mm} + \% \text{Acum. Ret.} > 4\text{mm} + \% \text{Acum. Ret.} > 2\text{mm}}{4}$$

A classificação do produto em termos de IEQ é realizada em concordância com os valores indicados no Quadro 5.3.

**Quadro 5.3** - Classificação da estabilidade química função dos valores de IEQ (Fernandes, 2006)

	<b>Má</b>	<b>Média</b>	<b>Boa</b>
<b>IEQ</b>	<70	70 - 79	≥ 80

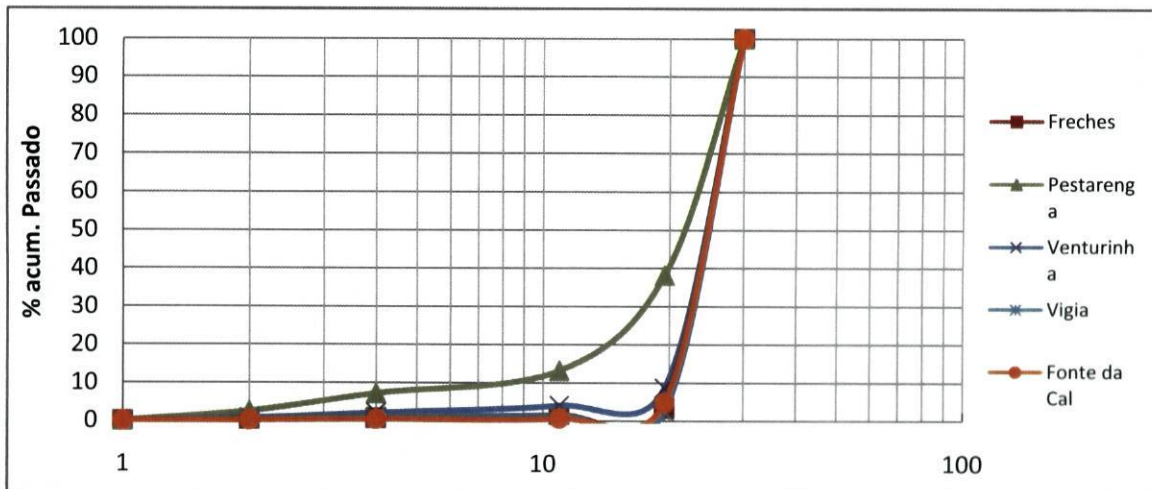
### 5.3.1. Apresentação de resultados

O Quadro 5.4 representa as percentagens de material passado na série de peneiros deste ensaio e os valores do IEQ para cada amostra analisada.

**Quadro 5.4 - Resultados da análise granulométrica e IEQ**

Peneiros	Freches		Pestarenga		Venturinha		Vigia		Fonte da Cal	
	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada
19,5	96,63	96,63	61,83	61,83	91,36	91,36	97,46	97,46	19,49	19,49
10,95	1,77	98,40	24,98	86,81	4,64	96,00	1,02	98,48	19,70	39,19
4	0,95	99,35	6,03	92,85	1,94	97,94	0,48	98,96	19,79	58,98
2	0,30	99,66	4,64	97,49	1,34	99,28	0,49	99,46	19,89	78,87
1	0,34	100,00	2,51	100,00	0,72	100,00	0,54	100,00	20,00	98,87

Foram projectados graficamente os valores do quadro anterior e assim elaboradas as curvas granulométricas de cada amostra (ver Figura 5.9), de forma a facilitar a observação dos resultados, ou seja, o desenvolvimento granulométrico das amostras.



**Figura 5.9 - Curvas granulométricas, obtidas no ensaio para a determinação do IEQ.**

Tal como se pode observar no Quadro 5.5, todas as minas estudadas apresentam um IEQ bom, sendo que Vigia, Freches e Fonte da Cal exibem valores superiores a 98%.

**Quadro 5.5** – Resume dos resultados obtidos no cálculo do IEQ.

	<b>Pestarenga</b>	<b>Vigia</b>	<b>Venturinha</b>	<b>Freches</b>	<b>Fonte da Cal</b>
<b>IEQ</b>	84,7	98,6	96,1	98,5	98,5

---

## **6. CONCLUSÃO**

---

## 6. CONCLUSÃO

O estudo realizado revela a importância da caracterização e avaliação do quartzo, particularmente a matéria-prima proveniente de pegmatitos aflorantes no território nacional, dada a importância da sua aplicação nos diversos sectores da indústria.

Segundo as análises efectuadas neste estudo, a caracterização mineralógica e geológica dos quartzos não revelou limitações significativas relativamente às aplicações industriais, no entanto, sem deixar de assinalar que a morfologia de alguns depósitos pode ser limitadora sob o ponto de vista económico, dada a natureza das formações nas quais o quartzo ocorre (em massas ou formações lenticulares), que conduz a explorações realizadas a céu aberto, com frentes geralmente baixas (na ordem das poucas dezenas de metros) e de pequena extensão, razão pela qual estes depósitos apenas permitem minas em pequena escala. Uma boa prática em todas as vertentes (económica, ambientais, rentabilização de recursos, ...) para contornar este problema é adoptar exploração dos depósitos de uma forma integral, ou seja, contemplando a comercialização dos materiais presentes. Esta iniciativa visa aumentar as taxas de extracção, diminuindo assim os custos de produção.

No entanto, em particular no caso em estudo não foi possível obter os dados da avaliação quantitativa das reservas avaliadas, visto que não foi fornecido pela concessão, sendo assim difícil prever a rentabilidade destas explorações.

## 6.1. POSSÍVEIS APLICAÇÕES DO QUARTZO

O Quadro 6.1 apresenta um resumo da análise realizada no Capítulo 5.2 no qual se averiguou a possibilidade de utilização das amostras em várias aplicações metalúrgicas, verificando-se assim que globalmente as amostras tem grande aproveitamento nesta área industrial.

**Quadro 6.1** - Resumo da validação das amostras estudadas para a sua aplicação na metalurgia

Produção	Valores típicos de matérias-primas	Matérias-primas de maior qualidade
Silíciometal	Globalmente: respeitados por todas as amostras. Excepção: mina da Vigia ( $Al_2O_3$ )	Globalmente: não são respeitados os limites.
Ferrosilício	Vigia e Pestarenga: cumpre. Prestarenga e Freches: reprova ( $Fe_{total}$ )	-
Silício para indústria química	Inferiores aos requeridos	-
Carga para alto-forno e fornos de fornalha aberta utilizados no fabrico de aço	Inferiores aos requeridos	-
Elemento fosforoso em fornos eléctricos	Inferiores aos requeridos	-

Por seu lado, o Índice de Estabilidade Química obtido nas amostras das minas em estudo exhibe valores que reflectem de modo satisfatório a resistência do quartzo ao choque térmico.

Assim, se conclui que os quartzos analisados facilmente são aplicáveis na metalurgia e na indústria que necessite de quartzo resistente ao choque térmico. Quanto à indústria electrónica e óptica, as quais requerem percentagens elevadíssimas de sílica (>99,997%) não será possível a sua utilização, visto que requerem um quartzo praticamente isento de impurezas (<0,003%), as quais poderão estar relacionadas nas referidas inclusões fluidas como noutra tipo de impurezas, registadas na análise efectuada ao microscópico.

É importante referir, que os critérios de aceitação requeridos pelos diversos tipos de indústria, apresentados neste documento, podem sofrer alterações consoante as exigências do cliente, este poderá exigir critérios mais apertados ou mais alargados (não tão rigoroso), conforme as condições pretendidas.

### **6.2. PERSPECTIVAS DE ESTUDOS E DESENVOLVIMENTOS**

Uma conclusão mais aprofundada poderá ser efectuada por uma maior quantidade e variedade de análises nomeadamente espectrometria de Raman, difracção de raio-x, como também análise a maior número de elementos químicos. Também deverão ser efectuados diversos tipos de ensaios que abranjam as especificidades das diversas aplicações e indústrias, como por exemplo: resistência à compressão, dureza, resistência à contaminação, resistência à fractura, porosidade.

Obtenção de dados referentes às dimensões extrapoladas das reservas, como também o que se constata actualmente durante a exploração.

---

## **7. BIBLIOGRAFIA**

---

## 7. BIBLIOGRAFIA

Aguado, B. (1992). Geología estructural de la zona de Cizalla de Porto-Tomar en la región de Oliveira de Azeméis-Serra de Arada (Norte de Portugal). Tese de doutoramento, Universidad de Salamanca.

Arcoverde, W. L. (1988). Balanço Mineral do Quartzo. *Brasil Mineral*, n. 54, p24-35.

Azevedo, M. R. (2006). Apontamentos de Geologia de Portugal. Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Borges, F. J. (1996). Elementos de Cristalografia. Fundação Calouste Gulbenkian. 2.<sup>a</sup> Edição, Lisboa.

Borges, F. J. (1996). Manual de Mineralogia Óptica. Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Buddington, A.F. (1959). Granite emplacement with special reference to North America. *Geol. Soc. Am., Bull.*, 70, 671-747.

Černý, P. & Ercit, T.S. (2005). Classification of granitic pegmatites revisited. *Can. Mineral.*, 43, 2005-2026.

Cerný, P. (1991). Rare-element granitic pegmatites. Part 1: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. Part 2: Regional to global environments and petrogenesis. *Geosci. Canada*, 18, 49-81.

Chakoumakos, B.C. & Lumpkin, G.R. (1990). Pressure-temperature constraints on the crystallization of the Harding pegmatite, Taos County, New Mexico. *Can. Mineral.*, 28, 287-298.

Clavijo, E., Balda, T., Catalán, J. (2006). La geología del sinforme de alcañices oeste de Zamora. Tese de doutoramento: Geología e Minería, Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca. Laboratorio Xeolóxico de Laxe. Área de Xeoloxía e Minería do Seminario de Estudos Galegos, Coruña.

Costa, J. (1950). Quelques remarques sur la tectonique du Portugal. Sociedade Geológica de Portugal, Sep.: Boletim da Sociedade Geológica de Portugal; vol. 8. Porto.

Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J. (1992). Minerais constituintes das rochas - Uma introdução. Serviço de Educação e Bolsas Fundação Calouste Gulbenkian, 2.<sup>a</sup> Edição. Lisboa.

Delgado, J. F. N. (1905) – Contribuição para o estudo dos terrenos paleozóicos. *Commum. Commiss. Serv. Geol. Portg.*, Lisboa, 6: 56-122.

Dias, P. A., Oliveira, J., Leal Gomes, C., Rodrigues, J. (2006). Topázios das Minas Velhas da Queiriga (Viseu) e mineralizações associadas – Análise estrutural e paragenética, VII Congresso de Geologia, Livro de Resumos, Volume III Universidade de Évora.

Dias, R. & Ribeiro, A. (1995). The Ibero Armorican Arc: a collision effect against an irregular continent? *Tectonophysics*. 246: 113–128.

Díez Balda, M. A., Vegas, R. & González Lodeiro (1990). Central Iberian Zone: structure. In: R.D. Dallmeyer & E. Martinez Garcia (Eds.). *Pre-Mesozoic geology of the Iberian Peninsula*, Springer Verlag. Berlin, p. 172–188. *Tectonophysics*. 246: 113–128.

Farias, P., Gallastegui, G., Lodeiro, F. G., Marquinez, J., Parra, L. M. M., Martínez Catalán, J. R., Maciá, J. G. P. & Fernandez, L. R. R. (1987). Aportaciones al conocimiento de la estratigrafía y estructura de Galicia Central. In: *Actas e Comunicações do IX Reunião de Geologia do Oeste Peninsular*. Porto, 1985, An. Fac. Cien. Univ. do Porto, Porto. Memórias n.º 1, p. 411-431.

Fenn, P.M. (1977). The nucleation and growth of alkali feldspars from hydrous melts. *Can. Mineral.*, 15, 135-161.

Fernandes, J. (2006). Potencialidades dos depósitos pegmatíticos de quartzo e de feldspato em Portugal. Tese para a obtenção do grau de doutoramento em Geociências no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Fowler, C.M.R. (2004). *The Solid Earth - An Introduction to Global Geophysics* Cambridge University Press, Cambridge.

Frindt, S., Haapala, I. (2004). Anorogenic Gross Spitzkoppe granite stock in central western Namibia: part I. Structures and textures indicating crystallization from undercooled melt. *Am. Mineral.*

Ginsburg, A.I. & Rodionov, G.G. (1960). On the depth of formation of granitic pegmatites. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, 45-54 (in Russian).

Ginsburg, A.I., Timofeyev, LN., Feldman, L.G. (1979). *Principles of geology of the granitic pegmatites*. Nedra, Moscow 296 p. (in Russian).

Heaney, P.J., Prewitt, C.T., Gibbs, G.V. (1994). *Silica - Physical behavior, geochemistry and materials applications*, Reviews in Mineralogy, Vol.29, Mineralogical Society of America.

Holleman, A.F., Wyberg, E. (1985). *Lehrbuch der anorganischen Chemie*, Walter Gruyter Verlag, Berlin, New York

Jahns, R.H. & Burnham, C.W. (1969). Experimental studies of pegmatite genesis: I. A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites. *Econ. Geol.*, 64, 843-864.

Jahns, R.H. & Tuttle, O.F. (1963). Layered pegmatite-aplite intrusives. *Min. Soc. Amer. Special Paper*, 1, 78-92.

Jahns, R.H. (1955). The study of pegmatites. *Econ. Geol.*, 50th Anniversary Volume, 1025-1130.

Jahns, R.H. (1982). Internal evolution of pegmatite bodies. in "Granitic Pegmatites in Science and Industry", P. Černý, eds., *Mineral. Assoc. Can. Short Course Handbook*, 8, 293-327.

Jahns, R.H., Griffith, W.R., Heinrich, E.W. (1952): Mica deposits of the southeastern Piedmont. *USGS Prof. Paper*, 248-A.

Jovenne, C. (1975). *Traité de céramiques et matériaux minéraux*. Editions Séptima. Paris.

Julivert, M., Fontboté, J. M., Ribeiro, A. & Conde, L. E. N. (1974). *Memória explicativa do Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares, à escala 1:1.000.000*. Inst. Geol. y Minero. España, 113.

Leal Gomes, C. (2001). Pegmatitos graníticos – Uma aproximação naturalista ao seu interesse económico, *GeoNovas*, Revista da Associação Portuguesa de Geólogos n.º16.

Leal Gomes, C. (2005). Contributo para a Sistemática dos Pegmatitos Graníticos referentes à Cintura Varisca Centro-Ibérica – características a considerar e Quadro Tipológico, *GeoNovas*, Revista da Associação Portuguesa de Geólogos n.º19, Porto.

Leal Gomes, C. (2006). Análise paragenética das transições de estado e paroxismos evolutivos observados em sistemas pegmatíticos diversificados – Uso de indicadores estruturais, mineralógicos e geoquímicos expressos na Cintura Pegmatítica Centro-Ibérica., Comunicação do VII Congresso de Geologia, Livro de Resumos, Volume III, Universidade de Évora, Évora.

Leal Gomes, C., Azevedo, A. S. (2003). Caracterização difractométrica e evolução paragenética de fosfatos em pegmatitos do grupo Senhora de Assunção (Viseu), Comunicação do IV Congresso Ibérico de Geoquímica, XIII Semana de Geoquímica Livro de Resumos, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Leal Gomes, C., Lopes Nunes, J. E. (2003). Análise Paragenética e Classificação dos Pegmatitos Graníticos da Cintura Hercínica Centro-Ibérica. *A Geologia de Engenharia e os recursos Geológicos*. Volume II. Imprensa da Universidade de Coimbra.

Lofgren, G.E. (1974). An experimental study of plagioclase crystal morphology: isothermal crystallization. *Am. J. Sci.*, 274, 243-273.

Lofgren, G.E. (1980). Experimental studies on the dynamic crystallization of silicate melts. in "Physics of Magmatic Processes", R. B. Hargraves, ed. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 487-551.

London, D. (1984). Experimental phase equilibria in the system  $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ : a petrogenetic grid for lithium-rich pegmatites. *Am. Mineral.*, 69, 995-1004.

London, D. (1986). The magmatic-hydrothermal transition in the Tanco rareelement pegmatite: evidence from fluid inclusions and phase equilibrium experiments. *Am. Mineral.*, 71, 376-395.

London, D. (1992). The application of experimental petrology to the génesis and crystallization of granitic pegmatites. *Can. Mineral.*, 30, 499-540.

London, D. (2005a). Geochemistry of alkali and alkaline earth elements in ore-forming granites, pegmatites, and rhyolites. in "Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits", R.L. Linnen & I.M. Sampson, eds. *Geol. Soc. Can. Short Course Notes*, St. Catharines, 17, 175-199.

London, D. (2005b). Granite pegmatites: an assessment of current concepts and directions for the future. *Lithos*, 80, 281-303.

London, D. (2008). Pegmatites. *The Canadian Mineralogist – Special Publication 10*. Canada.

Loranz, W., Gwosdz, W. Manual para la evaluación geológica-técnica de recursos minerales de construcción – *Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte Reihe H, Heft SH 17*, Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Lotze, F. (1945). Zur gliederung der Varisciden der Iberischen Meseta. *Geotech. Forsch.* 6: 78–92.

Luz, A. B. e Braz E. (2000). Quartzo - Série Rochas e Minerais Industriais, nº 2. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ, 5-6.

Luz, A. B., Lins, F. A. F., Piquet, B., Costa, M. J., Coelho, M. J. (2003). Pegmatitos do Nordeste: Diagnóstico sobre o Aproveitamento Racional e Integrado - Série Rochas e Minerais Industriais, nº 9. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ, 79.

MacLellan, H.E. & Trembath, L.T. (1991). The role of quartz crystallization in the development and preservation of igneous texture in granitic rocks: Experimental evidence at 1 kbar. *Am. Mineral.*, 76, 1291-1305.

Markl, G. (2004). *Minerale und Gesteine - Eigenschaften - Bildung - Entstehung* Elsevier, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Martins, J., Medeiros, A., Mesquita, L., Peres, A., Pilar, L. (1964). Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000 – Noticia explicativa da folha 21-A Sabugal. Direcção-Geral de Minas e serviços geológicos, Serviços geológicos de Portugal.

Morgan, G.B. & London, D. (1999). Crystallization of the Little Three layered pegmatite-aplite dike, Ramona District, California. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 136, 310-330.

Nabelek, P.I., Russ-Nabelek, C., Denison, J.R. (1992a). The generation and crystallization conditions of the Proterozoic Harney Peak Leucogranite, Black Hills, South Dakota, USA: Petrologic and geochemical constraints. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110, 173-191.

Nabelek, P.I., Russ-Nabelek, C., Haeussler, G.T. (1992b). Stable isotope evidence for the petrogenesis and fluid evolution in the Proterozoic Harney Peak leucogranite, Black Hills, South Dakota. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56, 403-417.

Okrusch, M., Matthes, S. (1995). *Mineralogie - Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo.

Rockhold, J., Nabelek, P., Glascock, M. (1989). Origin of rhythmic layering in the Calamity Peak satellite pluton of the Harney Peak Granite, South Dakota: the role of boron. *Geochim. et Cosmochim. Acta*.

Roda-Robles E., Mateus S., Vieira R., Martins T., Vide R. and Lima A. (2008) Phosphate mineral associations in the seixeira pegmatite (Bendada, Sabugal, Guarda, Portugal): preliminary results. Livro de Resumos do IX Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 39.

Rykart, R. (1995). *Quarz-Monographie - Die Eigenheiten von Bergkristall, Rauchquarz, Amethyst, Chalcedon, Achat, Opal und anderen Varietäten*. Ott Verlag Thun, 2nd. Edition.

Simmons, Wm.B., Webber, K. L. (2007). *Pegmatite Genesis: State of the Art*. Department of Earth and Environmental Sciences, University of New Orleans, LA, USA.

Sirbescu, M.-L. & Nabelek, P. (2003a). Crustal melts below 400°C. *Geology*, 31, 685-688.

Sirbescu, M.-L. & Nabelek, P. (2003b). Crystallization conditions and evolution of magmatic fluids in the Harney Peak Granites and associated pegmatites, Black Hills, South Dakota – evidence from fluid inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, 2443-2465.

Skinner, B. J., Porter, S. C. (1987). *Physical Geology* John Wiley & Sons, New York.

Sousa, M. (1982). *Litostratigrafia e estrutura do complexo xistograuváquio ante-ordovício : grupo do Douro (Nordeste de Portugal): estudo no sector geográfico de Pinhão S. João da Pesqueira Tabuaço-Paredes da Beira*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de doutor na Universidade de Coimbra. Centro de Geociências da Universidade. Coimbra.

Suse, M., Martins, T., Vieira, R., Velho, J., Vide, R., Lima, A. (2008) Freches Quartz Deposit interpreted as very low evolved Granitic Pegmatite (Northern Portugal): preliminary results. 18th Annual V M Goldschmidt Conference, Vancouver, Canada *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 12, A918

Swanson, S.E. & Fenn, P.M. (1986). Quartz crystallization in igneous rocks. *Am. Mineral.*, 71, 331-342.

Teixeira, C., Brito de Carvalho, L., Santos, J., Peres, A., Barros, R. (1967). *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000 – Noticia explicativa da folha 17-D Gouveia*. Direcção-Geral de Minas e serviços geológicos, Serviços geológicos de Portugal.

Teixeira, C., Martins, J., Medeiros, A., Mesquita, L., Peres, A., Pilar, L. (1965). Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000 – Noticia explicativa da folha 21-A Sabugal. Direcção-Geral de Minas e serviços geológicos, Serviços geológicos de Portugal, 25.

Teixeira, C., Medeiros, A., Pilar, L., Carvalhosa, A., Ferro, M. (1963). Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000 – Noticia explicativa da folha 18-A Vila Franca das Naves. Direcção-Geral de Minas e serviços geológicos, Serviços geológicos de Portugal.

Teixeira, C., Santos, J., Teixeira Lopes, J., Pilar, L., Pereira, V. (1972). Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000 – Noticia explicativa da folha 14-D Aguiar da beira. Direcção-Geral de Minas e serviços geológicos, Serviços geológicos de Portugal.

Thomas, R. (2002). Determination of the H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> concentration in fluid and melt inclusions in granite pegmatites by laser Raman microprobe spectroscopy. *Am. Mineral.*, 87, 56-68.

Thomas, R., Forster, H., Rickers, K., Webster, J.D. (2005). Formation of extremely F-rich hydrous melt fractions and hydrothermal fluids during differentiation of highly evolved tingranite magmas: a melt/fluid-inclusion study. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148, 582-601.

Thomas, R., Webster, J. D., Davidson, P. (2006a). Understanding pegmatite formation: the melt and fluid inclusion approach. In "Melt inclusions in plutonic rocks", J.D. Webster, ed. *Mineral. Assoc. Can. Short Course*, 36, 189-210.

Thomas, R., Webster, J.D., Rhede, D., Siefert, W., Förster, H.-J., Heinrich, W., Davidson, P. (2006b). The transition from peraluminous to peralkaline granitic melts: Evidence from melt inclusions and accessory minerals. *Lithos*, 91, 137-149.

Torres, J., Soto, E. (2004). *Geología de España*. Instituto Geologico y Minero de España, Madrid

Veksler, I.V. & Thomas, R. (2002). An experimental study of B-, P- and F-rich synthetic granite pegmatite at 0.1 and 0.2 GPa. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143, 673-683.

Velho, J., Gomes, C., Romariz, C. (1998). *Minerais industriais, Geologia, Propriedades, Tratamentos, Aplicações, Especificações, Produções e Mercados, Gráfica de Coimbra.*

Webber, K. L., Falster, A.U., Simmons, W.B., Foord, E.E. (1997). The role of diffusion-controlled oscillatory nucleation in the formation of line rock in pegmatite-aplite dikes. *J. Petrol.*, 38, 1777-1791.

Webber, K. L., Simmons, Wm.B., Falster, A.U., Foord, E.E. (1999). Cooling rates and crystallization dynamics of shallow level pegmatite-aplite dikes, San Diego Country, California. *Am. Mineral.*, 84, 708-717.

Webster, J.D., Thomas, R., Rhede, D., Förster, H-J., Seltmann, R. (1997). Melt inclusions in quartz from an evolved peraluminous pegmatite: geochemical evidence for strong tin enrichment in fluorine-rich and phosphorous-rich residual liquids. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 61, 2589-2604.

Wenk, H. R., Bulakh, A. (2003). *Minerals - Their Constitution and Origin* Cambridge University Press, Cambridge.

### **Bibliografia electrónica**

Atlas do Ambiente Digital – Instituto do Ambiente (2008). <http://www.iambiente.pt/>  
Acedido em Março de 2008.

Barbosa, M.I.M, Porphirio, N.H. (2007). Caracterização Tecnológica de Lascas de quartzo, Série tecnologia Mineral, CETEM, 69, <http://cetem.gov.br/>. Acedido em Dezembro de 2007.

Biomania (2007). Quartzo, Bioquímica. <http://biomania.com.br/>. Acedido em Dezembro de 2007.

Brasiliavirtual (2008). Cuarzo. <http://brasiliavirtual.info/>. Acedido em Janeiro de 2008.

Ciência viva (2008). <http://www.cienciaviva.pt/>. Acedido em Setembro de 2008

Girafamania (2007). Cuarzo - <http://www.girafamania.com.br/>. Acedido em Dezembro de 2007.

Mapas (2008). Viajar – Clix <http://viajar.clix.pt/>. Acedido em Agosto de 2008

Mindat (2008). <http://www.mindat.org/>. Acedido em Dezembro de 2007.

Museo de Mineralogía de la Universidad Autónoma de Madrid (2008). Cuarzo - <http://www.uam.es/>. Acedido em Janeiro de 2008.

Servidor Web de Minerales (2008). Explorador de minerales – Cuarzo - <http://greco.fmc.cie.uva.es/>. Acedido em Fevereiro de 2008.

The quartz page (2008). <http://www.quartzpage.de/>. Acedido em Janeiro de 2008.

Wikipedia (2007). Variedades de quartzo - <http://pt.wikipedia.org>. Acedido em Dezembro de 2007.