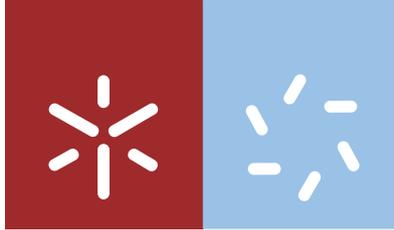


Universidade do Minho
Escola de Ciências

Francisco Daniel Ribeiro Guimarães

**Discriminação composicional de turmalinas
pegmatíticas da Serra d'Arga. Ponte de Lima
- Caminha - Vila Nova de Cerveira, Norte de
Portugal**



Universidade do Minho

Escola de Ciências

Francisco Daniel Ribeiro Guimarães

**Discriminação composicional de turmalinas
pegmatíticas da Serra d'Arga. Ponte de Lima
- Caminha - Vila Nova de Cerveira, Norte de
Portugal**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Ordenamento e Valorização de Recursos Geológicos

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Dr. Carlos Augusto Alves Leal Gomes

Declaração

Nome: Francisco Daniel Ribeiro Guimarães

Endereço Eletrónico: chico_guima@hotmail.com

Número do cartão de cidadão: 132538067zz5

Título da Dissertação: Discriminação composicional de turmalinas pegmatíticas da Serra d'Arga.
Ponte de Lima – Caminha – Vila Nova de Cerveira, Norte de Portugal

Orientador: Professor Dr. Carlos Augusto Alves Leal Gomes

Ano conclusão: Janeiro.2015

Designação do Mestrado: Mestrado em Ordenamento e Valorização de Recursos Geológicos

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, 30/01/2015

Assinatura: _____

Agradecimentos

A concretização desta dissertação só foi possível com o contributo de um conjunto de pessoas, as quais quero apresentar os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao professor Carlos Augusto Alves Leal Gomes, agradeço a sugestão e orientação no desenvolvimento do tema apresentado, bem como pelos conhecimentos transmitidos ao longo do meu percurso académico enquanto seu aluno.

Ao Dr. Saúl Sendas agradeço a paciência, apoio e ajuda na preparação das lâminas delgadas e polidas, úteis na interpretação petrogenética. Bem como pelo afável companheirismo demonstrado durante esse processo analítico.

Ao Dr. António Azevedo técnico responsável pelo Laboratório de Difração de Raios-X da Universidade do Minho, agradeço a obtenção dos dados de difração Raio-X bem como pela atenção e disponibilidade em vários momentos do estudo.

À Dra. Elsa Ribeiro agradeço a colaboração e disponibilidade para a obtenção das análises de Microscopia Eletrónica, bem como pela prontidão e profissionalismo com que encarou as mesmas.

À Eng^a Fernanda Guimarães do Laboratório de Microsonda Eletrónica do LNEG, agradeço a disponibilidade para a realização das análises pontuais mesmo quando as condições operacionais/ técnicas eram adversas.

Agradeço à Patrícia Dias e Raquel Alves pelo interesse neste estudo, bem como pela disponibilidade e material bibliográfico cedido.

À minha namorada Carina Machado, que muitas das vezes abdicou da minha atenção, agradeço a sua sempre presente companhia, ajuda e carinho ao longo e principalmente na conclusão desta dissertação. Agradeço ainda as palavras de conforto e motivação e a paciência e compreensão nos momentos mais difíceis.

À Juliana Ferreira, ao Márcio Pereira e ao Pedro Araújo, agradeço a companhia ao longo da minha passagem pelo mundo universitário, os momentos de brincadeira e os momentos de trabalho e partilha de conhecimento. Agradeço principalmente a disponibilidade, motivação e ajuda durante a conclusão desta dissertação.

Aos meus pais e a minha irmã Rosália agradeço pela educação enquanto ser humano, pela instrução dos valores que defendo e claro pelo apoio incondicional económico e emocional que possibilitaram ao longo da minha caminhada académica.

Agradeço ainda ao Márcio Neves, Henrique Pereira, Joel Alves e a todos os meus amigos e colegas, pela tolerância da minha ausência, pelo apoio e motivação e principalmente pela distração nos momentos mais difíceis.

Finalmente um agradecimento póstumo á minha avó e madrinha por tudo aquilo que fez por mim.

Muito obrigado a todos!

Discriminação composicional de turmalinas pegmatíticas da Serra d'Arga. Ponte de Lima –
Caminha – Vila Nova de Cerveira, Norte de Portugal

Resumo

No Campo Aplito-Pegmatítico da Serra de Arga ocorrem diversos corpos da família LCT - classe de elementos raros, pertencentes ao enxame “s///” e aos filões pegmatíticos paroxismais, que se destacam por serem ocasionalmente enriquecidos em turmalinas com colorações e hábitos cristalinos variados. O atual estudo pretende, através da análise petrogenética, cromática e mineraloquímica caracterizar as diferentes ocorrências da turmalina, bem como estabelecer a evolução composicional destas ao longo dos corpos portadores.

As turmalinas coloridas estudadas provenientes dos corpos da Balouca, do Lousado e do Formigoso apresentam numerosos modos de ocorrência que definem as unidades portadoras de turmalina. Foram identificadas turmalinas nas unidades de bordadura, turmalinas em crescimento “comb” e nodulares nas unidades intermédias e turmalinas disseminadas em lepidolite nas unidades nucleares e mais tardias desses corpos. O estudo cromático caracterizou cerca de 100 cores diferentes, expressas na sua maioria pelos tons verde a verde azulado escuro. Os tons róseos e azuis são também significativos, podendo ainda observar-se cristais castanhos, amarelos, incolores e mesmo cristais zonados.

Através da análise em microsonda eletrónica de um conjunto selecionado destas turmalinas coloridas, definiu-se que composicionalmente predominam as F-elbaïtes e as elbaïtes, ocorrendo também schorl, olenite, lidicoatite e de forma mais esporádica rossmanite e foitite. A fracionamento pegmatítica das turmalinas é marcada pela substituição elbaítica: $2\text{Fe}^{2+}(\text{Y}) \rightarrow \text{Al}^{3+}(\text{Y}) + \text{Li}^+(\text{Y})$, desde a schorl dos contactos até às composições elbaíticas verdes e azuis intermédias a nucleares e terminando com a substituição lidicoatítica: $\text{Na}^+(\text{Y}) + \text{Fe}^{2+}(\text{Y}) \rightarrow \text{Ca}^{2+}(\text{X}) + \text{Li}^+(\text{Y})$, que se esboça em análises pontuais dos cristais róseos ricos em Ca do Lousado. Assim, as turmalinas dos pegmatitos LCT da Serra de Arga exibem uma tendência evolutiva que culmina com o enriquecimento em Li e em Ca, semelhante ao que acontece em outros contextos orogénicos com pegmatitos LCT, muito evoluídos.

**Compositional discrimination of Serra d'Arga pegmatitic tourmalines. Ponte de Lima – Caminha
– Vila Nova de Cerveira, Northern Portugal**

Abstract

In Serra de Arga aplitic-pegmatite field occurs several bodies of the rare-element class of LCT family. They belong to the sill swarm and paroxysmal pegmatitic dykes which stand out for being occasionally enriched in tourmaline with a varying colorations and crystalline habits. The current study aims to use a petrogenetic, chromatic and chemical analysis to characterize the different occurrences of tourmaline, as well as to establish their compositional evolution along the bearing bodies.

The study of colored tourmalines from the Balouca, Lousado and Formigoso bodies have several types of occurrence that define the bearing units. Tourmalines were identified in the border units, in the intermediate units with “comb” growth or nodular shape and disseminated in lepidolite of latest nuclear units of these bodies. The chromatic study described 100 different colors, expressed mostly by green to dark bluish green tones. The pinkish and blues tones are significant too and can also be observed brown, yellow, colourless and even zoned crystals.

The microprobe analysis of a selected coloured tourmalines revealed that compositionally stand out the F – elbaite and the elbaite, also occurring schorl, olenite, liddicoatite and more sporadic rossmanite and foitite. The pegmatitic fractionation of tourmalines is marked by elbaitic substitution: $2\text{Fe}^{2+}(\text{Y}) \rightarrow \text{Al}^{3+}(\text{Y}) + \text{Li}^+(\text{Y})$, since schorl of the contacts assemblages to intermediate – nuclear elbaitic compositions and with the liddicoatitic substitution: $\text{Na}^+(\text{X}) + \text{Fe}^{2+}(\text{Y}) \rightarrow \text{Ca}^{2+}(\text{X}) + \text{Li}^+(\text{Y})$, reflected by Ca-rich pinkish crystals from Lousado. Thus, the tourmalines of the Serra d'Arga LCT pegmatites exhibit an evolutionary trend culminated in Li and Ca enrichment which is similar to what happens in other much evolved LCT pegmatites from another orogenic contexts.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	III
Resumo	V
<i>Abstract</i>	VII
Índice Geral	IX
Lista de Abreviaturas	XIII
Índice de Tabelas	XV
Índice de Figuras	XVII

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

I.1. Turmalinas como indicadores petrogenéticos	1
I.2. Aproveitamento gemológico e ornamental	4
I.3. Objetivos da dissertação	4
I.4. Contextualização do Campo Aplito-Pegmatítico Serra de Arga	5
I.4.1. Província Aplito-Pegmatítica Hercínica	6
I.4.2. Cintura Aplito-Pegmatítica da Zona Centro Ibérica	7
I.4.3. Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	8
I.5. Caracterização do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	8
I.5.1. Enquadramento geológico	9
I.5.2. Caracterização do campo Aplito-pegmatítico	12
I.5.2.1. Zonamento do campo baseado na deformação dúctil	13
I.5.2.2. Estruturas dúctil-frágeis auxiliares da instalação do campo	15
I.5.2.3. Distinção dos enxames aplito-pegmatíticos	17
I.6. Campos aplito-pegmatíticos portadores de turmalinas coloridas	20
I.7. Relações genéticas das assinaturas LCT com linhagens graníticas de duas micas peraluminosas (granitos “sintectónicos”)	21
I.8. Relação entre especialização LCT dos pegmatitos e a presença de turmalinas coloridas	25
I.9. Campos pegmatíticos LCT portugueses	26
I.10. Mineraloquímica e tipologia conceptual das turmalinas coloridas	29
I.10.1. Mineraloquímica	29

I.10.2. Tipologia conceptual das turmalinas coloridas	30
I.11. Amostragens e localização paragenética das turmalinas coloridas	35
I.12. Metodologias adotadas na caracterização das turmalinas coloridas	36

CAPÍTULO II – MODOS DE OCORRÊNCIA

II.1. Tipologia paragenética dos pegmatitos turmalínicos e a sua classificação	39
II.2. Unidades portadoras de turmalinas na estrutura interna dos pegmatitos	40
II.2.1. Unidades de equilíbrio com a rocha encaixante	40
II.2.2. Unidades primárias de bordadura	41
II.2.3. Unidades intermédias primárias	41
II.2.4. Unidades nucleares miarolíticas ou não	43
II.2.5. Frentes turmalínicas fracionais	46
II.2.6. Unidades de substituição	46
II.2.7. Preenchimentos turmalínicos venulares ou brechoides	47
II.2.8. Unidades do corpo do Formigoso	47
II.2.9. Unidades portadoras dos restantes corpos	48

CAPÍTULO III – COLORAÇÃO

III.1. Conceitos essenciais para cromatização turmalínica	51
III.2. Elementos cromóforos e “ <i>colour centers</i> ” – centros de cor	53
III.3. Diversidade cromática das turmalinas estudadas (aplicação do sistema de referência cromática de Munsell)	55
III.3.1. Diversidade cromática	58
III.4. Diafaneidade	63
III.5. Grau de prevalência dos tipos cromáticos	65
III.5.1. Negro	65
III.5.2. Verde e Verde Azulado	66
III.5.3. Azul	67
III.5.4. róseo	68
III.5.5. Outras cores	69

III.5.6. Incolor	70
III.5.7. Bicolor	71
III.6. Seleção de tipos cromáticos para estudo mineroquímico	71
CAPÍTULO IV – COMPOSIÇÃO QUÍMICA	
IV.1. Quadro composicional das turmalinas coloridas	73
IV.2. Tipos mineroquímicos principais	82
IV.3. Tendências de substituição isoestrutural	85
IV.4. Tendências de evolução geoquímica interna dos corpos pegmatíticos deduzidos da composição do marcador turmalina	90
IV.5. Tendências gerais da evolução geoquímica das turmalinas nos sistemas pegmatíticos LCT do N de Portugal	94
IV.6. Comparação da mineroquímica das turmalinas LCT da Província Varisca com as de outros enquadramentos geotectónicos	95
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	
V.1. Aspectos essenciais das composições das turmalinas pegmatíticas LCT da Serra de Arga	99
V.1.1. <i>Schorl</i>	99
V.1.2. Dravite	100
V.1.3. Elbaite	100
V.1.4. Lidicoatite	101
V.1.5. Olenite, Rossmanite	102
V.2. Substituições cristal químicas e tendências de evolução composicional em sistemas pegmatíticos delimitados	103
V.3. Tipos paragenéticos de turmalinas (minerais tipomórficos associados)	104
V.4. Valor intrínseco das turmalinas portuguesas e utilidades prospetivas	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

LISTA DE ABREVIATURAS

DRX	—————	Difracção de Raios-X
IMAC-CNMNC	—————	International Mineralogical Association Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification
MEV-ER	—————	Microscópio eletrónico de varrimento em modo de eletrões retrodifundidos
MOLR	—————	Microscópio Ótico de Luz Refletida
MOLT	—————	Microscópio Ótico de Luz Transmitida
MSE	—————	Microssonda Eletrónica
REL	—————	Classe de elementos raros
UMC	—————	Unidade do Minho central

ÍNDICE DE TABELAS

1.I – Natureza admitida para as litologias metassedimentares do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	11
2.I – Caracterização mineralógica e tipologia composicional dos aplito-pegmatitos do Campo Aplito-Pegmatitico de Arga	17
3.I – Composições, mineralizações, características e posição das diferentes fácies presentes no enxame “ <i>sill</i> ”	19
4.I – Classificação dos pegmatíticos em relação à profundidade de instalação	22
5.I – Classificação geológica, paragenética e geoquímica por classes dos pegmatíticos graníticos	23
6.I – Classificação petrogenética por famílias dos pegmatíticos graníticos	24
7.I - Subdivisões da família LCT	24
8.I – Descrição dos campos pegmatíticos LCT portugueses	27
9.I – Fórmulas estruturais para os tipos mineroquímicos de turmalinas reconhecidas pelo IMA-CNMNC	30
10.I – Caracterização das turmalinas pegmatíticas, consoante as associações mineralógicas em que ocorrem e as posições ocupadas nas estruturas internas dos corpos portadores	35
11.I – Descrição da catalogação das amostras recolhidas	36
12.I – Quadro síntese das metodologias utilizadas ao longo do estudo	38
13.III – Possíveis cromóforos e mecanismos intervenientes na cromatização das turmalinas coloridas	54
14.III – Caraterização dos graus de diafaneidade	63
15.IV – Composições de turmalinas do corpo do Lousado (análises em microsonda eletrónica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH,F)	75
16.IV – Composições de turmalinas do corpo do Lousado (análises em microsonda eletrónica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH,F)	76
17.IV – Composições de turmalinas do corpo do Formigoso (análises em microsonda eletrónica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH,F)	77
18.IV – Composições de turmalinas do corpo da Balouca Sul (análises em microsonda eletrónica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH,F)	78

19.IV – Composições de turmalinas do corpo da Balouca Sul (análises em microsonda eletrônica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH,F)	79
20.IV – Composições de turmalinas do corpo da Balouca Norte (análises em microsonda eletrônica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH,F)	80
21.IV – Composições de turmalinas das outras ocorrências estudadas (análises em microsonda eletrônica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH, F).	81
22.IV – Classificações obtidas por DRX de 28 pós de turmalinas dos corpos em estudo	84
23.IV – Quadro-síntese das relações entre as paragêneses e composições das turmalinas	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diagramas de estabilidade de P-T para turmalinas com várias composições	2
Figura 2 – Figura-síntese dos dados de isótopos de B em turmalinas de diferentes rochas hospedeiras e com diferentes fontes de boro (deduzidas)	3
Figura 3 – Localização dos índices mineiros do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	5
Figura 4 – Distribuição dos campos pegmatíticos no setor português da província Hercínica	7
Figura 5 – Enquadramento geográfico da área em estudo, representativa do Campo Aplito-Pegmatítico da Serra de Arga	9
Figura 6 – Enquadramento geológico da área em estudo do Campo Aplito-Pegmatítico da Serra de Arga	10
Figura 7 – Divisão do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga pelos setores de ocorrência dos aplito-pegmatitos estruturalmente diferenciados	13
Figura 8 – Adaptação dos modelos de implantação filoniana de Philips (1972;1974) e Brisbin (1986) à tipologia morfológica dos aplito-pegmatitos do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga e a relação com a evolução do maciço de Arga	15
Figura 9 – Estruturas megaescalares definidas em dúctil-frágil, no Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	16
Figura 10 – Exemplos representativos da diversidade de turmalinas coloridas	32
Figura 11 – Exemplos representativos da diversidade de turmalinas coloridas	33
Figura 12 – Exemplos representativos da diversidade de turmalinas coloridas	34
Figura 13 – Principais aspetos texturais e paragenéticos das turmalinas	42
Figura 14 – Principais aspetos texturais e paragenéticos das turmalinas	45
Figura 15 – Principais aspetos texturais e paragenéticos das turmalinas	49
Figura 16 – Esquema aproximado da fracionamento das turmalinas coloridas	50
Figura 17 – A: Enquadramento da luz visível, no espectro eletromagnético; B: Representação esquemática dos diferentes comportamentos da luz quando encontra um mineral transparente	51
Figura 18 – Exemplares de turmalinas com talhe em cabochão destacando o efeito olho-de-gato	52

Figura 19 – Diversidade cromática das turmalinas coloridas do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	56
Figura 20 - Diversidade cromática das turmalinas coloridas do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	57
Figura 21 – Sistema Colorimétrico de Munsell. A: Representação das três dimensões que definem os índices de Munsell; B: Representação do sólido deformado correspondente ao Espaço Colorimétrico de Munsell.	58
Figura 22 – Representação esquemática da distribuição das amostras caracterizadas pelas respectivas matrizes de Munsell	59
Figura 23 – Representação dos índices de Munsell referentes aos tons verdes, identificados nas amostras analisadas	59
Figura 24 – Representação dos índices de Munsell referentes aos tons azuis, identificados nas amostras analisadas	60
Figura 25 – Representação dos índices de Munsell referentes aos tons róseos, identificados nas amostras analisadas	60
Figura 26 – Representação dos índices de Munsell referentes aos tons amarelos, identificados nas amostras analisadas	61
Figura 27 – Representação da escala luminosa com indicação do croma correspondente às amostras negras estudadas	61
Figura 28 – Representação diagramática da distribuição dos índices obtidos nas amostras pela luminosidade	62
Figura 29 – Representação diagramática da distribuição dos índices obtidos nas amostras pelo croma	62
Figura 30 – Distribuição das amostras analisadas, pelo grau diafaneidade	64
Figura 31 – Representação dos diferentes graus de diafaneidade identificados nas amostras em estudo. A: Cristal róseo transparente; B: Cristal bicolor translúcido; C: Turmalina verde escura opaca	64
Figura 32 – Distribuição das amostras estudadas pela cor que possuem	65
Figura 33 – Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina negra no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	66
Figura 34 – Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina verde no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	67

Figura 35 – Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina azul no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	68
Figura 36 – Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina rósea no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	69
Figura 37 – Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina amarela no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	69
Figura 38 – Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina incolor no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	70
Figura 39 – Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina bicolor no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	71
Figura 40 – Composições das turmalinas pegmatíticas em estudo, projetadas no diagrama ternário Ca- Na+K -X□, representativo da ocupação dominante no sítio X estrutural.	82
Figura 41 – Classificação das turmalinas estudadas do Lousado, Verdes, Paiol e Lourinhal através da projecção no diagrama X□/(Na+X□) sobre YMg/Y(Mg + Fe)	83
Figura 42 – Classificação das turmalinas estudadas do Lousado, Balouca e Formigoso, através do diagrama XCa/X(Ca+Na) sobre YAl/Y(Al+Fe), destacando o predomínio das elbaïtes	84
Figura 43 – Diagramas de variação composicional das turmalinas coloridas	86
Figura 44 – Diagramas de variação composicional das turmalinas coloridas	87
Figura 45 – Diagramas de variação composicional das turmalinas coloridas	88
Figura 46 – Diagramas de variações composicional de cristais zonados de turmalinas do Lousado e Balouca, com representação das tendências de fracionamento	89
Figura 47 – Projecção das composições das turmalinas em estudo no diagrama Al-Fe-Mg de Henry e Guidotti (1985) para turmalinas de diferentes tipos rochosos	91
Figura 48 – Projecção das composições das turmalinas em estudo no diagrama Ca-Fe-Mg de Henry e Guidotti (1985) para turmalinas de diferentes tipos rochosos	92
Figura 49 – Diagramas de variação composicional das turmalinas coloridas em estudo, indicando as tendências gerais de fracionamento destas nos corpos do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga	95

Figura 50 – Diagramas de variação composicional (apfu) das turmalinas pegmatíticas	96
Figura 51 – Representação esquemática da fracionamento composicional dos aplito-pegmatitos LCT de Arga	104
Figura 52 – Resultados do ensaio gemológico por talhe em cabochão e lapidação	106

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Na área envolvente da Serra de Arga, Norte de Portugal ocorre um extenso e mineralogicamente diversificado campo aplito-pegmatítico relacionado com os eventos termo-tectónicos D2 - D3 Variscos e a intrusão e evolução dos maciços graníticos de Arga e Stº. Ovídeo, essencialmente (Leal Gomes, 1994). Entre os corpos pegmatóides (aplitos, pegmatitos e aplito-pegmatitos) ocorrentes, a complexidade composicional e estrutural da família LCT-classe de elementos raros de Černý (1991a), manifesta-se através de paragénese altamente evoluídas e diversificadas do ponto de vista mineralógico. A ocorrência de turmalina destaca-se, quer pela elevada quantidade com que ocorre em alguns corpos, quer pelas características cromáticas e composicionais que apresenta, constituindo um bom marcador dos processos envolvidos na evolução do campo pegmatítico. Dada a diversidade cromática e a transparência de alguns espécimes é também de equacionar a aplicação nobre de algumas turmalinas como minerais ornamentais ou eventualmente como gemas.

I.1. Turmalinas como indicadores petrogenéticos

As turmalinas são consideradas um ótimo indicador das condições de formação do ambiente hospedeiro, devido ao seu campo de estabilidades de pressão e temperatura (P-T) muito amplo. Além disso a sua estrutura cristalina pode admitir vários elementos traço que refletem a distribuição pelos diferentes domínios da génese das rochas onde ocorrem (Henry e Guidotti, 1985).

A estabilidade das turmalinas em termos de pressão e temperatura é esquematizada na figura 1, onde se destaca a grande persistência destas ao longo dos vários ambientes geológicos. Os limites inferiores ainda não estão bem definidos, mas a existência de turmalinas nas zonas de diagénese das bacias sedimentares e em depósitos hidrotermais sub-superficiais comprova a estabilidade destas a pelo menos 150° C e 100MPa (Henry *et al.*, 1999). No sentido oposto dos domínios de P-T, os limites máximos foram obtidos em metapelitos da cintura metamórfica Ryoke

no Japão, onde a isógrada da turmalina é cerca de 725°C e 450 MPa (Kawakami, 2001), mas estudos experimentais colocam o limite superior da temperatura perto dos 950°C, dependendo da composição e pressão. Krosse (1995) citado por Hinsberg, Henry e Marschall, (2011) indica que a turmalina rica em Mg pode ser estável até pressões de 6GPa.

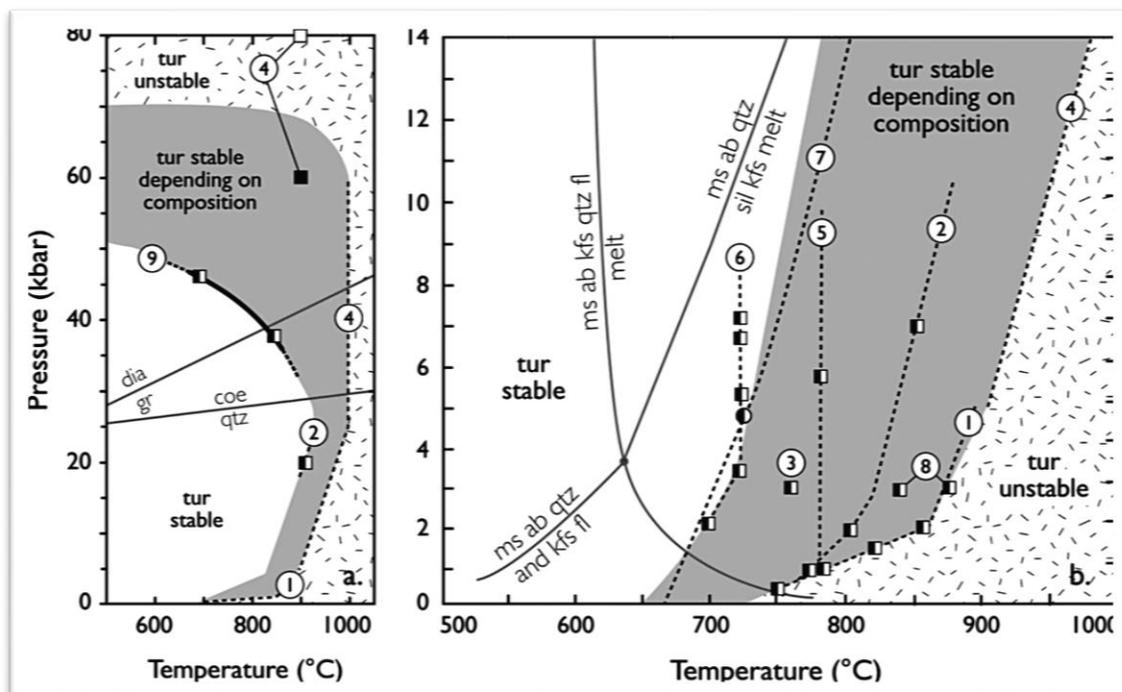


Figura 1 - Diagramas de estabilidade de P-T para turmalinas com várias composições, retirado de Hinsberg, et al. (2011).

Devido a tão ampla estabilidade, as turmalinas podem ocorrer como um acessório comum, sendo recorrente a sua identificação em várias rochas e relacionadas com diversos ambientes geológicos (Ertl *et al.*, 2010; Hinsberg, *et al.*, 2011; Thomson, 2006).

No conjunto de elementos maioritários que podem acomodar-se nas estruturas cristalinas, alia-se ainda uma significativa diversidade de elementos traço que proporcionam a grande variação composicional observada neste grupo de minerais. Devido a uma reduzida taxa de difusão dos elementos de um local estrutural para outro, a estrutura cristalina das turmalinas preserva-as durante muito tempo, permitindo indiciar a evolução da composição da rocha hospedeira onde esta se formou (Hinsberg, *et al.*, 2011; Jolliff *et al.*, 1986).

Para a caracterização do meio hospedeiro das turmalinas e da sua gênese, tem vindo a ser aplicada a geoquímica isotópica, principalmente dos isótopos estáveis de B, H, O e das razões

¹ (a)- Diagrama geral representando altas pressões. (b)- Pormenor dos domínios de baixas pressões. Círculos representam os limites de amostras naturais e os quadrados representam dados experimentais. As linhas a tracejado correspondem às extrapolações realizadas pelos autores originais. As curvas com as reações de fusão saturada em H₂O e de transições metamórficas são apresentadas para referência. Dados de: 1) dravite: Robbins & Yoder (1962), 2) magnésio-foitite: Werding & Schreyer (1984), 3) schorl: Holtz & Johannes (1991), 4) dravite: Krosse (1995), 5) sistema Mg livre de Na: von Goerne et al. (1999), 6) Sistema Mg rico em Na: von Goerne et al. (1999), 7) turmalinas naturais: Kawakami (2001), 8) turmalinas naturais: Spicer et al. (2004), 9) dravite: Ota et al. (2008).

Rb-Sr e Nd-Sm (Henry e Dutrow, 1996; Jiang, 1998; Palmer e Swihart, 1996), fornecendo informações sobre o meio onde estas se formaram, através das variações isotópicas. Os isótopos do B são muito estudados, pois têm um alcance de 55‰ nos teores $\delta^{11}\text{B}$ em turmalinas, ao longo do qual variam em função da rocha hospedeira. Assim, como se observa na figura 2, turmalinas formadas em rochas de altas e muito altas pressões metamórficas apresentam-se enriquecidas em $\delta^{11}\text{B}$ (Hinsberg, *et al.*, 2011). Já as turmalinas cuja gênese se encontra relacionada com intrusões graníticas, mostram teores baixos de $\delta^{11}\text{B}$, geralmente semelhantes aos valores médios da crosta continental (-15‰ a +5‰) (Beurlen *et al.*, 2011). Parece existir, portanto, uma relação entre a tipologia das rochas hospedeiras e as composições das turmalinas, cuja composição isotópica indica a origem dos fluidos e magmas que atuaram na cristalização.

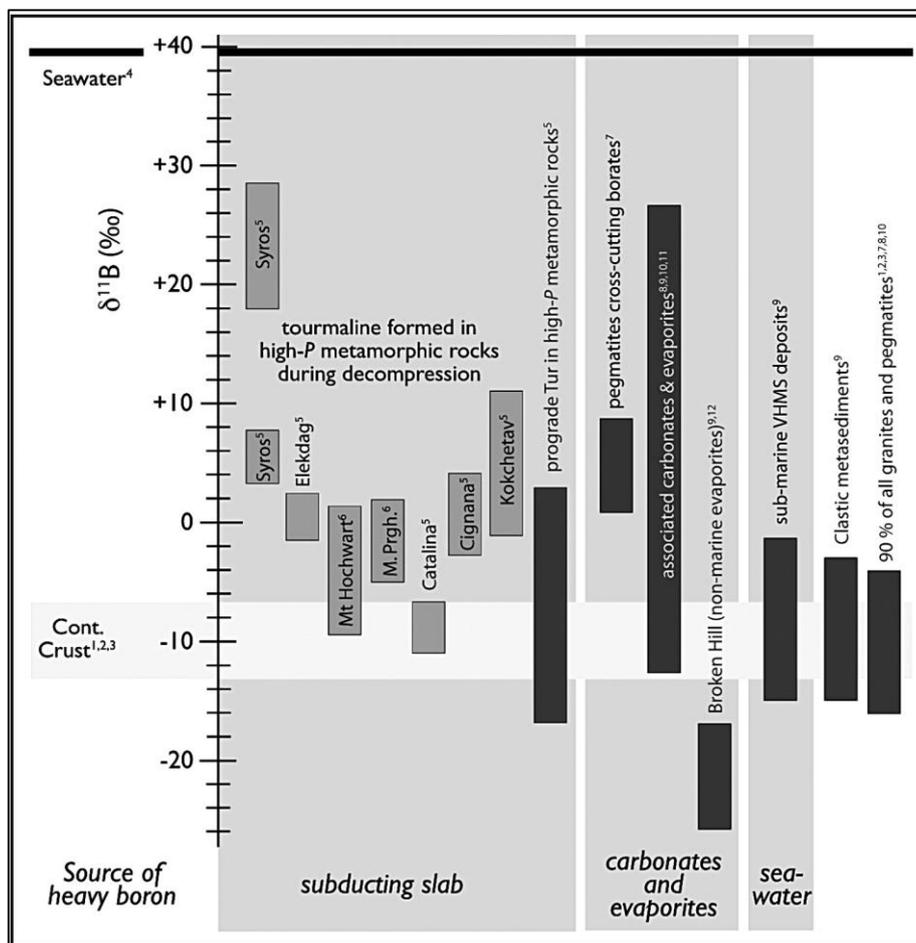


Figura 2 - Quadro-síntese dos dados de isótopos de B em turmalinas de diferentes rochas hospedeiras e com diferentes fontes de boro (deduzidas), retirado de Hinsberg, *et al.* (2011)².

² Referências para os dados das turmalinas: 1 Chaussidon & Albarède (1992), 2 Kasemann *et al.* (2000), 3 Marschall & Ludwig (2006), 4 Foster *et al.* (2010), 5 Marschall *et al.* (2009a), 6 Marocchi *et al.* (2011), 7 Jiang & Palmer (1998), 8 Swihart & Moore (1989), 9 Palmer & Slack (1989), 10 Trumbull *et al.* (2011), 11 Klemme *et al.* (2011), and 12 Xavier *et al.* (2008).

I.2. Aproveitamento gemológico e ornamental

Nem todas as turmalinas que são exploradas têm significância gemológica, dado que podem não preencher os requisitos qualitativos necessários para a valorização em joalheria após lapidação (cor e transparência). Na maioria das ocorrências os cristais são translúcidos a opacos ou possuem bastantes inclusões e fraturas. Não obstante, ainda nestes casos, são utilizadas como materiais ornamentais, para “carving” e cabochões, procurando valorizar principalmente a cor e as inclusões presentes (Presser de Souza, 2010).

Quando ocorre transparente, a turmalina é considerada uma gema ideal. Com uma dureza de 7 na escala de Mohs, clivagem insignificante do ponto de vista do talhe e fratura concoidal, é suficientemente dura e resistente para ser trabalhada e resistir ao uso e ao choque. A sua principal vantagem é a variedade de cores que pode apresentar, podendo virtualmente, exibir todas as cores do espectro visível, ou mesmo exibir mais do que uma cor paralela ou perpendicularmente ao eixo *c*. Finalmente, devido à sua complexa estrutura cristalina, é difícil sintetizar espécimes com qualidade gemológica em laboratório (O'Donoghue, 2006; Read, 2005).

Os principais depósitos de turmalinas são os pegmatitos e aluviões. Nos pegmatitos, a exploração é normalmente realizada em aproveitamento integrado, incluindo outros recursos que ocorrem em paragénese com as turmalinas, como minerais metálicos ou industriais. As turmalinas gema ocorrem em cavidades mirolíticas ou disseminadas em material alterado, das zonas intermédias e unidades de substituição dos pegmatitos zonados. Em aluviões, a exploração baseia-se na concentração hidrogravítica e sorteamento manual das gemas, que são geralmente sub-roladas a sub-angulares, muito transparentes e raramente apresentando fraturas (Dirlam *et al.*, 2002; Shigley *et al.*, 2010).

I.3. Objetivos da dissertação

No campo aplito-pegmatítico da Serra de Arga existem inúmeras minas e explorações artesanais de pequenas dimensões, que incidiram sobre os veios de quartzo e corpos aplito-pegmatíticos ou depósitos aluvionares (fig. 3), visando o aproveitamento de Au, Sn, Nb, Ta, W, Zn, andaluzite e feldspato (Leal Gomes, 1994).

Muitas destas jazidas correspondem também às ocorrências de turmalinas cromática e composicionalmente diversificadas.

A reconhecida diversidade cromática das turmalinas de Arga (Leal Gomes, 1994; 2005 e 2010b), carece no entanto de uma caracterização e classificação composicional abrangente assim como uma descrição da evolução destas ao longo da estruturação do campo pegmatítico e da petrogénese de corpos turmalínicos individuais. A existência desta lacuna permite definir os seguintes objetivos gerais da presente dissertação:

- ❖ Identificação e caracterização dos locais-chave onde ocorrem turmalinas coloridas;
- ❖ Discriminação paragenética e mineraloquímica das turmalinas de Arga;
- ❖ Estabelecimento de uma evolução composicional nas turmalinas ao nível do campo aplito-pegmatítico.

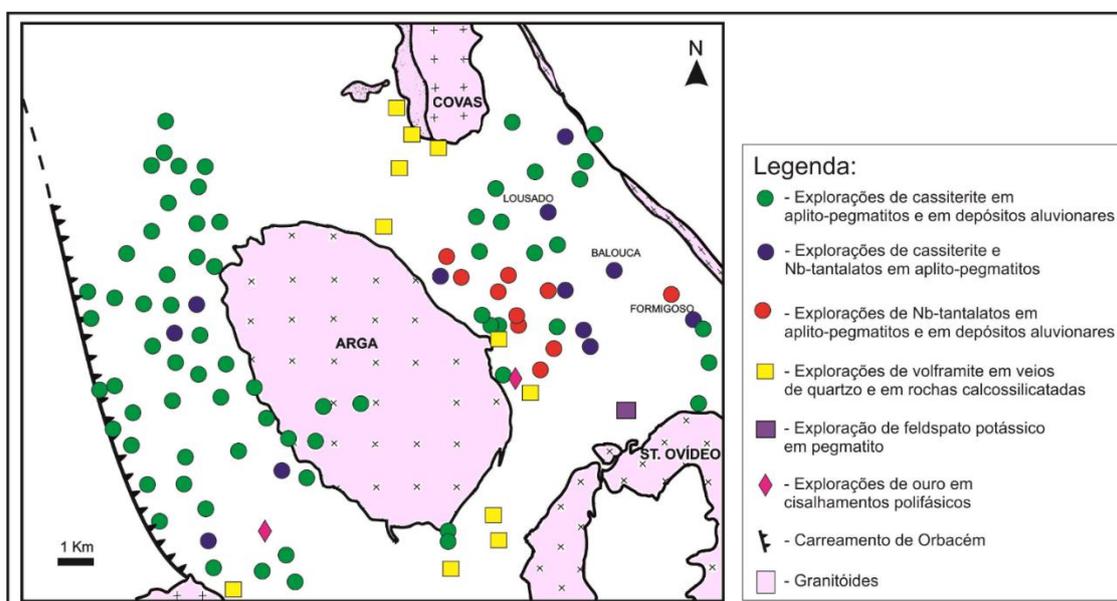


Figura 3 – Localização dos índices mineiros do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga, adaptado de Leal Gomes (1994)

I.4. Contextualização do Campo Aplito-Pegmatítico Serra de Arga

Os aplitos, pegmatitos e aplito-pegmatitos ocorrem dentro de um determinado contexto geológico, apresentando estruturas e relações mineraloquímicas distintas, mas que podem relacionar-se ao nível regional com outros corpos geneticamente semelhantes. Esta relação de similitude permite categorizar os corpos a vários níveis de organização espacial, partindo da unidade mais elementar, o corpo aplito-pegmatítico. O termo corpo aplito-pegmatítico é assumido

por Leal Gomes (1986) e retomado pelo mesmo (1994) como uma ampliação do termo corpo pegmatítico na distribuição regional de Černý (1982). A hierarquia proposta por Černý (1982) apresenta uma sistemática satisfatória bem como uma adequação dos conceitos ao nível do Campo Aplito-Pegmatítico da Serra de Arga adaptada em Leal Gomes (1994) e Leal Gomes & Lopes Nunes (2003) para caracterizar os vários níveis organizacionais dos corpos de Arga. Na presente dissertação será utilizada a hierarquia proposta por estes autores.

I.4.1. Província Aplito-Pegmatítica Hercínica

A unidade mais generalista definida por Leal Gomes (1994) é a Província Aplito-Pegmatítica Hercínica. Esta engloba dentro do domínio territorial quase todo o NW Peninsular, onde ocorrem corpos pegmatíticos e aplito-pegmatíticos relacionados com o metamorfismo e instalação dos granitoides correlacionáveis com a Orogenia Varisca (fig. 4). Černý (1982, 1991) considera que a definição de uma Província Pegmatítica é possível somente quando os campos pegmatíticos se encontram situados dentro da mesma província metalogénica e foram gerados durante o mesmo evento mineralizante ao longo de um período delimitado da evolução geológica. O mesmo autor (1982) propôs o intervalo temporal 300 a 250 Ma para os pegmatitos hercínicos da cintura Apalachiana nos E.U.A., para os Pirenéus e Maciço Central francês na Europa, deste modo e também de acordo com Leal Gomes (1994) os pegmatitos do NW da Península Ibérica correspondem a esta geração orogénica, se bem que este autor defende um ajuste no limite mais antigo do intervalo, de forma a incluir a evolução dos diferenciados gerados nos granitos férteis com instalação mais antiga que 300 Ma. Admitindo isto, a atribuição Província Aplito-Pegmatítica Hercínica é apropriada, uma vez que a instalação da maioria dos corpos pegmatíticos relaciona-se espacial e temporalmente com os granitoides gerados no intervalo de tempo definido para o Varisco (Leal Gomes, 1994).

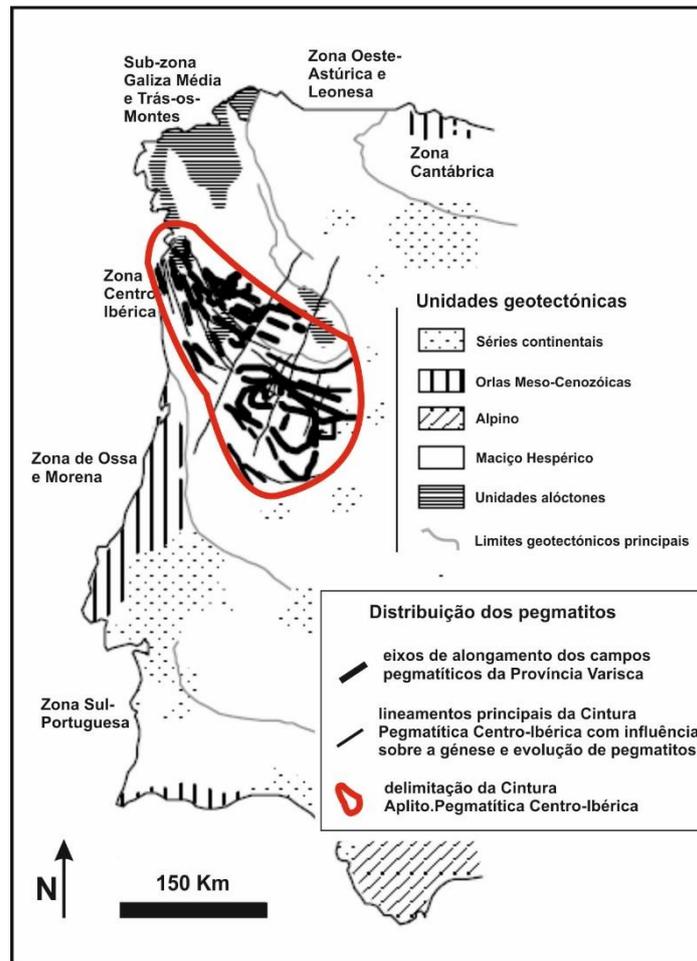


Figura 4 – Distribuição dos campos pegmatíticos no sector português da Província Pegmatítica Hercínica, adaptado de Leal Gomes e Lopes Nunes (2003)

I.4.2. Cintura Aplito-Pegmatítica da Zona Centro Ibérica

O nível organizacional seguinte na perspetiva de Černý (1991) denomina-se Cintura Pegmatítica e consiste no conjunto de campos pegmatíticos relacionados com um alinhamento estrutural em grande escala que de certa forma os controla e cuja história geológica é comum a ambos. Tendo em atenção esta definição, dentro da Província Aplito-Pegmatítica Hercínica, Leal Gomes (1994) destaca a Cintura Aplito-Pegmatítica da Zona Centro Ibérica. Esta subdivisão compreende os campos pegmatíticos cujo alinhamento é subconcordante ao alongamento dos maciços sintectónicos do Norte de Portugal e que por sua vez são maioritariamente subparalelos aos limites da Zona Centro-Ibérica, uma unidade tectono-estratigráfica definida por Lotze (1945) para o Maciço Hercínico Ibérico, sendo então admitida para delimitar espacialmente a extensão da Cintura (Leal Gomes, 1994).

I.4.3. Campo Aplito-Pegmatítico de Arga

Restringindo ainda mais as características discriminatórias, o nível hierárquico seguinte proposto por Černý (1982) é o Campo Pegmatítico. Este conceito engloba uma extensão territorial menor que 10000Km², na qual os corpos pegmatíticos apresentam o mesmo ambiente geológico e estrutural, tendo sido gerados durante a mesma fase tectonomagnética. Exibem por isso uma filiação no mesmo granitoide parental e idades muito próximas (Černý, 1991). O âmbito territorial deste termo pode, segundo Leal Gomes (1994), ser alargado aos corpos aplito e aplito-pegmatíticos, caso se considere que a filiação genética dos corpos num único plutonito se estenda para uma colocação estruturalmente condicionada por um único plutonito. Desta forma podem incluir-se no mesmo campo os corpos com génese nos mesmos diferenciados de um granitoide, como também os corpos de origem metamórfica e também corpos pegmatíticos filiados em plutonitos vizinhos, mas que na sua instalação foram condicionados estruturalmente por este. Assim, ao longo da Província Aplito-Pegmatítica Hercínica, é possível definir vários campos aplito-pegmatíticos, destacando-se o Campo Aplito-Pegmatítico de Arga alvo deste estudo, cujos corpos aplito-pegmatíticos do ponto de vista genético e estrutural se relacionam com a instalação do Granito de Arga (Leal Gomes, 1994; Leal Gomes e Lopes Nunes, 2003).

Além dos aplitos, aplito-pegmatitos e pegmatitos condicionados pela interação da deformação regional D3 (intra-Vestefaliana), com a instalação do diapiro de Arga (Leal Gomes e Lopes Nunes, 1990), o campo aplito-pegmatítico de Arga, assim definido, pode ainda incluir os veios e filões de quartzo com andaluzite ou com sulfuretos, filões e “*sills*” de génese hipabissal – microgranitos, microtonalitos, lamprófiros e pórfiros félsicos e ainda massas e corpos originados pela alteração deutérica- greisens, albititos metassomáticos, fácies de enrubescimento e “*endo-skarns*” (Leal Gomes, 1994).

I.5. Caracterização do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga

A expressão geográfica do campo aplito-pegmatítico de Arga, representada na figura 5, estende-se ao longo dos concelhos de Ponte de Lima, Caminha, Vila Nova de Cerveira, Viana do Castelo e Paredes de Coura, no distrito de Viana do Castelo. Os limites do campo são definidos segundo Leal Gomes (1994) pelas intrusões dos plutonitos vizinhos (St. Ovídeo, Covas,

Romarigães e Lourinhal), mas também pelo Carreamento de Orbacém a Oeste e pelo cisalhamento dúctil, Vila Nova de Cerveira- Mesão Frio a Este.

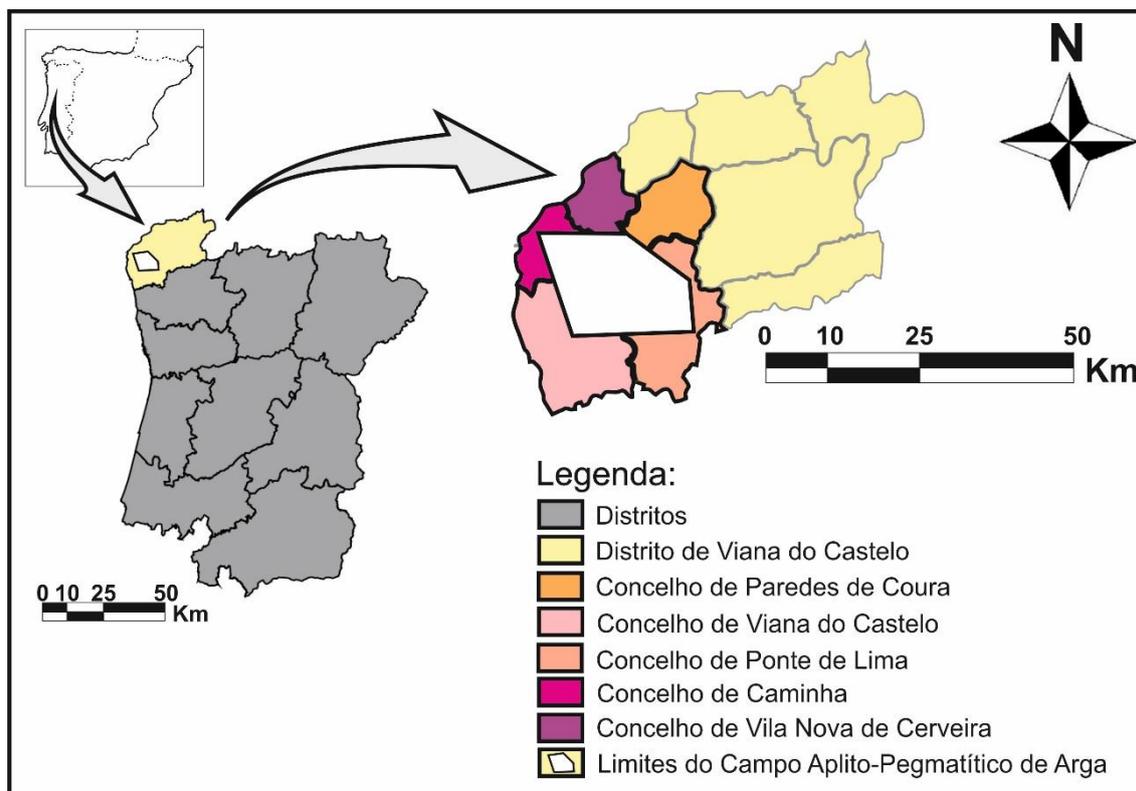


Figura 5 – Enquadramento geográfico da área em estudo, representativa do campo Aplito-Pegmatítico da Serra de Arga

A geomorfologia da região é marcadamente montanhosa, com relevos significativos separados por linhas de água encaixadas em vales estreitos, que próximo da foz alargam em planícies de aluvião. O ponto com maior cota é registado no vértice geodésico do Bretial (801m). Quanto ao relevo, o afloramento do maciço granítico da Serra de Arga apresenta uma forma elipsoidal, alongada segundo NW-SE e apresentando as características típicas de um afloramento granítico, com penhas e blocos (Teixeira e Assunção, 1961 e Teixeira *et al.*, 1972).

I.5.1. Enquadramento geológico

A área delimitada para o Campo Aplito-Pegmatítico da Serra de Arga é inserida na cartografia geológica dos Serviços Geológicos de Portugal à escala 1:50000 pelas folhas 1C

(Caminha) de Teixeira e Assunção (1962) e folha 5A (Viana do Castelo) de Teixeira *et al.* (1972) e à escala 1:200000, na folha 1 (NW de Portugal), de Pereira (1992) (fig. 6).

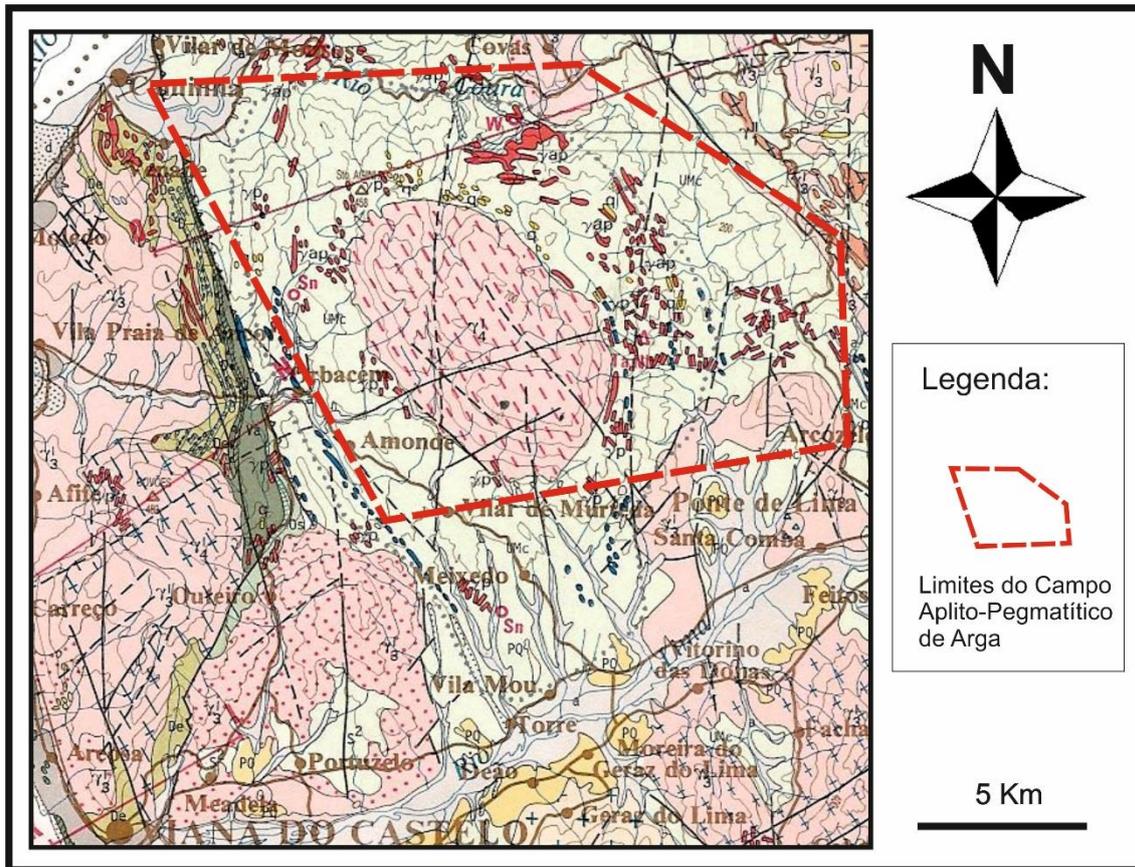


Figura 6 – Enquadramento geológico da área em estudo do Campo Aplito-Pegmatítico da Serra de Arga (excerto da folha 1 da Carta Geológica de Portugal Continental à escala 1/200 000)

Pereira (1992) caracterizou os terrenos correspondentes à área em estudo como Silúricos, parautoctones, sendo constituídos maioritariamente por pelitos e psamitos, skarnitos e vulcanitos, xistos negros, quartzitos cinzentos e ampelitos, correspondendo à Unidade Minho Central (UMC). Leal Gomes (1994) acrescentou, indo ao encontro do anteriormente definido, que as formações silúricas dominantes são pelíticas a psamíticas, sendo por vezes fortemente nodulares (com andaluzite) e que os micaxistos são predominantes, destacando ainda a ocorrência intercalada de níveis com espessura variável de quartzitos, quartzofilitos, liditos e xistos negros, níveis lenticulares de rochas calcossilicatadas, anfibolitos, metaexalitos, turmalinitos e ainda intercalações de metavulcanitos máficos a ácidos.

A extraordinária diversidade litológica e a importância atribuída por Leal Gomes (1994) a estas formações, como bancadas de referência para a cartografia dúctil e dúctil-frágil do Varisco, no Campo Aplito-Pegmatítico de Arga, fomentou a realização de diversos trabalhos e estudos de

caracterização, contextualização e interpretação da natureza primordial destas (Dias e Leal Gomes, 2007, 2008, 2010, 2013; Leal Gomes *et al.*, 2011).

Estes trabalhos incidiram principalmente sobre a região do Serro, onde se definiu com bastante pormenor as litologias ocorrentes e se propôs quais os materiais protolíticos que estiveram na sua origem (Dias e Leal Gomes, 2008; 2010). A contextualização protolítica destas formações é admitida como uma deposição de sedimentos numa bacia endorreica com elevada subsidência, restrita e com baixa oxigenação, sendo os quartzitos, lilitos e os xistos negros típicos destes ambientes. Generalizando as formações do Serro para toda a região incidente sobre o campo aplito-pegmatítico pode-se sugerir para as formações metacarbonatadas e psamopelíticas que são enriquecidas em sulfuretos, uma possível natureza vulcanoclástica a tufácea. As rochas argílicas com texturas herdadas sugerem um carácter primordial felsofírico. As rochas granatíferas quase monominerálicas compostas de espessartite a Mn-alamandina ou então grossulária enquadram-se num ambiente primitivo exalítico. Os diversos turmalinitos apresentam diferentes expressões texturais de schorl-dravite que transitam para fosforitos, sugerem uma natureza primitiva evaporítica e/ou exalítica. Finalmente os anfibolitos observados indiciam ter uma origem em basaltos alcalinos de intraplaca, toleitos continentais ou basaltos MORB.

Tipo petrográfico observado – metamorfito	Hipótese sobre a natureza protolítica
Anfibolitos com segregações félsicas	Termos tardios de segregação metamórfica a metassomática
Micaxistos nodulares	Metassedimentar pelítica
Quartzofilitos	Metassedimentar psamopelítica exalítica
Filitos félsicos plagioclásicos	Felsito
Filitos félsicos com sulfuretos	Felsito ou felsófiro – vulcanito e/ou pórfiro
Quartzofilitos clásticos por vezes com sulfuretos	Fácies vulcanoclástica
Rochas silícicas gossanizadas	Fácies de tendência jaspilítica
Rochas granulares mesocratas metamorfizadas	Rochas porfíricas de composição intermédia
Anfibolitos bandados	Litologias vulcanogénicas de composição basáltica
Fácies filítica com alteração argílica	Produtos de alteração argílica tardia
Fácies brechóide félsica	Produtos de venulação precoce – proto “ <i>stock-work</i> ”
Filitos turmalínico - granatíferos	Exalitos
Filitos turmalínicos com sulfuretos	Exalitos com hidrotermalização tardia
Micaxistos	Metassedimentar pelítica

Tabela 1.1 – Natureza admitida para as litologias metassedimentares do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga, adaptado de Dias e Leal Gomes, 2007

Assim e como está patente na tabela 1.1, o denominador comum às formações do Serro é a génese num sistema vulcanossedimentar poligénico a exalativo, em ambiente geotectónico de “rifting” intracontinental (Dias e Leal Gomes, 2013), podendo mesmo alargar esta definição da natureza primordial a todas as formações do Campo de Arga.

Nessas unidades metassedimentares intruíram-se o Granito de Arga e o respetivo campo aplito-pegmatítico bem como os granitoides variscos vizinhos. O Granito de Arga representa um maciço granítico aflorante de morfologia elíptica, instalado em contexto sin-tectónico em relação a D-3 Hercínica (305 ± 6 Ma). A fácies mais abundante corresponde a um granito leucocrata, de duas micas, com grão médio a grosseiro, localmente com tendência porfiroide. Manifesta uma especialização geoquímica em Li e Sn (Dias, 2012; Leal Gomes, 1994; 1995; Teixeira *et al.*, 1972).

Nas proximidades e marcando os limites a Norte do campo aplito-pegmatítico observa-se o Granito de Covas, um afloramento com morfologia oval, orientado segundo N-S. É um granito sin-tectónico de duas micas, de grão grosseiro por vezes muito grosseiro e que passa na parte ocidental do maciço para uma fácies de textura média ou fina apresentando-se muito alterado e atacado pela erosão dando origem a uma depressão.

No limite SE do mesmo campo aflora um maciço em forma de arco, o Maciço de St. Ovídeo. A sua morfologia de implantação é laminar, tendo sido posteriormente dobrado em antifórme pela D3. A sua instalação ainda que precoce é sin-tectónica à D3 (330-318 Ma) e é caracterizado como um granito duas micas de grão médio a fino, com uma foliação persistente. A sua colocação procedeu-se em estruturas da D2, com a retirada de fundentes dos migmatitos que se formaram durante essa fase (Dias, 2012; Teixeira e Assunção, 1962; Teixeira *et al.*, 1972).

1.5.2. Estruturação do campo aplito-pegmatítico

O campo aplito-pegmatítico dispõe-se de forma aureolar em torno do maciço de Arga, ocorrendo os enxames subparalelos ao eixo maior do afloramento granítico. Esta disposição relaciona-se com a deformação regional D3 (F_{n+1} de Leal Gomes, (1994)) e a ascensão e expansão lateral do diapiro de Arga. A deformação foi variável, de compressiva, em regime dúctil a transcorrente contracional, em dúctil-frágil e os maciços já instalados influenciaram a compartimentação estrutural que foi aproveitada pelas intrusões pegmatíticas. Houve ainda uma evolução da deformação para D4 (F'_{n+1} de Leal Gomes, (1994)) que reativou estruturas precoces que colheram ainda diferenciados finais da evolução residual granítica (Leal Gomes, 1994; 1995).

I.5.2.1. Zonamento do campo baseada na deformação dúctil

Admitindo que uma desigual intensidade de deformação regional D3 em regime dúctil nos metassedimentos afeta a colocação dos corpos aplito-pegmatíticos de forma diferente, Leal Gomes, (1994), dividiu o campo de Arga em sectores proximais, sectores dos antiformes adjacentes, sectores distais e sectores de interferência, de acordo com os diferentes modos de ocorrência dos aplito-pegmatitos (fig. 7).

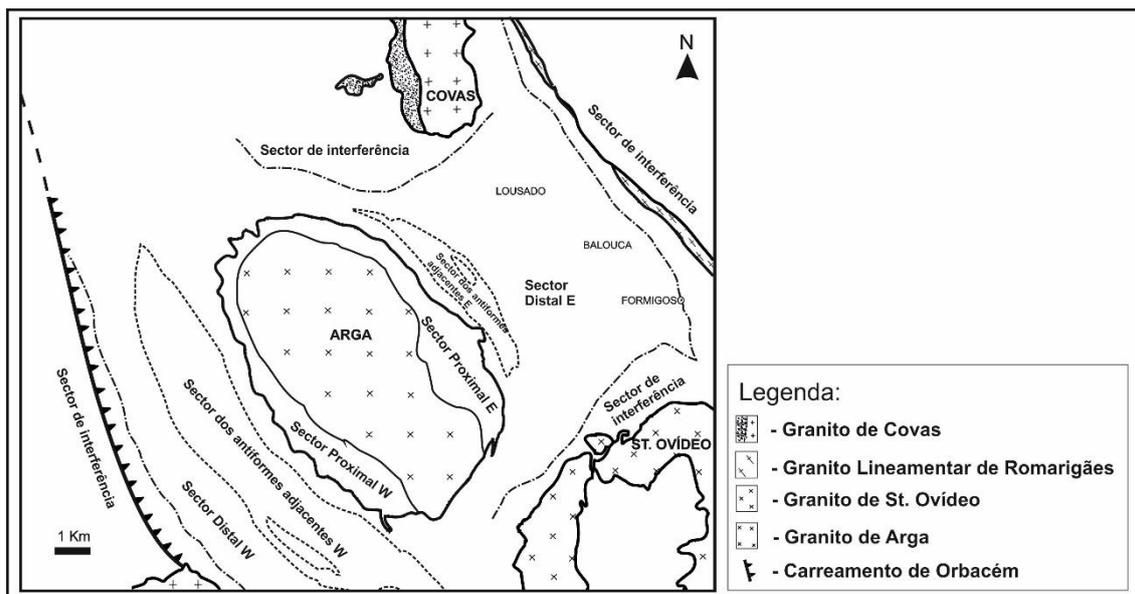


Figura 7 – Divisão do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga pelos sectores de ocorrência dos aplito-pegmatitos estruturalmente diferenciados. Adaptado de Leal Gomes (1994)

- i. Os sectores mais próximos do maciço são designados de proximais e apresentam dois tipos de enxames aplito-pegmatitos:
 - ✓ Filões radiais: ocorrem exclusivamente nos sectores proximais, transversalmente ao contacto com o granito e de forma gradacional. São “boudinados” e encurvados durante a D3.
 - ✓ Corpos “Sill”: são os corpos mais frequentes do campo, aflorando paralelamente ao contacto com o corpo. Ocorrem enraizados no granito parental, sendo subhorizontais e encurvando no sentido do interior do maciço, apresentando uma geometria semelhante à proposta por Phillips (1972,1974) para os “sill”, como se constata no esquema da figura 8. Nas posições mais afastadas do maciço ocorrem dobrados pela D3.

- ii. Os sectores dos antiformes adjacentes correspondem aos locais onde as formações metassedimentares, durante a compressão regional D3 foram dobradas em antiforme, sendo posteriormente erodidos. Assim os afloramentos de aplito-pegmatitos são poucos e relacionados com volumes de expansão lateral do diapiro parental de Arga. Os corpos podem ser de três tipos:
- ✓ Corpos “*Sill*”: são raros, ocorrendo somente nas proximidades das charneiras dos antiformes, sobre os quartzitos que não foram totalmente erodidos. São subhorizontais e acompanham a estrutura do antiforme.
 - ✓ “*Cone-sheets*”: encontram-se relíquias destas estruturas, aflorando com trajetória paralela ao contacto com o granito e com inclinação centrípeta. Estas estruturas retomam descontinuidades de D2.
 - ✓ Corpos tardios: devem a designação devido a serem mais tardios que a geração “*sill*”. Encontram-se instalados em corredores de cisalhamento dependendo já de uma deformação dúctil-frágil e que serão posteriormente discutidos.
- iii. Os sectores mais afastados do plutonito de Arga são designados de distais, sendo nestes onde se verifica a deformação regional mais intensa. Apresentam o maior número e variedade de afloramentos aplito-pegmatíticos:
- ✓ Filões cruzados: são filões instalados em fraturas conjugadas, ocorrendo subparalelos ao contorno de Arga e apresentando inclinações variáveis mas acentuadas. Estão dobrados e “boudinados” pela D3.
 - ✓ Corpos “*sill*”: nestes sectores afloram as orlas do enxame “*sill*” mais afastadas do plutonito. Apresentam um dobramento suave e pouca inclinação. Por vezes surgem geometrias que mostram a reativação dos filões cruzados por fácies tardias filiadas no “*sill*”.
 - ✓ Podem ocorrer ainda corredores de cisalhamento com aplito-pegmatitos tardios mas aí a instalação já é controlada por deformação em regime dúctil-frágil.
- iv. Os sectores de interferência caracterizam-se por serem locais onde a deformação tardia D3 não é tão marcada, devido à interferência dos maciços próximos já instalados. Por serem mais competentes que os metassedimentos, promovem a mudança do campo de tensões exercida sobre os aplito-pegmatitos, fazendo com que estes mudem de atitude de instalação. Os corpos aplito-pegmatíticos são poucos e restringem-se à ocorrência de filões

cruzados pouco possantes, filiados em outros corpos graníticos, como no granito de St. Ovídeo (Leal Gomes, 1994; 1995).

A existência deste sector de interferência entre os afloramentos graníticos e o arqueamento em antiforme dos "sills" comprovam que a colocação destes foi realizada em regime dúctil e que a compartimentação do campo será contemporânea da instalação do maciço de Arga, portanto sin-tectónica em relação à D3.

1.5.2.2. Estruturas dúctil-frágeis auxiliares da instalação do campo

Leal Gomes (1994) interpretou a colocação e evolução dos corpos aplito-pegmatíticos durante as sucessivas fases da evolução diapírica do plutonito de Arga que se encontram esquematizadas na figura 8. Segundo o autor a colocação do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga evoluiu então durante a D3, dependendo da deformação imposta pela ascensão e colocação do diapiro de Arga e sob o efeito da compressão regional D3. O efeito da evolução diapírica é mais marcado nas estruturas dos sectores mais próximos ao maciço enquanto a deformação regional é mais marcada nos sectores mais afastados (distais). Na fase final da D3 (tardi-D3), processa-se uma mudança no campo de tensões regional dando origem a um episódio transcorrente em regime dúctil-frágil. Posteriormente a este, já em D4, ocorre um outro episódio em regime ainda mais frágil, mas ainda com componente dúctil.

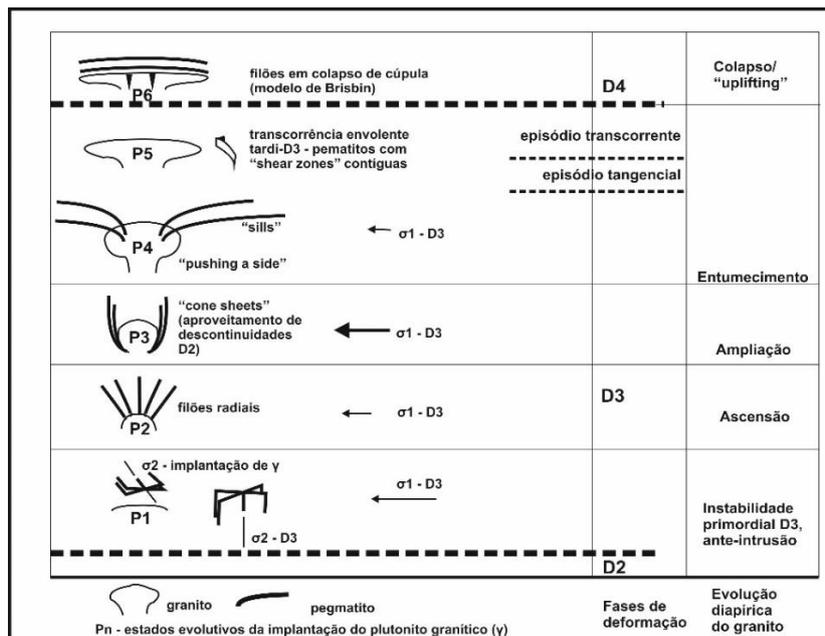


Figura 8 – Adaptação dos modelos de implantação filoniana de Philips (1972;1974) e de Brisbin (1986) à tipologia morfológica dos aplito-pegmatitos do Campo Aplito-Pegmatito de Arga e a relação com a evolução do maciço de Arga, adaptado de Leal Gomes e Lopes Nunes, 2003

Esta transcorrência tardi-D3 ocorre em regime dúctil-frágil e afeta os enxames de filões cruzados, radiais e dos “*sill*”, ao ter originado a “*boudinage*” rodada e cataclase, já referidas, nestes corpos. Ao nível do campo aplito-pegmatítico, esta transcorrência foi ainda responsável por ter originado lineamentos quilométricos que delimitam corredores de cisalhamento dúcteis-frágeis com uma componente de desligamento muito marcada em atitudes NW-SE/ subverticais e menos marcada e penetrativa em acidentes N-S/ subverticais, representados esquematicamente na figura 9.

Os corredores NW-SE/ subverticais, segundo Leal Gomes, (1994), caracterizam-se por possuírem associados veios dilatacionais preenchidos por quartzo mineralizado e ocasionalmente por aplito-pegmatitos com fácies sobremicáceas litíferas. Os cisalhamentos são geralmente esquerdos podendo em alguns casos, ter tido uma reativação polifásica. Os corredores N-S mais significativos são limitados por lineamentos com desligamentos direitos e podem localmente apresentar brechas de falha e de esmagamento com cimento quartzoso mineralizado. Dado serem menos penetrativos e com uma distribuição mais reduzida e localizada, o autor pressupõe que foram estabelecidos em regime mais frágil que os acidentes NW-SE, esquerdos (Leal Gomes, 1994).

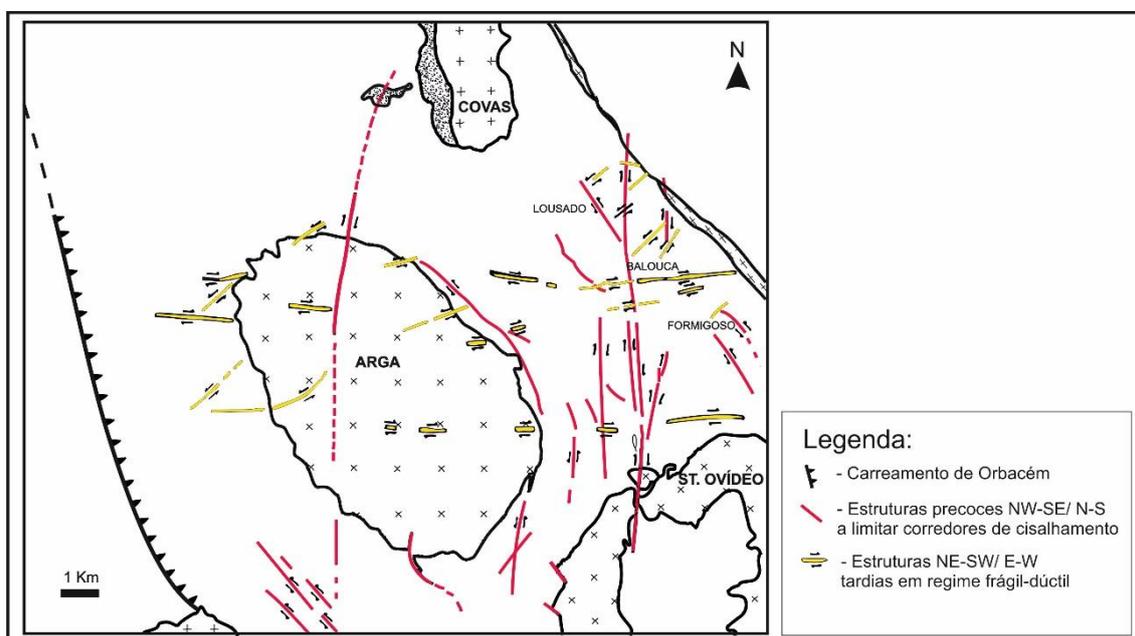


Figura 9 – Estrutura megaescalares definidas em regime dúctil-frágil a frágil, no Campo Aplito-Pegmatítico de Arga, adaptado de Leal Gomes (1994)

Em regime frágil-dúctil, na transição D3 para D4, desenvolveram-se estruturas que intercetam todas as outras que ocorrem no campo, com atitudes $N70^{\circ}-90^{\circ}E$ e $N20^{\circ}-50^{\circ}E$ subverticais (ver figura 9). As atitudes $N70^{\circ}-90^{\circ}E$ /subverticais correspondem a alinhamentos E-W

que quando reativados pela transcorrência megacontinental veicularam os últimos magmas residuais da diferenciação dos “sill”, originando aplito-pegmatitos com massas litíferas sobremicáceas, sendo designados por Leal Gomes, (1994) como filões E-W. Estes corpos representam as manifestações mais tardias e evoluídas dos aplito-pegmatitos de Arga.

1.5.2.3. Distinção dos enxames aplito-pegmatíticos

Os diferentes tipos de aplito-pegmatitos originaram-se através de injeções sucessivas de diferenciados residuais a partir de granitos parentais durante um intervalo de tempo significativo, apresentando composições mineralogicamente distintas. Esta diferenciação mineralógica não se refere aos minerais essenciais uma vez que estes representam as fases características dos sistemas graníticos residuais, mas sim às fases acessórias, que incorporaram distintos elementos raros, em função das variações do quimismo dos diferenciados (Leal Gomes, 1994; Leal Gomes e Leterrier, 1995).

Fatores como a cronologia de colocações, composições mineralógicas tipomórficas e a forma e atitude dos corpos permitem segundo Leal Gomes, (1994) estabelecer uma relação entre os diferentes corpos, permitindo a sua classificação em grupos, equivalentes aos enxames aplito-pegmatíticos de Černý (1982). Com base nesses critérios, o autor assumiu a existência de seis grupos distintos, que se encontram descritos na (tabela 2.1) e que serão retomados nesta dissertação.

Enxames	Fácies texturais dos corpos	Caracterização mineralógica	Origem	Cronologia de instalação		
				D2	D3	D4
Pegmatitos primordiais venulares	Pegmatitos	Quartzo-feldspáticos	Remobilização de leucossoma	■		
Veios de quartzo com andaluzite	Veios de quartzo	Quartzo-andaluzíticos	Remobilização de leucossoma	■		
Filões cruzados	Aplito-pegmatitos	Quartzo-micáceos, albiticos, hiperaluminosos	Possivelmente diferenciados do Granito de St. Ovídeo		■	
Filões radiais e “cone-sheets”	Fácies graníticas e aplito-pegmatitos	Graníticos de duas micas a aplito-pegmatitos albiticos	Diferenciados do Granito de Arga – etapas de ascensão e ampliação		■	

"Sills"	Aplito-pegmatitos	Feldspato potássico	Diferenciados do Granito de Arga –	
		– albiticos a albiticos com minerais de Li	etapa de entumescimento, expansão lateral	
Filões E-W	Pegmatitos	Sobremicáceos litiniferos paroxismais	Reactivação dos diferenciados "sill" em acidentes E-W	

Tabela 2.1 – Caracterização mineralógica e tipologia composicional dos aplito-pegmatitos do Carmo Aplito-Pegmatítico de Arga, adaptado de Leal Gomes (1994)

A localização dos filões cruzados predominantemente nos setores distais do campo e a intensa deformação que apresentam posiciona, temporalmente, a sua colocação durante as fases precoces da evolução diapírica, sendo principalmente dependente da deformação regional. Estes corpos comportam as fácies aplito-pegmatíticas mais precoces, geradas por diferenciados graníticos residuais, apresentando elevados conteúdos de micas brancas e fases portadoras de Nb, Ta, R.E.E. e U (Leal Gomes, 1994).

Entre a geração dos filões cruzados e a geração "sill" instalaram-se os enxames de filões radiais e "cone sheets". Estes corpos têm pouca expressão a nível do campo, ocorrendo os filões radiais sobretudo na zona proximal, enraizados no granito de Arga, sendo composicionalmente graníticos no interior do maciço e aplíticos no encaixante. Os "cone sheets" comportam fácies aplíticas e muito raramente aplito-pegmatíticas. Em ambos as composições variam pouco ao longo dos diversos corpos, com composição geral tendencialmente albitica (Leal Gomes, 1994).

O enxame "sill" compreende os corpos com maior representação no campo aplito-pegmatítico de Arga. A sua distribuição pelo campo obedece à simetria imposta pela evolução da intrusão do diapiro, sendo emanados do seu interior, por volumes laterais de "pushing-a-side" plutonítico durante a fase de expansão lateral deste (Leal Gomes e Lopes Nunes, 2003). São lenticulares ou tabulares, maioritariamente subhorizontais. Apresentam-se menos deformados que os filões cruzados, sendo considerados posteriores a estes. As sucessivas injeções de diferenciados ao longo da colocação destes corpos justificam a sua abundância assim como a diversidade de composições observadas em todo o enxame.

Desse modo, Leal Gomes (1994) definiu 4 tipos composicionais que parecem ser recorrentes e se podem relacionar com a localização e a estrutura do corpo portador (tabela 3.1). A composição do tipo 1 é observada nos "sills" intra-graníticos e exo-graníticos estéreis e as composições 2, 3 e 4 representam os "sills" exo-graníticos. A principal diferença entre estes diz

respeito à presença de mineralizações litiníferas, enquanto o primeiro tipo não apresenta minerais de Li, os restantes são todos litiníferos e distinguem-se pelo mineral de Li mais abundante, tipo 2 - turmalina (elbaíte-lidicoatite), tipo 3 – petalite e tipo 4 – espodumena + ambligonite.

Tipo de "sill"	Posição no enxame	Composição	Mineralização em Li característica
1	Intra-granítico a exo-granítico	Peraluminosa-sódica	Ausente
2	Exo-granítico	Peraluminosa sódio-lítica	Turmalina (Li)
3	Exo-granítico	Peraluminosa potássica litinífera	Petalite
4	Exo-granítico	Peraluminosa potássica litinífera	Espodumena e ambligonite

Tabela 3.1 – Composições, mineralizações características e posição das diferentes fácies presentes no enxame "sill", adaptado de Leal Gomes (1994)

Por fim, Leal Gomes (1994) definiu também a existência de corpos tardios - filões E-W. São corpos muito raros ocorrendo apenas nas zonas distais, ao longo dos alinhamentos E-W, principalmente nos que intersectam os alinhamentos NW-SE, mais precoces. Através da reativação das caixas "sill" e da captura dos últimos diferenciados graníticos, estes corpos representam os corpos aplito-pegmatíticos mais tardios e evoluídos do campo. São corpos zonados, com núcleo de quartzo e cavidades miarolíticas, pouco possantes e tabulares, cuja paragénese é dominada por quartzo e lepidolite, caracterizando o paroxismo evolutivo litinífero, típico da manifestação de condições hidrotermais.

Ao conjunto de aplito-pegmatitos já referidos, Leal Gomes, (1994) adicionou mais dois tipos de fácies pegmatoides, os pegmatitos venulares primordiais e os veios de quartzo com andaluzite, pois apesar de não serem dependentes dos magmas residuais da diferenciação granítica, mas sim resultado de segregação metamórfica, por colheita de leucossoma, estes estão relacionados espacialmente com os aplito-pegmatitos propriamente ditos.

Os pegmatitos venulares primordiais representam as fácies pegmatíticas mais precoces do campo, com origem provável no início da D3 ou ainda mais precoces. São manifestações muito limitadas de fusão parcial incipiente e colheita de leucossoma. Estes corpos são constituídos principalmente por quartzo e feldspato e encontram-se muito deformados (Leal Gomes, 1994).

Os veios de quartzo com andaluzite já apresentam alguma variação na morfologia e estrutura interna, mas ainda assim o seu carácter hiperaluminoso e a afinidade metamórfica muito marcada, indiciam uma origem por colheita de leucossoma, admitindo assim que possam ter-se instalado, pelo menos numa fase inicial, ao mesmo tempo que os pegmatitos primordiais (Leal Gomes, 1994).

Caracterizados os enxames aplito-pegmatíticos ocorrentes em Arga, estudar-se-ão apenas aqueles que têm uma filiação claramente pegmatítica e que expressem mineralizações ricas em Li, pois são os mais promissores a possuírem turmalinas coloridas.

I.6. Campos aplito-pegmatíticos portadores de turmalinas coloridas

Como os pegmatitos e aplito-pegmatitos graníticos são por excelência os principais corpos geradores de turmalinas e em muitos dos casos os depósitos económicos destas, em todo o mundo há registo de campos aplito-pegmatitos que comportam nas suas paragénese turmalinas coloridas.

No Brasil ocorrem diversos campos aplito-pegmatíticos famosos não só pelas turmalinas mas também por outras gemas. Espécimes verdes, azuis, vermelhos e zonados concêntricamente foram largamente explorados no estado de Minas Gerais.

Na década de 1980 foi descoberta uma nova variedade cromática de elbaíte. A raridade da cor (verde azulado “elétrico”) caracterizava os cristais que ocorriam num pegmatito alterado no estado de Paraíba, atribuindo assim a denominação turmalina Paraíba. A raridade e cor destas gemas incrementaram largamente o seu valor económico, correspondendo atualmente à variedade de turmalina mais dispendiosa (Carneiro *et al.*, 2009; Dutrow e Henry, 2000; O’Donoghue, 2006; Wilson, 2002).

Moçambique está atualmente a desenvolver esforços para uma eficaz exploração e rentabilização dos seus recursos minerais, visando a independência na gestão dos seus recursos geológicos. Os diversos campos aplito-pegmatíticos localizam-se ao longo da Cintura Pegmatítica Monapo-Mocuba e são explorados em minas ou através de garimpo ilegal, dado que as gemas ocorrem com relativa abundância. As turmalinas-gema ocorrem com maior frequência e qualidade nas cavidades mirolíticas dos pegmatitos do Alto Ligonha, na província da Zambézia, mas encontram-se espécimes ao longo de todas as unidades internas destes corpos.

Caracterizam-se por serem elbaïtes e lidicoatites com variadas cores e zonalidades, destacando-se o valor elevado do termo comercial “Azul Naïpa” que se refere à cor azul específica de uma fluor-elbaïte (Neiva e Leal Gomes, 2010; 2011; Sahama, von Knorring e Tornroos, 1979).

A ilha de Madagáscar e os seus campos aplito-pegmatíticos destacam-se por dois fatores excepcionais; é considerada a localidade de referência para a ocorrência lidicoatite (Dunn, Appleman e Nelen, 1977) e os seus cristais exibem zonamentos cromáticos que cortados perpendicularmente ao eixo maior c , descrevem variados padrões geométricos e cromáticos que valorizaram economicamente as ocorrências. Geologicamente, relaciona-se com Moçambique, sendo ambos localizados sob o Cinturão de Moçambique. A ocorrência mais notável é o famoso depósito Anjanaboïna, na parte central da ilha, um campo de corpos pegmatíticos mistos LCT e NYF altamente caulinizados (Dirlam *et al.* 2002).

Situado sobre a Cintura Pegmatítica dos Montes Hindu Kush, uma das maiores do mundo, o Afeganistão é também reconhecido mundialmente pelos seus depósitos pegmatíticos de turmalinas. Nas províncias de Laghman, Konar e Nuristan, situam-se os mais produtivos campos aplito-pegmatíticos com turmalina, Kulam, Paprok e Darai-Pech. As turmalinas são normalmente elbaïtes zonadas, do tipo “*watermelon*” – nome atribuído às espécies que têm um zonamento com núcleo róseo e bordo verde, mas também ocorrem com outras cores. Estes campos são constituídos por corpos possantes LCT, onde a turmalina cristaliza em grandes cavidades miarolíticas (London, 1986; Natkaniec-Nowak, Dumańska-Stowik e Ertl, 2009).

Outras localidades onde ocorrem campos aplito-pegmatitos ricos em turmalinas coloridas são os E.U.A., Republica Checa, Canada, China, Rússia, Nigéria, Namíbia, Tanzânia, Myanmar e Sri Lanka, porém produzindo quantidades e/ou qualidade inferior comparativamente aos locais anteriormente destacados (Ercit, Groat e Gault, 2003; Jahns e Wright, 1951; Jolliff, Papike e Shearer, 1986; Novák, 2000; O’Donoghue, 2006; Sinclair e Richardson, 1992).

I.7. Relações genéticas das assinaturas LCT com linhagens graníticas de duas micas peraluminosas (granitos “sintectónicos”)

A interpretação das condições de gênese dos pegmatitos, bem como dos processos internos envolvidos na sua evolução posterior, despoletou um conjunto de hipóteses, teorias e metodologias para a classificação destes (Cameron *et al.*, 1949; Černý, 1982, 1991a, 1991b; Černý e Ercit, 2005; Ginsburg *et al.*, 1979; Landes, 1933; Solodov, 1962).

De todas as classificações propostas para os pegmatitos e aplito-pegmatitos, a mais aceite é a de Černý (1991a), revista por Černý e Ercit, (2005). Estes autores adotam e melhoram a classificação proposta por Gingburg *et al.*, (1979) que se baseia na profundidade de instalação dos pegmatitos e nas suas relações com o metamorfismo e os plutões graníticos (tabela 4.I).

Classes de profundidade	Mineralizações	Ambiente metamórfico				Relação com granitos	Características
		Fácies	Pressão (kbars)	Temp. (°C)	Prof. (Km)		
Profundidade Máxima	Ausente	Anfibolito de alta pressão a granulito	4 a 9	700 a 800	17 a 27	Ausente	Pegmatitos de anatexia crustal
Grande Profundidade	Micas	Anfibolito de média pressão	5 a 8	580 a 650	13 a 20	Ausente	Produtos de anatexia e/ou fracionamento de granitos primitivos, autóctones.
Intermédia	Elementos raros (Li, Rb, Cs, Be, Ga, Sn, Hf, Nb > Ta, Zr, Ti, U, Th, R.E.E., B, P, F)	Anfibolito de baixa pressão	2 a 4	500 a 650	7 a 13	Externos marginais ou internos	Fracionamento de granitos de tipo S e I, alóctones.
Superficial	Elementos raros (Be, F, R.E.E., Ti, U, Th, Zr, Nb > Ta)	Xistos verdes	1 a 2	400 a 500	1.5 a 3	Internos a marginais	Pegmatitos miarolíticos restritos à zona da cúpula de Granitos do tipo I,

Tabela 4.I - Classificação dos pegmatíticos em relação à profundidade de instalação, adaptado de Gingburg *et al.*, (1979)

Assim, a classificação de Černý e Ercit, (2005) assenta em cinco classes de aplito-pegmatitos, Abissal, Moscovítica, Moscovítica-Elementos Raros, Elementos Raros e Miarolítica. Estas são subdivididas com base nas condições de pressão (P) e temperatura (T) do encaixante e de acordo com as características geoquímicas, associações mineralógicas e texturais dos diferentes pegmatitos instalados (tabela 5.I).

CLASSE	SUBCLASSE	TIPO	SUBTIPO	AMBIENTE METAMÓRFICO	RELAÇÃO COM GRÁNITOS	
Abissal (AB)	AB-HREE			Fácies anfibolítica a granulítica de baixa a alta -P; 4 -9 Kbar, 700° - 800° C.	Nenhuma; segregações anatéticas.	
	AB-LREE					
	AB-U					
	AB-Bbe					
Moscovítica (MS)			Alta-P, fácies anfibolítica Barroviana; 5 -8 kbar, 650° - 580° C.	Nenhuma; (corpos anatéticos) a marginais ou exteriores.		
Moscovítica-Elementos Raros (MSREL)	MSREL-REE			Fácies anfibolítica, moderada a alta-P, (T); 3 -4 kbar, 650° - 520° C.	Interior a exterior, indefinida.	
	MSREL-Li					
Elementos Raros (REL)	REL-REE	Alanite-Monazite		Variável e posterior aos eventos regionais que afectam as rochas encaixantes.	Interior a marginal (raramente exterior).	
		Euxenite				
		Gadolinite				
	REL-Li	Berilo	Berilo-Columbite		Baixa -P., fácies Abukuma anfibolítica a xistos-verdes; 2 - 4 kbar, 650° - 450° C.	(interior a marginal), exterior.
			Berilo-Columbite-Fosfatos			
		Complexo	Espodumena			
			Petalite			
			Lepidolite			
			Elbaite			
			Amblygonite			
Albite-Espodumena						
Albite						
Miarolítica (MI)	MI-REE	Topázio-Berilo		Muito baixa-P, posteriores aos eventos regionais que afectam as rochas encaixantes.	Interior a marginal.	
		Gadolinite-Fergusonite				
	MI-Li	Berilo-Topázio		Baixa-P, fácies anfibolítica xistos-verdes; 1.5 - 3 kbar, 400° - 500° C.	(Interior), marginal a exterior.	
		MI-espodumena				
		MI-petalite				
		MI-lepidolite				

Tabela 5.1 – Classificação por classes dos pegmatitos graníticos, segundo Černý e Ercit, (2005)

Estes autores definiram também o conceito de famílias petrogenéticas, conceito este aplicado somente aos pegmatitos que derivam por diferenciação magmática de fontes plutónicas diversas, os quais, agrupados de acordo com a afinidade geoquímica ao magma parental, originaram três famílias: LCT, NYF e Mista. Estas famílias portanto, apenas contemplam os corpos da classe dos elementos raros (REL) e miarolíticos (MI), descritos de forma sucinta na tabela 6.1.

Os acrónimos LCT e NYF representam os elementos raros presentes, mais significativos e que ao longo das sequências de fracionamento destes corpos se vão concentrando, de tal forma que marcam a assinatura geoquímica destes e originam mineralizações específicas, capazes de os caracterizar. Assim os corpos LCT são aqueles que apresentam um enriquecimento em Lítio, Césio e Tântalo e os NYF em Nióbio, Ítrio (Terras Raras) e Flúor, não excluindo a importância dos outros elementos que possam ocorrer (Černý e Ercit, 2005).

FAMÍLIA	SUBCLASSE	ASSINATURA GEOQUÍMICA	COMPOSIÇÃO GLOBAL DO PEGMATITO	GRANITOS ASSOCIADOS	COMP. GLOBAL DO GRANITO
LCT	REL-Li	Li, Rb, Cs, Be, Sn, Ga, Ta > Nb, (B, P, F)	Peraluminosa a subaluminosa	Sin-orogénicos a tardi-orogénicos (anorogénicos) altamente heterogéneos	Peraluminoso do tipo S, I ou misto S+I
	MI-Li				
NYF	REL-REE	Nb > Ta, Ti, Y, Sc, REE, Zr, U, Th, F	Subaluminosa a metaluminosa (subalcalina)	(sin-, tardi-, pos) a principalmente anorogénicos; quasi-homogéneos	Subaluminoso a ligeiramente peraluminoso
	MI-REE				
MISTA	LCT + NYF	Mista ou Híbrida	(metaluminosa) a ligeiramente peraluminosa	(pós-orogénicos) a anorogénicos; heterogéneos	Subalcalino a ligeiramente peraluminosos

Tabela 6.I – Classificação petrogenética por famílias dos pegmatitos graníticos, adaptado Černý e Ercit, 2005

A assinatura LCT admite que os magmas parentais graníticos que potenciam a geração destes corpos têm de possuir teores significativos de elementos raros característicos. Geneticamente são-lhe atribuídas duas origens principais, uma origem na anatexia de protólitos supracrustais metassedimentares ou metavulcânicos ou então admitindo uma pequena percentagem de anatexia/fusão parcial de protólitos ígneos do embasamento da crosta. A primeira fonte origina granitos do tipo S e a segunda fonte dá origem a granitos do tipo I (tabela 7.I). Por vezes os dois processos ocorrem em simultâneo dando origem a granitos de tipo S+I e corpos aplito-pegmatíticos Mistos (LCT-NYF) (Černý e Ercit, 2005).

Completando esta argumentação, Martin e De Vito (2005) acrescentaram que dever-se-ia incluir neste cenário da classificação, o regime tectónico vigente durante a colocação dos corpos, pois este determina a natureza do magma parental. Assim, segundo estes autores, os pegmatitos LCT são gerados em regimes de compressão (contexto orogénico) e os NYF em regime distensivo (anorogénico).

Subdivisões da Família LCT	
LCT- I	Granitos férteis gerados por baixa percentagem de anatexia de protólitos ígneos e subsequente diferenciação; Granitos férteis subaluminosos e pegmatitos associados pobres em Cs, B, P, S.
LCT- S	Granitos férteis gerados por anatexia de protólitos supracrustais e subsequente diferenciação; Granitos férteis peraluminosos e pegmatitos associados enriquecidos em Cs, B, P e S.

Tabela 7.I – Subdivisões da Família LCT, adaptado Černý e Ercit, 2005

Nota-se que a favorabilidade para a ocorrência de corpos com assinatura LCT está associada então à geração de granitos do tipo S instalados durante os episódios orogénicos. A deformação regional imposta pela orogenia promove a anatexia das fácies metassedimentares supracrustais com conteúdos elevados de Si e Al, dando origem a magmas peraluminosos e ácidos promotores dos granitos do tipo S e por diferenciação, os corpos LCT (Chappell e White, 1974).

No caso do campo Aplito-Pegmatítico de Arga, Leal Gomes (1994; 2005b), reconheceu a existência de corpos de afinidade metamórfica e magmática. Distingue-se assim uma assinatura NYF nos filões cruzados e uma assinatura LCT nos corpos mais evoluídos e fracionados dos enxames “*sill*” e filões “E-W”. O facto de se encontrar corpos “*sill*” enraizados no granito de Arga e de este ser altamente especializado em Li, Cs, Nb e F (Leal Gomes, 1994), pode-se afirmar que este é o granito parental dos corpos LCT de Arga.

Dias (2012) e Dias e Leal Gomes (2013) defendem que a génese de veios de quartzo e andaluzite por segregação metamórfica ocorreu durante a D-2. Posteriormente geraram-se ainda condições de P-T necessárias para ocorrer a anatexia das rochas metassedimentares e vulcanogénicas supracrustais, originando magmas peraluminosos potencialmente promotores do granito de St. Ovídeo (Dias e Leal Gomes, 2013).

O Granito de Arga, sin-tectónico em relação à D3 é considerado como do tipo S, demonstrando que o magma parental foi capaz de fornecer os elementos que permitiram a especialização dos corpos com assinatura LCT do campo de Arga e a ocorrência das paragénese litíferas mais evoluídas (Leal Gomes, 2005b).

O granito vizinho de St. Ovídeo, mais precoce é também peraluminoso, reforçando a ideia da especialização magmática que aqui ocorreu.

I.8. Relação entre especialização LCT dos pegmatitos e a presença de turmalinas coloridas

Como já foi referido, a tipologia LCT traduz-se numa tendência de enriquecimento em elementos raros (Li, Cs e Ta) e que é expressa nas paragénese ocorrentes ao longo dos corpos que apresentam esta assinatura. Os elementos voláteis e metais alcalinos B, F, P, Li, Cs e Rb, enriquecidos nos magmas percursores destes corpos, vão agir como complexantes e fluidificantes, baixando a temperatura “*liquidus*” do magma, permitindo que este possa percolar a baixa viscosidade até locais mais afastados da fonte granítica parental. Durante esta percolação, as sucessivas cristalizações irão promover a concentração dos elementos incompatíveis nos magmas

residuais, promovendo uma fracionamento altamente especializada nas fases finais da diferenciação magmática, ocorrendo aí as fases cristalinas mais exóticas (Leal Gomes, 1994; 1995).

Para que possa ocorrer a cristalização de turmalinas coloridas, será necessário em primeiro lugar uma disponibilidade dos elementos intervenientes na sua estrutura, desta forma os teores de B, F, Al, Li, Si, Na, Mn, Fe, Ca, V e Ti, terão de ocorrer concentrados nos magmas envolvidos.

O papel do B é essencial na manifestação da ocorrência de turmalina, sendo sempre necessário invoca-lo em concentrações significativas para promover a génese destas, porém tratando-se de turmalinas coloridas, é o Li que se destaca como constituinte cardinal para a sua cristalização.

As paragénese litíferas expressam a relação entre a disponibilidade de Li existente e as turmalinas coloridas, assim a ocorrência no campo de Arga de paragénese com petalite e lepidolite demonstra que o Li estava disponível em quantidades passíveis de originar turmalinas coloridas. Justificando esta grande disponibilidade de Li em Arga, Leal Gomes (2010c) indicou, através de análises químicas de um corpo pegmatítico portador de turmalina, que o teor mínimo de Li necessário para a ocorrência de turmalinas coloridas, é 1889 ppm.

Desta forma, compreende-se que, apesar de todos os corpos LCT possuírem schorl, formada precocemente nos pegmatitos pela remoção de B promovida por uma saturação em vapor aquoso inicial, nem todos registam a ocorrência de turmalina colorida, ou pelo menos, a ocorrência em quantidades significativas, devido ao facto de nem todos os corpos serem evoluídos ao ponto de desenvolverem concentrações de Li compatíveis com as paragénese de paroxismo evolutivo litífero (Leal Gomes, 1994; 1995; 2010).

I.9. Campos pegmatíticos LCT portugueses

Como já referido, a Cintura Pegmatítica Centro-Ibérica alberga diversos campos pegmatíticos, centrando no seu domínio a quase totalidade dos campos pegmatíticos portugueses. A par do Campo Aplito-pegmatítico de Arga é possível desenhar um conjunto de campos pegmatíticos ocorrentes, cuja especialização LCT e relação genética com os granitos hercínicos é comum a todos. Os campos aplito-pegmatíticos resumidos na tabela 8.I representam algumas dessas ocorrências.

Constata-se que quase sempre a morfologia dos corpos apresenta-se sob a forma de soleiras ou filões sub-verticais, lenticulares a tabulares e que nos campos mais evoluídos composicionalmente, os corpos ocorrem em posições exograníticas face ao potencial granito parental, geralmente intruindo metassedimentos do Silúrico.

A diversidade mineralógica expressa nas fases mais comuns é no conjunto de todos os campos bastante semelhante. As fases acessórias no entanto variam em função da evolução composicional e estrutura do corpo, apresentando geralmente mineralizações em Nb, Ta e Sn nos corpos claramente magmáticos/pegmatíticos e em estados mais evoluídos, já em domínios pegmatítico-hidrotermais, ocorrem as mineralizações em sulfuretos, menos expressivas nos corpos descritos.

CAMPO	ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	TIPO DE DEPÓSITO	PARAGÉNESE	OCORRÊNCIA DE TURMALINA
Arcozelo da Serra (1)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Granito pós-D3 de grão médio a grosseiro porfiróide de duas micas. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Soleiras subhorizontais zonadas, orientadas NW-SE a N-S. ❖ Classe moscovite-elementos raros. 	Qz, Fk, alb, mosc, turmalina, siderofilite, clorite, granada, berilo, zircão, monazite, uraninite, apatite, Nb-tantalatos, arsenopirite, montebrasite, espodumena, zinvaldite-trilitionite.	<p style="text-align: center;">++</p> <p>Ocorre em faixas de metassomatismo do encaixante e nas soleiras.</p>
Almendra - Barca d'Alva (2)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Terrenos metassedimentares do Complexo Xisto-Grauváquico. ❖ Granitoides sin-D3 de duas micas. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Diques aplito-pegmatíticos subverticais. ❖ Vários 	Qz, Fk, alb, mosc, lepidolite, montebrasite, petalite, espodumena, ambligonite, topázio, granada, apatite, Nb-tantalatos, cassiterite, turmalina e heterosite-purpurite.	<p style="text-align: center;">+</p> <p>Muito rara, sob a forma de schorl.</p>
Seixo Amarelo – Gonçalo (3)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Granito porfiróide biotítico sin-D3. ❖ Granito de duas micas e grão grosseiro tardi-D3. ❖ Metassedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Soleiras subhorizontais, zonadas, intragraníticas a exograníticas. ❖ Tipo complexo, sub-tipo com lepidolite e ambligonite. 	Qz, Fk, alb, mosc, lepidolite, turmalina, petalite, zinvaldite, berilo, ambligonite, topázio, zircão, apatite, cassiterite e Nb-tantalatos, antunite, torbenite e sulfuretos (Ar, Fe e Cu).	<p style="text-align: center;">+++</p> <p>Zona de zinvaldização no encaixante e em cavidades na zona nuclear das soleiras lepidolíticas.</p>
Mangualde (8)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Granitos de duas micas, grão médio a grosseiro sin-D3 e fácies mais porfiróides. ❖ Rochas sedimentares ante-Ordovícicas. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Diques subverticais e bolsadas irregulares intragraníticas. 	Qz, Fk, alb, mosc, turmalina, ambligonite, triplite-litiofilite, heterofilite, berilo, mesquitelite, litiofilite, mangualdite, triplite, strengite, torbernite, arsenopirite, molibdenite, esfalerite, calcopirite, pirite, cassiterite.	<p style="text-align: center;">+</p> <p>Rara nas partes mais internas e zonas de bordadura.</p>
Sabugal (1)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Granito tardi-D3, de grão grosseiro, porfiróide de duas micas. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Filões sub-verticais E-W zonados, soleiras e massas sub-horizontais. ❖ Tipo berilo, subtipo berilo, columbite, fosfatos e tipo complexo, subtipo lepidolítico. 	Qz, Fk, alb, mosc, topázio, turmalina, cassiterite, apatite, berilo, zircão, Nb-tantalatos, triplite, zinvaldite, lepidolite e polilitionite	<p style="text-align: center;">+</p> <p>Ocorre nas soleiras do subtipo com lepidolite.</p>

Segura (5)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Granito sin-D3, de grão médio a grosseiro de duas micas e de grão médio a fino moscovítico. ❖ Metassedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Soleiras aplito - pegmatíticas orientadas NE-SW, subhorizontais. ❖ Tipo REL-Li 	Qz, Fk, alb, mosc, lepidolite, zircão, apatite, rútilo, ambligonite-montebrasite, topázio, cassiterite, Nb-tantalatos.	+ Não registada a ocorrência, mas é provável.
Serras Barroso-Alvão (4)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Metassedimentos Silúricos. ❖ Granito biotítico sin a pós- D3. ❖ Granito de duas micas sin a tardi-D3. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Filões aplito-pegmatíticos subverticais. ❖ Tipo elementos raros, subtipo com espodumena e petalite. 	Qz, Fk, alb, mosc, espodumena, petalite, lepidolite, eucryptite, apatite, turmalina, montebrasite, triplite, ilite, montmorilonite clorite, cassiterite e Nb-tantalatos.	+ Encontrada na fácies aplítica, de cor azul clara a escura.
Litoral N de Viana do Castelo (6)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Granito de duas micas, muito deformado. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Diques aplito-pegmatíticos pouco possantes. ❖ Tipo complexo, subtipo com espodumena. 	Qz, Fk, alb, mosc, espodumena, apatite, turmalina, montebrasite, triplite, Nb-tantalatos, berilo.	+ Acoplada às faces prismáticas de cristais de espodumena.
Vieira do Minho (7)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Granito sin-D3, porfiroide de grão grosseiro, essencialmente biotítico. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Pequenas bolsadas de forma irregular, corpos zonados. 	Qz, Fk, alb, mosc, lepidolite, apatite, turmalina, ambligonite - montebrasite, espodumena, cookeite, bertrandite, triplite, Nb-tantalatos, cassiterite, topázio, fenacite e berilo.	++ Ocorrem numa brecha hidrotermal a cimentar clastos de feldspato.

Tabela 8.I - Descrição dos campos pegmáticos LCT portugueses³. Frequência de ocorrência de turmalina: + muito raro; ++ raro; +++ frequente.

Apesar de serem ambientes propícios à génese de turmalinas, nem sempre as condições e composições dos corpos portadores promovem a sua cristalização, como se constata pelo reduzido registo de ocorrências nos diversos campos LCT. A turmalina mais frequente na maioria dos corpos expressa-se sob a espécie schorl, em zonas murais dos corpos ou em faixas de metassomatismo do encaixante, ocorrendo como mineral dominante (turmalinização) ou associada com zinvaldite (zinvalditização). As turmalinas coloridas propriamente ditas ocorrem com menos frequência e em muito menos corpos, o que é expectável.

Os corpos onde ocorre podem ser de todos os subtipos da classe de Elementos Raros-Tipo Complexo, tratando claro está, de corpos altamente evoluídos e fraccionados. Apresenta cores verdes a azuis e muito raramente róseas, sendo os espécimes de melhor qualidade aqueles que ocorrem em cavidades miarolíticas ou nas interfases zona intermédia núcleo.

O Campo Aplito-pegmatítico de Arga é neste aspeto único, pois além de ocorrerem grandes quantidades de cristais, alguns dos quais de grandes dimensões, verifica-se ainda uma diversidade cromática extraordinária, ocorrendo ainda espécimes bicolores, com núcleo azul-escuro e bordo

³ (1) Neiva, A.M.R. et al., 2011; (2) Vieira, R.A., 2010; (3) Neiva, A.M.R. e Ramos, J.M.F., 2009; (4) Campos de Lima, A.M., 2000; (5) Antunes, I.M.H.R., 2010; (6) Correia, V.M.S., 1997; (7) Dias, et al., 2009; (8) Mário de Jesus, A., 1933.

róseo. Somente neste campo as turmalinas foram estudadas de forma individual (Leal Gomes, 2005), procurando a sua valorização económica, tendo sido realizados ensaios em cabochão e lapidação facetada.

I.10. Mineraloquímica e tipologia conceptual das turmalinas coloridas

A enorme variabilidade composicional e a multiplicidade de substituições químicas possíveis nas turmalinas permite a distinção de diversos membros-finais. Esta diversidade de espécies minerais, permite a caracterização da turmalina como um supergrupo mineral, definindo segundo o IMA-CNMNC, 18 espécies diferentes, no entanto o número tende a aumentar dada a diversidade composicional e os estudos que estão a ser realizados (Henry *et al.*, 2011).

I.10.1. Mineraloquímica

Do ponto de vista cristalográfico, a turmalina é um borossilicato acêntrico com a fórmula química geral simplificada, $X Y_3 Z_6 (T_6O_{18}) (BO_3)_3 V_3 W$. As letras representam as posições cristalográficas específicas que os respetivos iões podem ocupar, o local X normalmente é ocupado por Na^+ , porém também pode acomodar quantidades variáveis de Ca^{2+} , K^+ ou estar vazio. As posições Y_3 e Z_6 são octaédricas, sendo a posição Y_3 mais distorcida e larga, tolera variadas substituições envolvendo os catiões di-, tri- e quadrivalentes Li^+ , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , V^{3+} , Cr^{3+} e Ti^{4+} . A posição Z_6 é tipicamente ocupada pelo Al^{3+} podendo ocorrer no entanto com pequenas quantidades de Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Cr^{3+} e Ti^{4+} substituindo o Al^{3+} . A posição tetraédrica T_6 é dominada pelo Si^{4+} , podendo conter em algumas espécies Al^{3+} e/ou B^{3+} , este último catião (B^{3+}) ocupa a totalidade da posição triangular B, não se conhecendo nenhuma substituição. Os espaços aniónicos V_3 são ocupados por OH e O^{2-} e W por OH, F e O^{2-} (Henry e Guidotti, 1985).

Podendo acomodar uma grande variedade de catiões, os processos de substituição entre elementos nas posições estruturais é dependente das condições geoquímicas do meio, originando uma enorme diversidade de tipos mineraloquímicos. Para efeitos de classificação, esta diversidade composicional pode ser subdividida em diversos grupos, geralmente baseados na dominância de iões em posições estequiométricas específicas (Henry *et al.*, 2011). A tabela 9.1 apresenta as composições estáveis de turmalinas aprovadas pelo IMA-CNMNC, estando estas subdivididas em função do catião dominante no espaço X.

Tipo mineralógico	(X)	(Y ₃)	(Z ₆)	T ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	V ₃	W
-------------------	-----	-------------------	-------------------	--------------------------------	---------------------------------	----------------	---

Subgrupo alcalino							
Dravite	Na	Mg ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Schorl	Na	Fe ₃ ²⁺	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Crómio-dravite	Na	Mg ₃	Cr ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Vanádio-dravite	Na	Mg ₃	V ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Fluor-dravite	Na	Mg ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
Fluor-schorl	Na	Fe ₃ ²⁺	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
Elbaíte	Na	Li _{1.5} ¹⁺ Al _{1.5} ³⁺	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Fluor-elbaíte	Na	Li _{1.5} ¹⁺ Al _{1.5} ³⁺	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
Povondraite	Na	Fe ₃ ³⁺	Fe ₄ ³⁺ Mg ₂	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	O
Cromo-alumino-povondraite	Na	Cr ₆	Al ₄ Mg ₂	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	O
Fluor-buergerite	Na	Fe ₃ ³⁺	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	F
Olenite	Na	Al ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	(OH)

Subgrupo cálcico							
Flúor-uvite	Ca	Mg ₃	MgAl ₅	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	F
Uvite	Ca	Mg ₃	MgAl ₅	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	(OH)
Feruvite	Ca	Fe ₃ ²⁺	MgAl ₅	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	(OH)
Lidicoatite	Ca	Li ₂ ¹⁺ Al ³⁺	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	(OH)
Flúor-lidicoatite	Ca	Li ₂ ¹⁺ Al ³⁺	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	F

Subgrupo espaço vazio em X							
Foitite	□	Fe ₂ ²⁺ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	(OH)
Magnésio-foitite	□	Mg ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	(OH)
Rossmannite	□	Li ¹⁺ Al ₂ ³⁺	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	(OH)

Tabela 9.1 – Fórmulas estruturais generalizadas para os tipos mineralógicos de turmalinas reconhecidos pelo IMA-CNMNC, à data de 2011, adaptado de Henry et al., 2011

I.10.2. Tipologia conceptual das turmalinas coloridas

Serão citadas como relevantes para o estudo, apenas as espécies cuja existência nos corpos aplito-pegmatíticos de Arga já foi comprovada. Serão então referidas a schorl, a elbaíte e a lidicoatite (Leal Gomes, 1994, 2010b; Leal Gomes e Dias, 2009; Leal Gomes e Lopes Nunes, 1990) e a dravite (Dias, 2012). As poucas referências à ocorrência de olenite, foitite e rossmanite demonstram que são mais raras, porém têm expressão na evolução composicional, daí serem também consideradas (Leal Gomes, 2010a, 2010b; Guimarães e Leal Gomes, 2014).

Assim, as turmalinas coloridas dos corpos LCT de Arga podem exibir todas as cores do espectro visível, por vezes ocorrendo internamente zonadas ou multicolores em segmentos cristalinos diferenciados ao longo do eixo cristalográfico C , sendo que algumas delas frequentemente são transparentes chegando a possuir qualidade gemológica (Leal Gomes, 2005; 2010; Guimarães, 2014), as figuras 10, 11 e 12 representam a diversidade cromática e textural das turmalinas de Arga.

Os cristais identificados apresentam colorações e hábitos muito diferenciados, variando em função das associações mineralógicas em que ocorrem e das diferentes unidades portadoras onde ocorrem no interior dos corpos pegmatíticos (tabela 10.I).

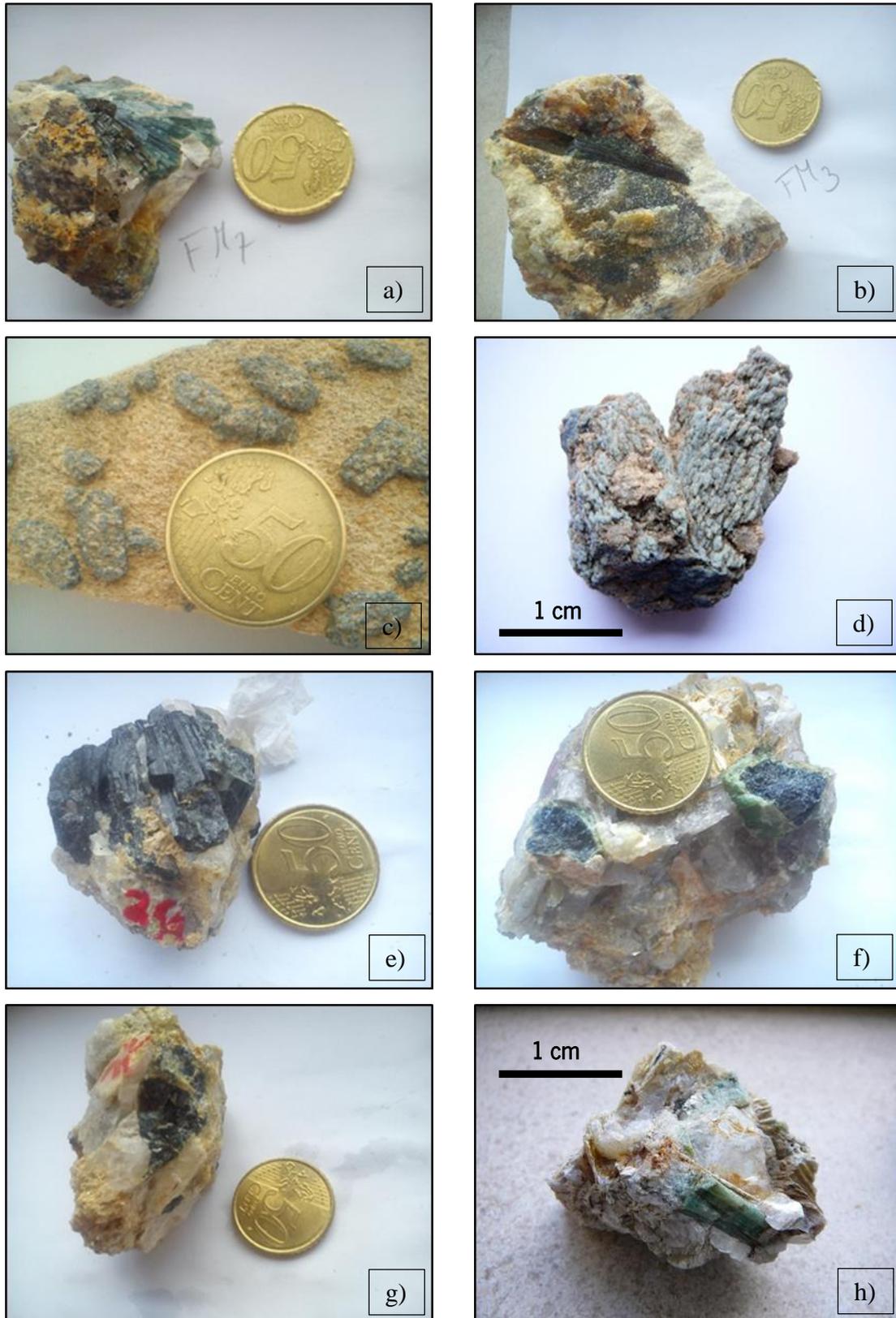


Figura 10 – Exemplos representativos da diversidade de turmalinas coloridas⁴

⁴ a) Turmalina intercrescida com feldspato potássico e petalite, do Formigoso; b) turmalina intercrescida com lepidolite em torno da petalite, do Formigoso; c) Aplito-albitico com turmalinas nodulares, da Balouca Norte; d) Turmalina nodular, da Balouca Norte; e) turmalina intercrescida com quartzo em coroa de gigafeldspato, Balouca Norte; f) Turmalina intercrescida com quartzo em crescimento miarolítico entre gigafeldspato, Balouca Norte; g) turmalina brechificada e cimentada por cookeite, Balouca Norte; h) turmalina intercrescida com moscovite e quartzo, Balouca Sul

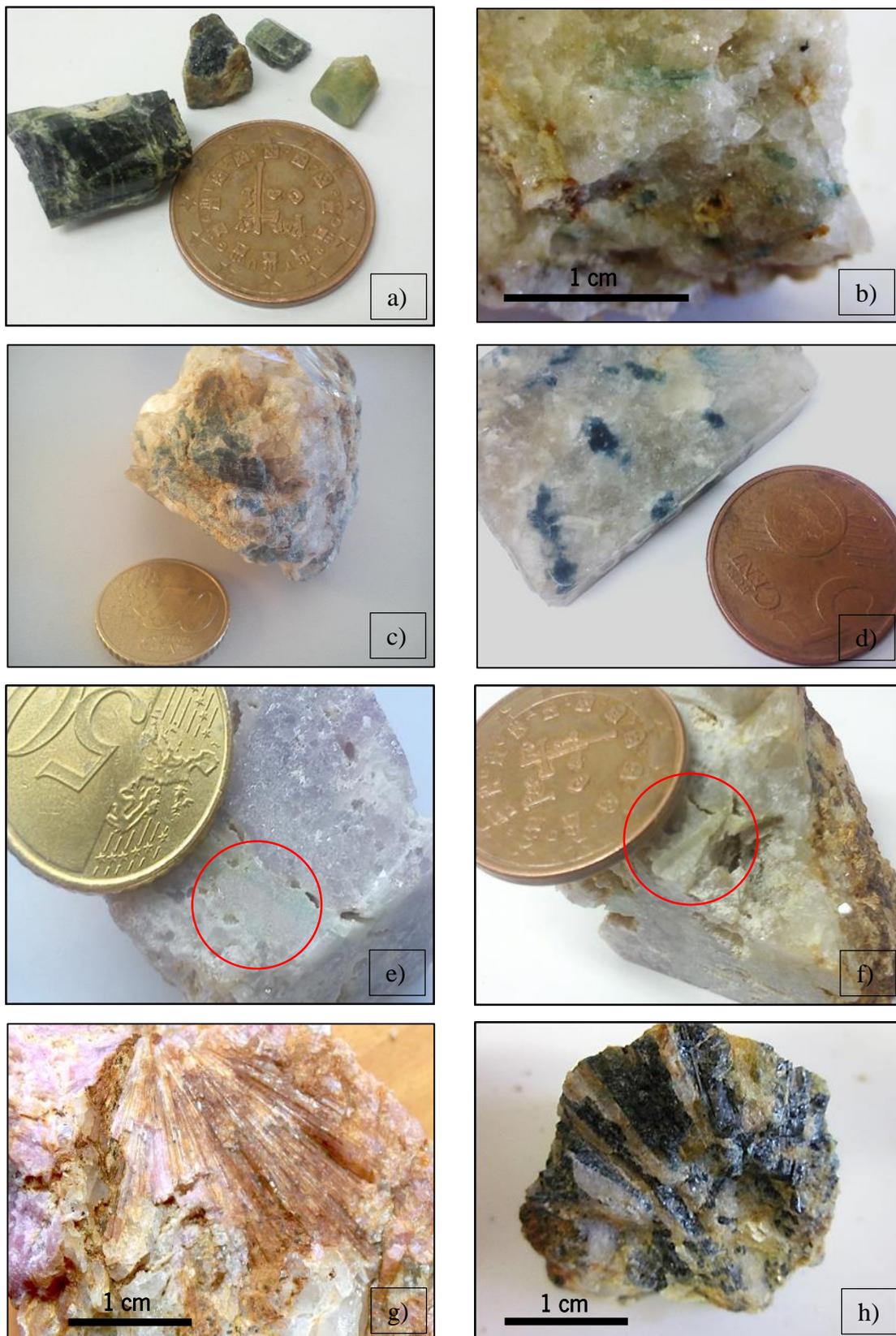


Figura 11 - Exemplos representativos da diversidade de turmalinas coloridas⁵

⁵ a) Cristais de turmalina prismáticos, da Balouca Norte; b) turmalina intercrescida com quartzo e lepidolite fina, Balouca Sul; c) turmalina intercrescida com quartzo, albite e moscovite, Balouca Sul; d) turmalina intercrescida com quartzo, amblygonite-montebrazite e micas de Li, Balouca Sul; e) turmalina zonada intercrescida com lepidolite maciça a sacaroide, Balouca Sul; f) turmalina incolor intercrescida com lepidolite maciça a sacaroide, Balouca Sul; g) turmalina radiada e parcialmente alterada, Balouca Sul; h) turmalina em intercrescimento gráfico com quartzo, Lousado

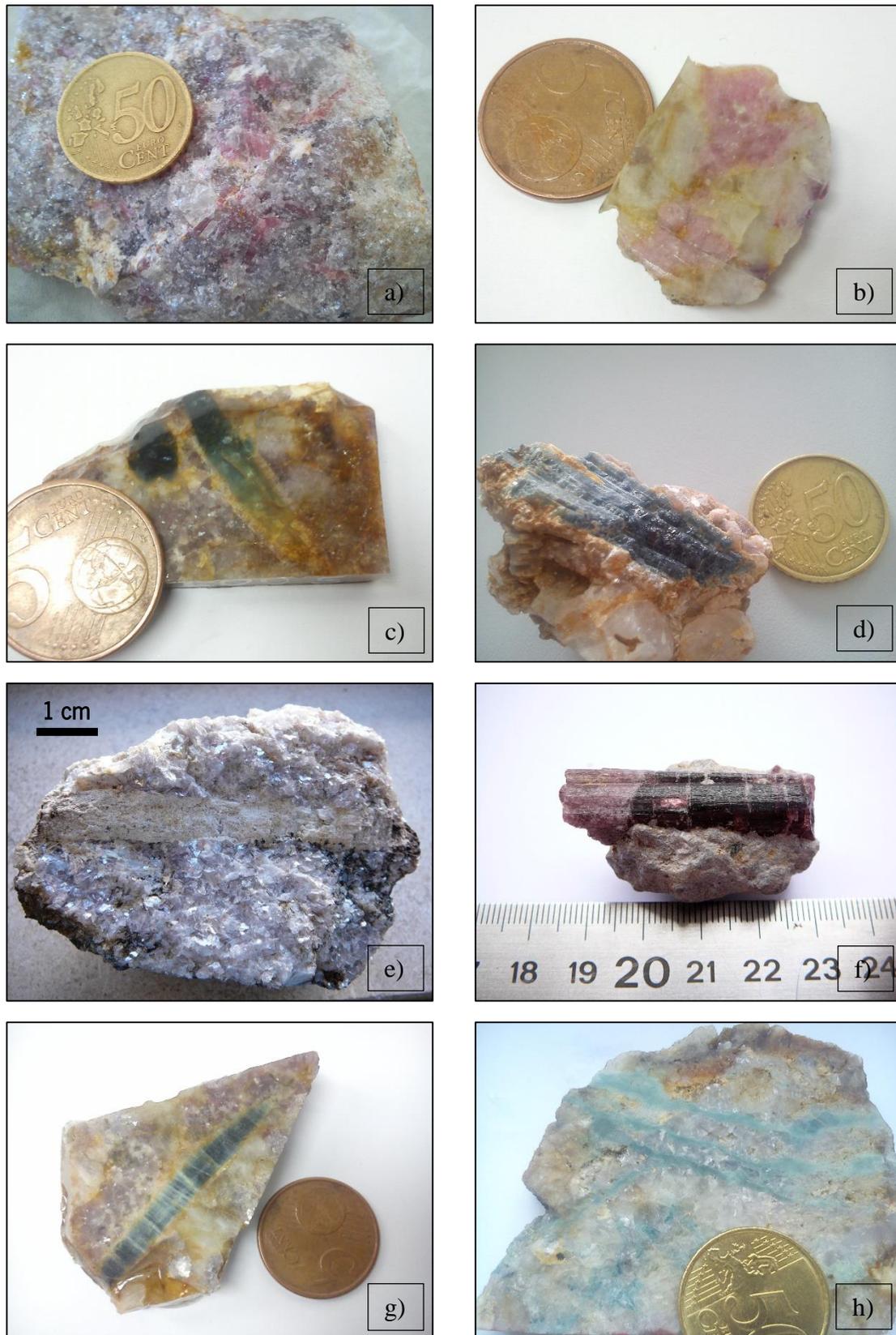


Figura 12 - Exemplos representativos da diversidade de turmalinas coloridas*

* a) Turmalina intercrescida com lepidolite e albite, Lousado; b) turmalina intercrescida com quartzo, albite clevelandítica e lepidolite, Balouca Sul; c) turmalina zonada na interfase entre feldspato e lepidolite + quartzo, Lousado; d) turmalina envolvida por lepidolite e quartzo, Lousado; e) turmalina totalmente cookeitizada intercrescida com lepidolite, Lousado; f) turmalina parcialmente cookeitizada intercrescida com lepidolite, Lousado; g) turmalina zonada na interfase entre feldspato e lepidolite + quartzo, Lousado; h) turmalina maciça a preencher veios tardios, Balouca Sul

Paragénese	Ocorrência	Descrição	Cor	Dimensão dos cristais
Albite + feldspato + quartzo ± cassiterite ± Nb-tantalatos ± lazulite	Disseminações em fácies aplíticas na zona intermédia	Nódulos de cristais muito finos subparalelos, muito corroídos	Azul escura	1 a 10 cm
Feldspato K + albite + quartzo + moscovite ± zinvaldite ± berilo ± ambignonite ± cassiterite ± tantalite	Crescimento “comb” em fácies pegmatíticas, das unidades intermédias e transição para núcleo	Cristais concentricamente zonados. Alguns encontram-se deformados e brechificados	Vários tons de verde, dominando os tons escuros	2 mm a 6 cm, sendo mais constantes os cristais de 0.6 cm
Lepidolite + quartzo ± cleveandite ± ambignonite ± topázio ± cassiterite ± tantalite ± trifilite	Massas lepidolíticas de fácies pegmatíticas de paroxismo litinífero e cavidades de corrosão do núcleo	Cristais com várias texturas e hábitos, predominantemente finos e aciculares. Ocorrendo por vezes totalmente alterados	Verdes e azuis, predominando os tons róseos. Também ocorrem cristais multicoloridos	4 mm a 10 cm, dominando os cristais de 1 cm
Moscovite + Quartzo + andaluzite + albite ± zinvaldite	Matriz micácea de metassomatismo de contacto do encaixante	Cristais muito finos que representam as bandas de turmalinização no exterior dos corpos	Castanha escura a negra	Inferiores a 0.2 mm
Polucite + quartzo + micas	Venulações tardias de polucite	Aspeto maciço conferido por deposição tardia de coloide turmalínico	Verde clara	Criptocristalina

Tabela 10.1 – Caracterização das turmalinas pegmatíticas, consoante as associações mineralógicas em que ocorrem e as posições ocupadas nas estruturas internas dos corpos portadores (adaptado de Leal Gomes, 1994; 2010)

I.11. Amostragens e localização paragenética das turmalinas coloridas

Leal Gomes (1994) no seu estudo estrutural e paragenético do campo aplito-pegmatítico de Arga apresenta como metodologia para a representação da mineralização Li (Cs), a divisão das diversas ocorrências identificadas em tipos paragenéticos essenciais, cuja representação assenta em aplito-pegmatitos de diferentes localizações.

Os corpos LCT equivalem portanto, aos definidos por este autor como portadores de mineralização Li (Cs), sendo então os “*sills*” pegmatíticos e as fácies paroxismais situadas em filões “E-W”, os principais guias para a amostragem.

Partindo disto, foram selecionados como alvos cardinais para o estudo os corpos da Balouca, Lousado e Formigoso.

De acordo com o zonamento interno dos pegmatitos heterogéneos, estabelecido por Cameron *et al.* (1949) a maior diversidade e quantidade de turmalinas coloridas (elbaítes e lidicoatites) tende a ocorrer na transição das unidades intermédias para as nucleares ou nas

unidades nucleares dos corpos pegmatíticos e principalmente nas unidades de substituição, uma vez que se tratam das unidades mais tardias dos corpos, podendo estas, porém ocorrer de forma esporádica em todo o corpo.

A amostragem foi efetuada sempre que possível *in situ* ao longo dos corpos, ou em escombrelas de antigos trabalhos mineiros. Esta procurou atingir dois propósitos, selecionar a maior diversidade de cores e atingir a maior diversidade possível de tipologias paragenéticas e texturais identificáveis em cada corpo (tabela 11.I).

Localização	Referências das amostras	Quantidade de amostras
Balouca	BN; BS; UBN; UBS	60
Lousado	LOU; LW; LE; ULE; ULW	45
Formigoso	F; FOR	15
Paiol do Formigoso	P	3
Lourinhal	L; γ L	3
Verdes	V	1
Turm. Cavalinho	CV	2

Tabela 11.I – Descrição da catalogação das amostras recolhidas

No estudo e de forma complementar, incluíram-se ainda amostras de outros corpos cuja paragénese é também litinífera e onde se registou a ocorrência turmalinas coloridas, embora com menor expressão, o corpo Paiol do Formigoso e Verdes.

Foram ainda recolhidas amostras no pegmatito do Lourinhal e de um filão cruzado, corpos pegmatíticos não litiníferos e portanto sem turmalinas coloridas; do leucogranito do Lourinhal, um granitoide sem expressão cartográfica mas que ocorre naquela localidade e por fim, amostras de turmalinitos da zona de cisalhamento do Cavalinho e do Picoto do Carvalho, formações metassedimentares que têm sido considerados como produtos de uma hidrotermalização protolítica pelítica a psamítica (Dias, 2012). A pertinência da introdução destes corpos deve-se à ocorrência de turmalina negra em todos eles, servindo como referência e auxiliando na interpretação mineraloquímica das turmalinas coloridas a partir das fácies mais precoces.

I.12. Metodologias adotadas na caracterização das turmalinas coloridas

O objetivo máximo da presente dissertação reside na classificação das turmalinas com base na sua composição e na utilização destas como marcadoras da evolução paragenética dos

corpos onde se encontram. Para se alcançar esta baliza, recorreu-se a um conjunto de metodologias e procedimentos analíticos partindo de um domínio geral, alargado - campo aplito-pegmatítico para um mais circunscrito e específico – as turmalinas coloridas.

- i. O processo metodológico iniciou-se com a revisão da literatura existente e a interpretação cartográfica da região da Serra de Arga, terminando com o processo de amostragem e recolha em campo das amostras com turmalinas coloridas
- ii. As amostras foram catalogadas em função do local e modo de ocorrência. Após a seleção das amostras que seriam submetidas ao estudo petrogenético, foram realizadas análises em Difractometria de Raios-X (DRX) de várias fases cristalinas, permitindo a identificação de fases não conhecidas e uma primeira aproximação à classificação dos tipos mineroquímicos.
- iii. O estudo petrográfico realizou-se através da observação de lâminas delgadas e superfícies polidas em Microscópio Ótico de Luz Transmitida (MOLT) e Microscópio Ótico de Luz Refletida (MOLR) e ainda em Microscópio Eletrónico de Varrimento em imagens de elétrons retrodifundidos (MEV) - (ER). A importância deste procedimento está patente na interpretação paragenética e textural, dado que esta é essencial para definir as relações genéticas entre as turmalinas e as fases associadas, identificar e interpretar as inclusões presentes nos cristais de turmalina e permite observar zonamentos composicionais, características texturais e hábitos cristalinos. Assim é possível selecionar as amostras mais favoráveis a submeter à análise pontual em microsonda eletrónica.
- iv. Com recurso às Cartas Colorimétricas de Munsell foi realizado o estudo da coloração, discriminando dentro de um conjunto de amostras selecionadas, quais as cores mais representativas e qual o alcance da variação cromática ao longo dos corpos estudados.
- v. Aquando do estudo em MEV-ER, foram realizadas ainda análises através de espectrometria de dispersão de energia de raios X (MEV-EDS). As análises obtidas são semiquantitativas, não sendo apropriadas para a identificação das turmalinas uma vez que não foram incluídas as componentes minoritárias, importantes para a sua identificação. Em relação aos minerais metálicos, a identificação é satisfatória, dado que a composição de elementos maioritários obtida permite distinguir os diferentes minerais.
- vi. As fases turmalínicas mais significativas e preponderantes para o estudo, foram submetidas a análise pontual em Microsonda Eletrónica (MSE) e obtidas as suas composições químicas.

- vii. O último procedimento baseou-se no tratamento estatístico dos dados obtidos bem como na interpretação da informação recolhida. Através das composições obtidas na microsonda, procedeu-se à identificação e classificação propriamente dita das turmalinas. A classificação realizou-se através do cálculo da fórmula estrutural, aplicando a folha de cálculo da *Microsoft Excel™*, de Tindle *et al.* (2002) e através da projeção dos dados em diagramas tipológicos com recurso ao *software* GCDKit, versão 3.0.0 (Janousek *et al.*, 2011).

METODOLOGIAS		
Processo	Técnica/método	Objetivo
Revisão bibliográfica	Cartografia Artigos, livros, comunicações, dissertações	Interpretar o tipo genético de depósito das turmalinas Identificar os corpos alvo a amostrar
Petrografia	MOLT MOLR MEV-ER Lupa binocular	Identificação das turmalinas e da paragénese portadora Análise das zonalidades e texturas internas das turmalinas
Estudo Cromático	Escala colorimétrica de Munsell	Identificar as diferentes cores presentes e avaliar a sua frequência
Mineroquímica	DRX MEV-EDS Microsonda eletrónica	Identificação e estudo da variação composicional das turmalinas
Classificação	Diagramas Cálculo da fórmula estrutural	Caracterização das espécies ocorrentes Interpretação da variação composicional no campo

Tabela 12.1 – Quadro síntese das metodologias utilizadas ao longo do estudo

CAPÍTULO II

MODOS DE OCORRÊNCIA

II.1. Tipologia paragenética dos pegmatitos turmalínicos e a sua classificação

De acordo com a classificação proposta por Černý e Ercit, (2005) para os aplito-pegmatitos, todos os corpos turmalínicos onde se recolheram amostras pertencem à classe de elementos raros, família LCT, sendo excluído o pegmatito do Lourinhal, uma vez que apresenta uma assinatura NYF.

Dos três corpos paradigmáticos onde se centrou o estudo mineroquímico das turmalinas, o corpo da Balouca é o que apresenta maior diversidade paragenética. Representa um “*sill*” aplito-pegmatítico intersectado por um filão “E-W”. É possível que este possa ter resultado da fracionamento com enriquecimento culminante dos magmas que originaram o “*sill*” (Leal Gomes, 1994). O mesmo autor dividiu a ocorrência em Balouca Norte quando se refere às paragénese do corpo “*sill*” e Balouca Sul quando se refere às do filão “E-W”. Esta nomenclatura terá, nesta dissertação o mesmo significado.

O “*sill*” da Balouca Norte caracteriza-se por uma fácies grosseira de bordadura com gigafeldspatos potássicos, afetados pelo fluxo de um magma que origina uma fácies aplitico-albítica interna. Nessa fácies ocorrem nódulos de turmalina disseminados, que marcam as fluidades magmáticas do aplito. Em continuidade ocorrem pequenas lenticulas pegmatíticas com abundante turmalina colorida (Leal Gomes, 1994).

A paragénese da Balouca Sul apresenta um paroxismo evolutivo litínifero, expresso na abundância de lepidolite e pela ocorrência de turmalinas coloridas de vários tipos cromáticos e arranjos geométricos. Observam-se texturas de reativação e de cristalização “*in situ*”, onde os arranjos mais tardios na sucessão paragenética primária correspondem a texturas orbiculares de turmalina rósea com lepidolite (Leal Gomes, 1994). Morfologicamente é um filão pegmatítico zonado, com enchimentos em “*telescoping*”, apresentando uma zona de bordadura, dominada por quartzo, moscovite e turmalina, com frequentes massas de substituição. Na zona nuclear, com abundante lepidolite e quartzo, ocorrem preenchimentos de fraturas e cavidades tardios (Leal Gomes, 1994).

No Lousado ocorre um conjunto de pequenos pegmatitos internamente zonados, agrupados e com geometrias em “*échelon*” num acidente E-W tardio que interceitou um “*sill*” aplito-pegmatítico petalítico. As suas paragénese internas constituem-se em grande parte, por evolução em *subsolidus*, metassomático, das massas ou grandes cristais de petalite precursora. Apresentam abundante lepidolite e quartzo e a mineralização em turmalina colorida é comum. Além destes, as paragénese possuem micas, albite, cassiterite, ambligonite-montebrasite, cookeite, cleavelandite e raramente Nb-tantalatos, berilo, petalite e espodumena. A ocorrência Lousado Oeste (W) representa as paragénese mais evoluídas, com lepidolite maciça e turmalina e Lousado Este (E) representa as paragénese mais precoces. A abundância de lepidolite permite classificar este pegmatito LCT como pertencente ao sub-tipo com lepidolite.

O corpo do Formigoso é também do tipo complexo, sub-tipo com petalite, pois trata-se de um “*sill*” aplito-pegmatítico petalítico muito possante, não zonado que se caracteriza pela ocorrência de megacristais de petalite e feldspato potássico em “*comb*” organizados em bandas numa fácies aplítico-albítica. Na sua paragénese além dos minerais já descritos e da turmalina, ocorre ainda quartzo, micas, ambligonite, espodumena, ganite, cassiterite, Nb-tantalatos e lepidolite (Leal Gomes, 1994).

II.2. Unidades portadoras de turmalinas na estrutura interna dos pegmatitos

As relações paragenéticas e texturais observadas macroscópica e microscopicamente entre as turmalinas e os diferentes minerais associados permitiram caracterizar 29 modos de ocorrência que representam intercrescimentos diferentes desta ao longo da estrutura interna dos corpos aplito-pegmatíticos de Arga, definindo as unidades portadoras de turmalina.

II.2.1. Unidades de equilíbrio com a rocha encaixante

Esta unidade observa-se em todos os aplito-pegmatitos estudados, resumindo-se especialmente ao contacto do corpo com as rochas encaixantes. Manifestam a ocorrência de abundante turmalina no exterior da caixa pegmatítica, expressando o metassomatismo do encaixante (turmalinização) definindo uma salbanda. Em todos os casos a turmalina ocorre muito abundante, associada a quartzo e moscovite, com uma cor na maioria dos cristais negra, podendo observar-se cristais com cor verde ou castanho muito escuro. Os cristais são automórficos a

subédricos, exibindo um hábito prismático a acicular com dimensões muito reduzidas, sendo inferiores a 1 mm segundo \underline{a} e milimétricas segundo \underline{c} .

Na faixa de turmalinização do micaxisto encaixante no corpo da Balouca Sul, a turmalinização afetou ainda um veio de segregação quartzo-andaluzítico adjacente, observando-se aí uma turmalina de cor castanha, ocorrendo ocasionalmente com cor verde clara ou castanha clara, atingindo os 4 mm de diâmetro em \underline{a} e 1 a 2 cm segundo \underline{c} (Leal Gomes, 2005).

II.2.2. Unidades primárias de bordadura

Nos corpos do Lousado e Balouca, esta unidade caracteriza-se por uma associação de moscovite e turmalina a definirem um greisen de bordo, considerado endometassomático somente no contacto do corpo da Balouca e já no corpo do Lousado é endometassomático para o interior da caixa pegmatítica. Neste greisen, em crescimento “*comb*” com a moscovite ocorrem turmalinas negras a verde escuras automórficas a subédricas e que atingem uma dimensão máxima em \underline{c} de 2 cm. Na imagem em MOLT da figura 13a observam-se cristais muito fraturados desta turmalina, que apresentam por vezes, texturas de dissolução nos bordos.

II.2.3. Unidades intermédias primárias

No corpo do Lousado, a unidade intermédia apresenta dois tipos de ocorrência de turmalina, uma verde clara, mais precoce, intercrescida ou radiada entre as lâminas de moscovite com crescimento “*comb*” e alguma albite e uma outra com tons verdes azulados muito escuros, intercrescida com albite ou apresentando um intercrescimento gráfico com quartzo. Esta última por vezes apresenta cristais que atingem os 4 cm segundo o eixo \underline{c} , embora a maioria apresente-se apenas entre 1 e 2 cm. O estudo petrográfico demonstra que ambas as turmalinas são subédricas e com hábito prismático bem definido, apresentam uma deformação bem marcada podendo-se observar ruturas com deslocamento, preenchidas por micas. As turmalinas com intercrescimento gráfico com o quartzo apresentam um zonamento ótico com duas zonas cromáticas que variam de azul-escuro na parte nuclear a azul claro no bordo (fig. 13b e c).

A unidade intermédia do filão paroxismal da Balouca Sul distingue-se em três zonas marcadas pela diferente ocorrência de turmalinas. Na zona mais externa dessa unidade e

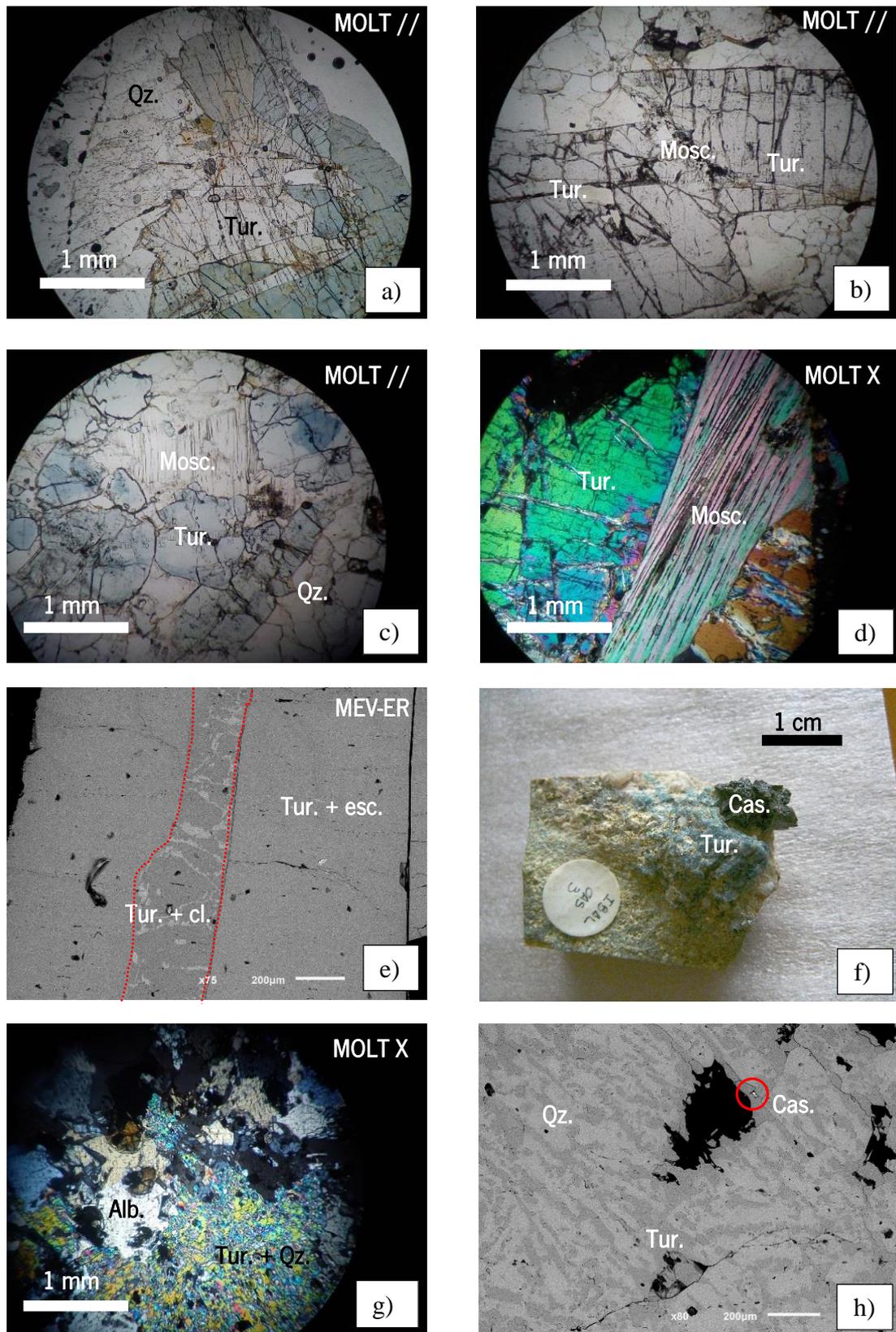


Figura 13 – Principais aspetos texturais e paragenéticos das turmalinas⁷ Tur.-turmalina, Qz.-quartzo, Mosc.-moscovite, Cas.-cassiterite e Alb.-albite.

⁷ a)- Turmalina em greisen de bordo, muito fraturada. b)- turmalina em intercrescimento gráfico com quartzo, exibindo rutura preenchida por mica. c)- Zonalidade ótica de turmalina em intercrescimento gráfico com quartzo. d)- turmalina intercrescida com moscovite "comb". e)- zonamento composicional, com exsoluções de quartzo nos bordos. f)- Carácter satélite da cassiterite em nódulos de turmalina. g)- associação nodular principal, com albite corroída. h)- Destaque da associação nodular, com quartzo nos interstícios e pequenos grãos de cassiterite e Nb- tantalatos

intercrescida com a moscovite ocorre uma turmalina verde com crescimento orientado segundo a clivagem desta (fig. 13d). Apresenta uma zonalidade ótica, marcada por um núcleo mais escuro que o bordo, que apresenta exsoluções de quartzo (fig. 13e).

A parte mais interna da unidade intermédia apresenta uma turmalina azul escura que ocorre intercrescida com quartzo, amblygonite-montebrazite e zinvaldite e ao longo de toda a unidade ocorre ainda de forma indiferenciada uma turmalina verde intercrescida com albite e quartzo.

Em ambos os casos, as turmalinas ocorrem disseminadas, não apresentando uma orientação definida, frequentemente observam-se inclusões de zinvaldite e quartzo (fig. 14a). Todos os cristais desta unidade são subeuédricos com terminações deformadas ou corroídas.

No “*sill*” da Balouca Norte, logo a seguir ao greisen de bordo, na zona marginal mural ocorre uma fácies aplítica de tipo “*line rock*” com turmalina nodular azul disseminada (Leal Gomes, 1994). O mesmo autor referiu que o núcleo destes nódulos pode ser fosfatado (com lazulite-scorzalite) ou apresentar uma turmalina azul, sendo a bordadura constituída por uma turmalina azul a azul esverdeada. Destacou ainda a ocorrência frequente de cassiterite e Nb-tantalatos em agregados satélite (fig. 13f).

A associação nodular principal é caracterizada por turmalinas muito finas agregadas, com quartzo em inclusões e nos interstícios destas, observando-se por vezes albite corroída e micas. Nos espaços intergranulares dos nódulos ocorre agregados de albite associada a amblygonite ou quartzo de geração mais tardia, com grãos muito pequenos de cassiterite, Nb-tantalatos e volframite (figs, 13g e 13h).

II.2.4. Unidades nucleares, miarolíticas ou não

A unidade nuclear do filão do Lousado abrange o núcleo quartzoso e as massas de lepidolite adjacentes, caracterizando dois tipos de ocorrência de turmalina, uma envolvida por lepidolite e quartzo e outra inclusa no núcleo quartzoso.

A turmalina envolvida na matriz de lepidolite e quartzo apresenta uma cor verde azulada escura com cristais a atingir os 5 cm ao longo de \bar{c} ou rósea com cristais de menores dimensões. Ocorre muito fraturada e deformada, mas ainda exibindo o hábito prismático característico (fig.14b).

A turmalina que ocorre inclusa no quartzo apresenta uma cor rósea, incolor, verde clara ou bicolor com zonamento concêntrico a \underline{c} inverso (núcleo verde e bordo róseo). Os cristais são pequenos, prismáticos, euédricos a subeuédricos, são translúcidos a transparentes, não apresentando inclusões, porém são fraturados.

Na periferia do núcleo quartzoso da Balouca Sul, à semelhança com Lousado, ocorrem grandes massas de lepidolite que variam na textura e na granulometria, sendo que a cada textura está associado um tipo diferente de ocorrência de turmalina. Desta forma observa-se uma turmalina rósea intercrescida com lepidolite sacaroide a maciça com albite clevelandítica e outra também rósea intercrescida ou disseminada na matriz lepidolítica maciça.

Em ambas as situações as turmalinas observam-se subeuédricas, fraturadas e com inclusões de quartzo e lepidolite, como se observa na figura 14c. Na matriz lepidolítica grosseira ocorrem disseminados cristais pouco fraturados e muito finos, que por serem muito alongados parecendo ter um hábito acicular. Intercrescidos com a lepidolite sacaroide e albite, por vezes, os cristais apresentam-se irradiados em feixes, a partir da albite, constituindo uma faixa turmalínica, que ritmada com faixas de lepidolite, de acordo com Leal Gomes (1994), definem texturas orbiculares (fig.14d).

No corpo da Balouca Norte, nas partes internas observa-se uma fácies pegmatítica greisenizada, na qual ocorrem cristais de turmalina verde escura, intercrescidos com gigafeldspatos potássicos alterados, ou com albite e quartzo. Esta turmalina exhibe cristais de grandes dimensões que foram brechificados e cimentados por cookeite. Geralmente a bordadura destes apresenta-se também cookeitizada (fig. 14e).

No núcleo deste corpo, formaram-se em torno de gigafeldspatos potássicos coroas pegmatíticas constituídas por quartzo, albite, moscovite, apresentando uma turmalina verde escura como acessório. Esta turmalina ocorre também nos espaços intersticiais remanescentes entre as coroas pegmatíticas formadas, com crescimento miarolítico. Em ambos os modos de ocorrência os cristais de maiores dimensões estão fraturados, não apresentando inclusões nos clastos, como é destacado na figura 14f. Por vezes as fraturas estão preenchidas por cookeite.

A preencher os espaços intersticiais e miarolíticos referidos, associada a episódios de alteração hidrotermal ocorre cookeite, no seio da qual surge uma turmalina mais tardia. Esta turmalina apresenta cor verde clara em cristais prismáticos pequenos, podendo ainda apresentar um crescimento epitáxico sobre as turmalinas verde escuras referidas anteriormente. Em MOLR não apresentam inclusões e ocorrem pouca fraturadas (fig. 14g).

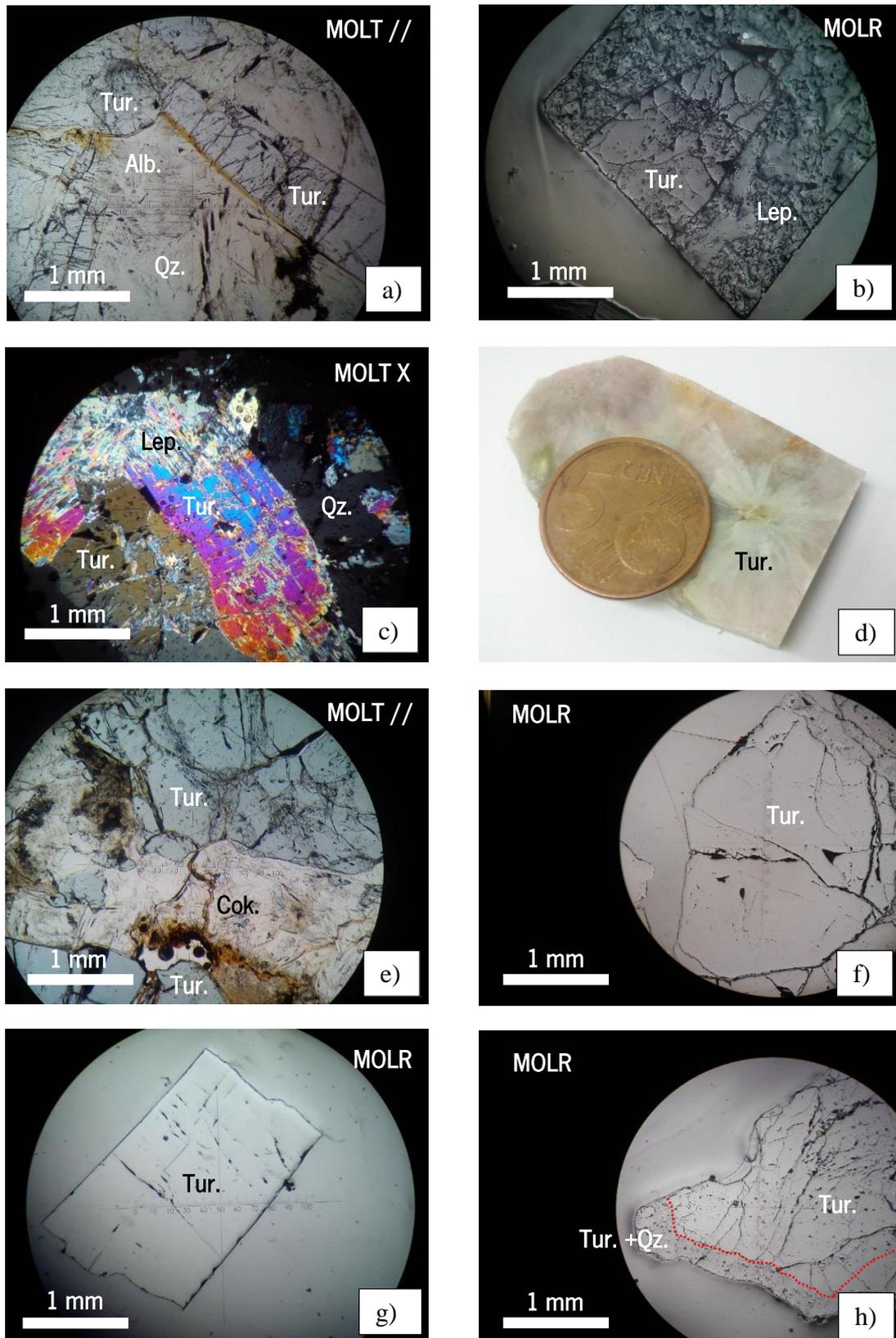


Figura 14 - Principais aspetos texturais e paragenéticos das turmalinas^a Tur.-turmalina, Qz.-quartzo, Lep.-lepidolite, Cok.-cookeite e Alb.-albite.

^a a)- turmalina disseminada em quartzo e alb com inclusões de quartzo. b)- cristal de turmalina intercrescido com lepidolite, muito fraturado. c)- lepidolitização de turmalina muito deformada. d)- turmalina orbicular com parte nuclear clevelandítica. e)- turmalina brechificada e cimentada por cookeite. f)- Turmalina brechificada, com os clastos turmalínicos muito homogéneos. g)- cristal transparente de recristalização de turmalina no seio de cookeite. h)- turmalina bicolor, observando-se o sobrecrecimento epitáxico de turmalina rósea mais alterado.

II.2.5. Frentes turmalínicas fracionais

As frentes turmalínicas fracionais referem-se ao conjunto de modos de ocorrência de turmalina onde se observa a evolução do cristal ao longo da fracionamento do corpo portador.

No corpo do Lousado a turmalina inicia o seu crescimento em interface com o quartzo e feldspato potássico e termina no seio da massa lepidolítica. A base dos cristais é geralmente mais fina no feldspato e apresenta só uma cor verde escura. À medida que vai penetrando na lepidolite, vai alargando de diâmetro e passa a apresentar um crescimento epitáxico de turmalina rósea sobre o núcleo azul. Tendem a ocorrer radiadas a partir do feldspato para o interior da lepidolite e é junto desta que ocorrem mais alteradas, observando-se na figura 14h, a alteração da zona rósea.

No corpo da Balouca Sul, ocorrem turmalinas verdes a azuis claras ou incolores intercrescidas com quartzo e lepidolite fina, apresentam-se muito fraturadas e com inclusões de lepidolite e menor quartzo (fig. 15a).

Junto destas mas intercrescida com albite e quartzo, ocorre uma outra turmalina azul clara, bastante fraturada e com inclusões de quartzo e albite. Nas primeiras é preponderante a lepidolitização e nas segundas a albitização.

II.2.6. Unidades de substituição

As unidades de substituição em turmalinas do corpo do Lousado concentram-se na parte nuclear deste. A substituição típica é representada pela cookeitização total ou parcial de turmalinas intercrescidas com lepidolite e ambligonite-montebrasite.

Os cristais de turmalina róseos, alguns de grandes dimensões (superiores a 10 cm), ocorrem com maior ou menor grau de alteração, substituídos por cookeite (fig. 15b). As relíquias de turmalina resistentes à alteração são róseas claras e apresentam inclusões de cookeite e os bordos corroídos. Os cristais que não estão alterados ou apresentam pouca alteração têm dimensões mais modestas, ocorrem pouco fraturados e com inclusões de quartzo nas zonas de bordo (fig. 15c).

No corpo do Lousado a manifestação mais tardia de turmalina diz respeito à ocorrência de uma turmalina incluída em cookeite tardia, numa recristalização cavernosa (semelhante a uma cavidade), por reprecipitação da turmalina.

No corpo da Balouca Sul, no interface entre a zona intermédia e o núcleo ocorre uma turmalina intercrescida com cookeite e alguma lepidolite, apresentando ainda quartzo nuclear miarolítico, numa cavidade de corrosão. Apresenta cristais prismáticos com cor azul e verde pálida ou róseos, automórficos.

II.2.7. Preenchimentos turmalínicos venulares ou brechoides

Situada a preencher fraturas tardias que atravessam as paragénese nucleares do corpo da Balouca Sul, ocorre uma turmalina verde, maciça associada a cookeite (fig. 15d). É a ocorrência mais tardia de turmalina colorida nos corpos aplito-pegmatíticos de Arga apresenta por vezes texturas colofórmicas, indicando uma deposição geliforme. Apresenta uma textura criptocristalina, com cristais alongados e fraturados.

II.2.8. Unidades do corpo do Formigoso

Por não apresenta uma zonalidade bem definida, as unidades portadoras de turmalina do corpo do Formigoso, não se enquadram nas descritas anteriormente, sendo necessário descrevê-las separadamente.

Uma turmalina verde escura ocorre entre bandas de pegmatito, intercrescida com ambligonite-montebrazite ou microclina branca, definindo unidades venulares em ambientes dilatacionais tardios. É automórfica, prismática e os cristais atingem 2 cm de alongamento máximo em c .

No corpo, nas bandas pegmatíticas de petalite e feldspato de génese mais tardia observam-se dois tipos de turmalinas ocorrentes. Uma turmalina verde escura intercrescida com quartzo e petalite apresentando-se agregada em feixe com textura radial, orientada segundo o crescimento do quartzo. Associadas a esta turmalina ocorrem, pequenas manifestações de tantalite, que apresentam sincristalização com a turmalina, destacadas pela textura gráfica entre ambas (fig. 15e).

Nessas bandas ainda ocorre uma outra turmalina, que apresenta uma cor verde clara. Esta inicia o crescimento em interfase feldspato potássico-petalite (fig. 15f) e termina já no interior da petalite apresentando aí uma cor mais escura. Na interfase observam-se em feixes de pequenos cristais radiados, ocorrendo no interior da petalite somente cristais subeuédricos prismáticos.

A ocorrência mais tardia de turmalina no corpo do Formigoso, representada na figura 15g, observa-se em frentes reacionais de gênese hidrotermal, onde de forma aureolar em torno da petalite ocorre uma massa de lepidolite. Intercrescida com a lepidolite e no interior dessa massa ocorre uma turmalina automórfica, prismática e apresentando uma cor verde escura.

II.2.9. Unidades portadoras dos restantes corpos

O corpo do Paiol do Formigoso é um aplito-pegmatito pouco expressivo que apresenta uma fácies fina aplítica e uma unidade pegmatítica com feldspato K, quartzo e petalite. A turmalina identificada apresenta uma cor verde e ocorre disseminada na fácies aplítica, sob a forma de pequenos cristais muito fraturados.

O corpo aplito-pegmatítico de Verdes apresenta amblygonite e espodumena disseminadas na fácies aplítico-albitica e espodumena automórfica em estruturas oclares a lenticulares, numa fácies pegmatítica (Leal Gomes, 1994; Leal Gomes e Lopes Nunes, 1990). A turmalina ocorre disseminada na fácies aplítica, apresentando-se bastante fraturada, comparativamente com o Paiol do Formigoso esta apresenta maiores dimensões e exibe uma cor verde mais clara.

O corpo do Lourinhal distingue-se dos restantes corpos, pois apresenta uma assinatura geoquímica NYF. É um pegmatito helicoidal, zonado, com unidades ricas em paragêneses fosfatadas, feldspato potássico predominante nas unidades internas e apresenta berilo e outros minerais de Be com frequência ao longo de todo o corpo (Leal Gomes, 1999). Este corpo está espacialmente relacionado com o leucogranito turmalínico do Lourinhal, onde ocorre uma turmalina negra de dimensões consideráveis, podendo alcançar 1 cm de comprimento em *c.* A turmalina do pegmatito do Lourinhal é também negra mas de maiores dimensões (até 2cm), ocorre intercrescida em “comb” com quartzo e moscovite. Ocorre corroída nas terminações e apresenta uma zonalidade ótica que varia de castanho a cinza.

Os turmalinitos amostrados pertencem às litologias metassedimentares encaixantes, correspondendo uma amostra, a um turmalinito estratiforme do Picoto do Carvalho, que por se situar próximo de um corpo aplito-pegmatito LCT, as suas turmalinas podem apresentar composições originadas pela influência do metassomatismo aquando da intrusão deste corpo. A outra amostra corresponde a um turmalinito bandado ocorrente no Cavalinho relacionado com uma zona de cisalhamento polifásico geradora de mineralizações metálicas. Ambas as amostras apresentam leitões de turmalinas com maior dimensão e leitões de turmalinas de dimensão mais

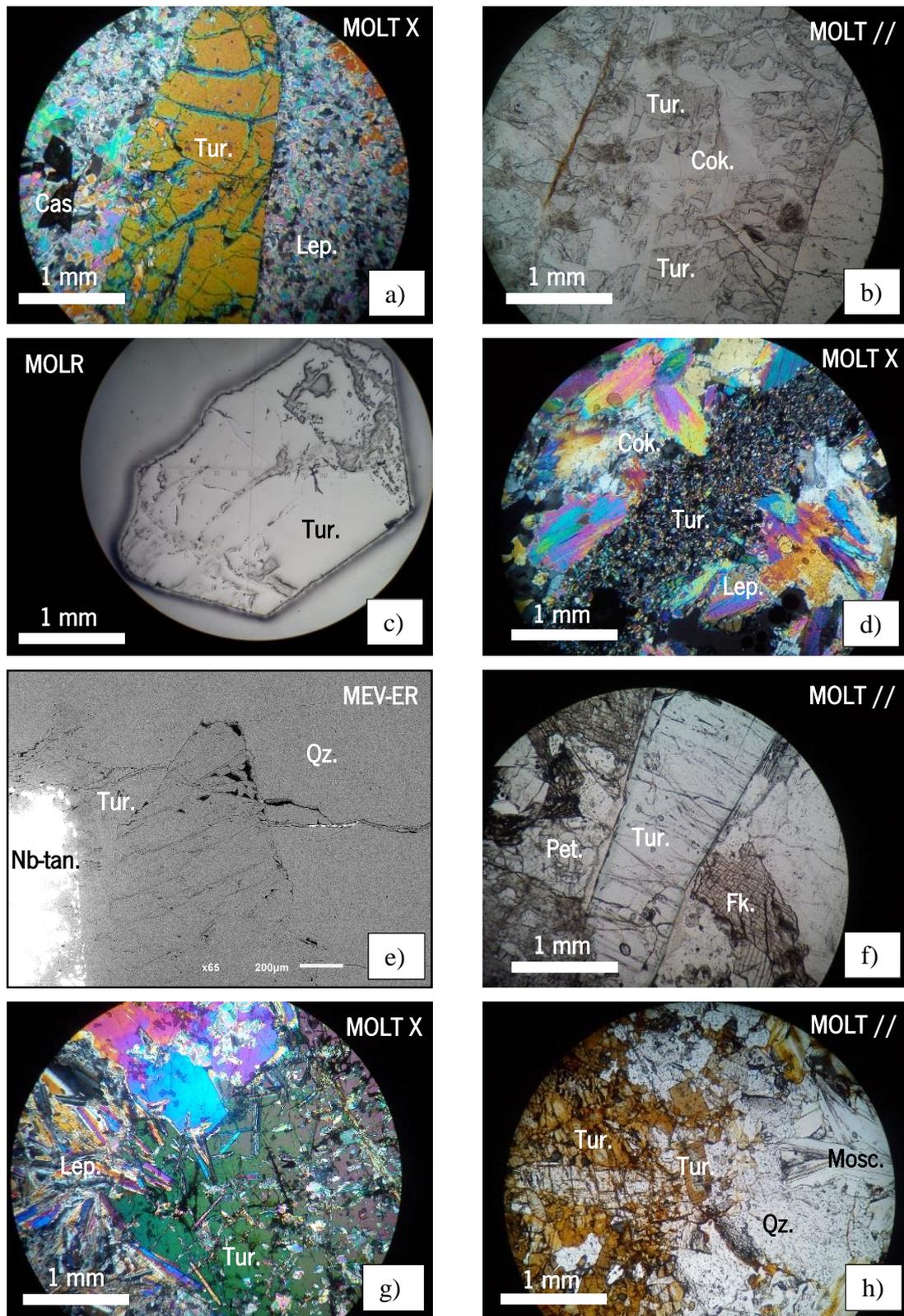


Figura 15 - Principais aspectos texturais e paragenéticos das turmalinas⁹. Tur.-turmalina, Qz.-quartzo, Lep.-lepidolite, Mosc.-moscovite, Fk.-feldspato potássico, Cok.-cookeite e Cas.-cassiterite.

⁹ a)- Alteração lepidolítica nas fraturas da turmalina, observando-se um cristal de cassiterite próximo. b)- Cookeitização quase total de turmalina rósea. c)- Cristal euédrico não alterado, disseminado na matriz lepidolítica d)- Veio tardio de turmalina criptocristalina associada a cookeite. e)- Intercrescimento gráfico entre turmalina e tantalite. f)- Turmalina intercrescida com feldspato e petalite. g)- Turmalina tardia intercrescida com lepidolite, apresentando inclusões de lepidolite em palhetas finas. h)- Aspecto textural do turmalinito do Cavalinho, com zonamento ótico. As turmalinas concentram-se em leitos, intercalados por quartzo, micas e feldspatos.

reduzida, intercalados por leitos de quartzo, feldspatos e micas. Apresentam um zonamento ótico, de 2 a 3 zonas com cores a variar entre o castanho claro e castanho escuro a cinza e castanho claro (fig. 15h). Os cristais são euédricos a subeuédricos e apresentam-se corroídos nos bordos (Dias, 2012).

Considerando os diferentes modos de ocorrência das turmalinas coloridas de Arga apresentados e aplicando as temperaturas de homogeneização obtidas no estudo de inclusões fluídas de turmalinas destas ocorrências (Leal Gomes, 2003; 2005), é possível definir uma aproximação ao quadro da fracionamento das turmalinas coloridas (fig.16).

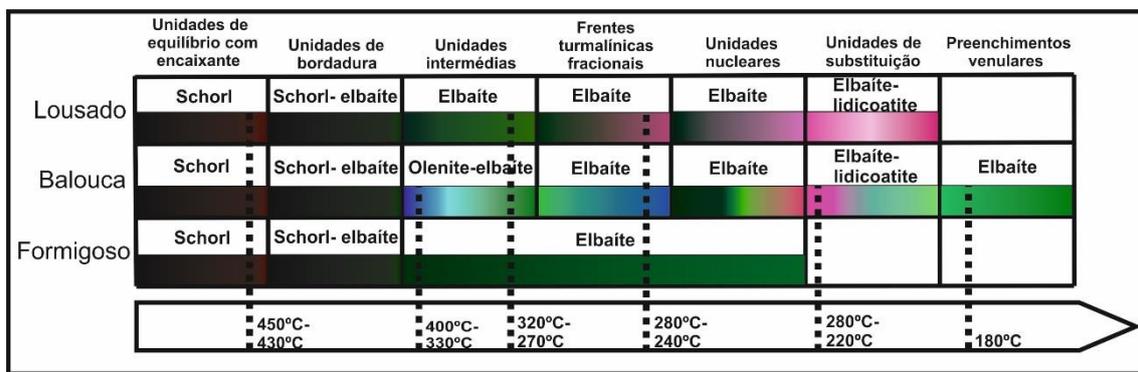


Figura 16 - Esquema aproximado da fracionamento das turmalinas coloridas, com as temperaturas aproximadas de cristalização obtidas em Leal Gomes 2003; 2005.

CAPÍTULO III

COLORAÇÃO

III.1. Conceitos essenciais para cromatização turmalínica

As características que definem a qualidade das pedras preciosas enquanto gemas são: cor, claridade, talhe e peso, mas quando se trata de turmalinas, a cor é a mais importante característica no que diz respeito à valorização económica destas. Quanto mais rara e intensa for, mais valiosa será a gema, não descurando no entanto as outras características que devem ser sempre também ponderadas (Agostinho e Nascimento, 2010).

A definição de cor tem de ser, portanto, bem explícita para que se compreenda o porquê da sua variação nas turmalinas. Os comprimentos de onda do espectro eletromagnético que são perceptíveis a olho humano e, portanto, definem o termo luz, enquadram-se numa faixa denominada de Espectro de Luz Visível, que compreende o conjunto de espectros das cores que conseguimos discernir. Desta forma, cada cor tem um comprimento de onda específico (figura 17A). A luz que atinge um mineral pode ser refletida ou absorvida por este e ainda, caso seja translúcido ou transparente, pode ser transmitida. Assim, a cor que o objeto apresenta aos nossos olhos resulta da luz que é devolvida pela sua superfície (figura 17B) (Cavallaro, 2008).

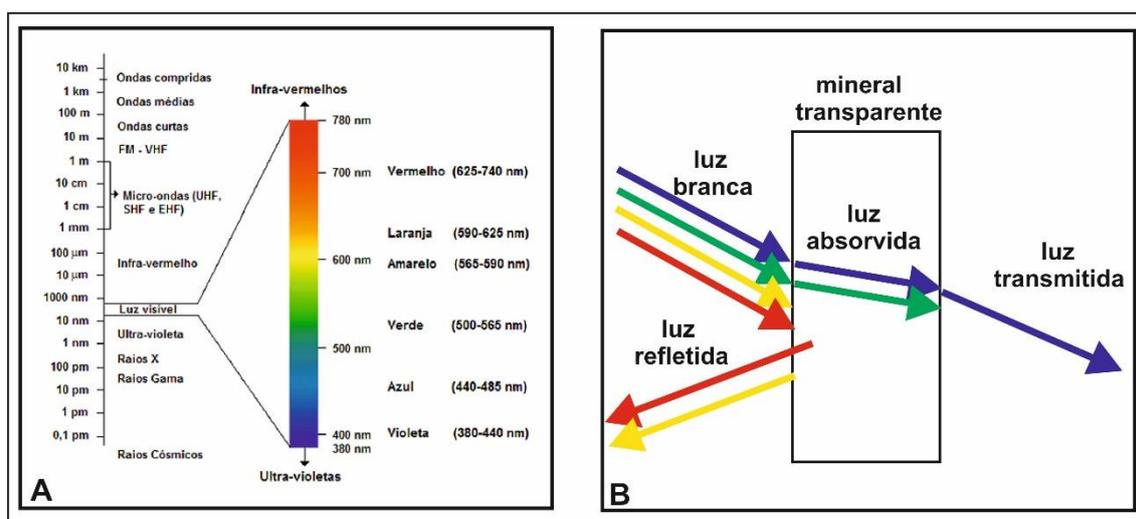


Figura 17 – A: Enquadramento da Luz Visível, no espectro eletromagnético, retirado de http://ctborracha.com/?page_id=1646. B: Representação esquemática dos diferentes comportamentos da luz quando encontra um mineral transparente

Como os elementos fundamentais que definem a estrutura cristalina das turmalinas (Si, Al, B) apresentam configurações eletrônicas que permanecem estáveis, não sendo estimulados pela luz, originam cores brancas ou ficam incolores.

Porém, a origem da cor nas turmalinas é complexa e fundamenta-se na ocorrência de determinados elementos metálicos em quantidades traço (teores reduzidos o suficiente para não influenciar a estequiometria do cristal), que ao funcionarem como impurezas na rede cristalina, vão absorver e refletir a luz de forma diferente, afetando a cor da turmalina, sendo por isso designados por cromóforos. Como estes elementos ocorrem em quantidades muito reduzidas nas turmalinas, estas são consideradas alocromáticas (Castañeda *et al*, 2006; Krambrock, *et al*, 2002; Nassau, 1978; Read, 2005).

Nas turmalinas, além da cor originada pela sua composição e estrutura cristalina, ainda se podem observar efeitos óticos. O pleocroísmo é um efeito ótico provocado pela refração dupla da luz no cristal. Esta ao seguir percursos diferentes ao longo do cristal absorve diferentes espectros de cores, aparentando ter mais que uma cor em função do ângulo em que é observado (Hughes, 2014). Outro efeito ótico observado nas turmalinas é o “*chatoyancy*” ou efeito olho-de-gato (figura 18), que é causado pela reflexão de fibras paralelas, inclusões de outros minerais ou canais paralelos com bolhas de líquido ou gás, que ocorrem no interior do cristal, originando uma faixa de brilho mais intenso que lembra os olhos dos felinos (Fritsch e Rossman, 1988a; Read, 2005).



Figura 18 – Exemplos de turmalinas com talhe em cabochão destacando o efeito olho-de-gato, retirado de www.gemselect.com/cats-eye-tourmaline/cats-eye-tourmaline-333936.php

Decorrente da sua cristalização e crescimento nos sistemas graníticos residuais, a enorme diversidade de cores que caracterizam as turmalinas deve-se então à concentração e variação dos elementos cromóforos nestes sistemas (Read, 2005). No entanto, os cromóforos por si só não justificam toda a cromatização das turmalinas, sendo necessário juntar a estes, distorções cristalográficas ao nível eletrónico, defeitos na rede cristalina e os centros de cor (Castañeda *et al*, 2006; Fritsch e Rossman, 1987; Krambrock, *et al.*, 2002; Nassau, 1978; Read, 2005).

III.2. Elementos cromóforos e “colour centers”- centros de cor

O processo de cromatização explica-se ao nível atómico, de acordo com a Teoria do Campo Cristalino. Os subníveis atómicos “d” dos iões metálicos não estão totalmente preenchidos por eletrões e para os completar, os iões têm de excitar um eletrão e transferi-lo de um nível de energia inferior. Conseguem-no absorvendo um comprimento de onda específico da luz incidente. Neste processo, os restantes comprimentos de onda serão transmitidos, afetando a cor que é observada. Estes iões são então considerados como elementos cromóforos (Nassau, 1978). Os cromóforos correspondem portanto aos elementos metálicos, cujo número atómico encontra-se entre 22 e 29, correspondendo aos elementos Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, todos eles passíveis de serem incorporados como impurezas na estrutura cristalina das turmalinas.

A cor pode também ser explicada através de mecanismos que envolvem a combinação de dois ou mais iões. Mecanismos esses que são a transferência de carga entre iões e a transição de pares iónicos.

Denomina-se transferência de carga, ao mecanismo que absorve energia ao transferir um eletrão de um átomo para outro, de forma semelhante ao que ocorre com os cromóforos, diferindo destes no sentido em que os eletrões saltam de um ião para outro vizinho (Fritsch e Rossman, 1988b). Este mecanismo pode operar de duas formas:

- a) Centros de transferência de carga, Oxigénio → Metal, que originam cor devido à transferência de eletrões entre os iões de Oxigénio e os iões metálicos vizinhos. Como as absorções realizadas por transferência de cargas entre o oxigénio e um metal são muito mais fortes do que as do metal isolado, traduzem-se em cores mais intensas.
- b) O processo de transferência de carga intervalência, ou IVCT (do inglês: “*intervalence charge-transfer*”), ocorre quando a troca de eletrões é realizada entre dois iões metálicos, sendo na maioria das vezes, entre iões do mesmo metal mas com estados de oxidação

diferentes. O caso mais comum é o do ferro, onde a transferência de elétrons entre Fe^{2+} e Fe^{3+} , vai alterar os teores de cada composto e condicionar as cores do cristal. A transferência de carga intervalência pode ocorrer também entre iões metálicos $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ que produz a cor azul atribuída às safiras, cianite e benitoite e $\text{Mn}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ que tem sido proposta como responsável pela cor amarelo-esverdeado de turmalinas ricas em Mn (Fritsch e Rossman, 1988b).

Outro processo considerado como atuante na cromatização das turmalinas, são os centros de cor. Estes correspondem a defeitos estruturais que se originam aquando da exposição natural à radiação X e gama, dos isótopos radioativos U, Th e K que podem ocorrer na composição dos minerais, ou simplesmente devido à variação extrema da temperatura.

Estes fenómenos vão excitar os átomos, promove desordens estruturais pela remoção dos compostos iónicos ou elétrons para outras posições estruturais e originando vazios que funcionam como armadilhas para outros elétrons. Desta forma a cada um destes defeitos equivale um centro de cor específico que é responsável por uma cromatização específica (Fritsch e Rossman, 1988b, Nassau, 1978). Como as ligações estabelecidas por estes processos são fracas, basta um ligeiro aquecimento ou exposição à luz solar, para o efeito retroceder e conseqüentemente estabelecer-se a cor inicial do cristal (Fritsch e Rossman, 1988b, Nassau, 1978; Schulman e Compton, 1962).

Diversos autores centraram as suas investigações no estudo das causas da cor nas turmalinas (Carneiro *et al.*, 2009; Castañeda *et al.*, 2006; Krambrock, *et al.*, 2002; Krambrock, *et al.*, 2009; Moretti, 2010; Agostinho e Nascimento, 2010; Nassau, 1975; Reinitz e Rossman, 1988), conseguindo com os resultados obtidos identificar possíveis elementos cromóforos, centros de cor envolvidos e processos de transferência de carga característicos, que se encontram resumidamente apresentados na tabela 13.III.

Cromóforo	Mecanismo	Espécie	Cor	Fonte
Fe^{2+}	Cromóforo em coordenação octaédrica com possível transferência de carga $\text{Fe}^{2+}\text{-O-Ti}^{4+}$	Elbaíte Lidicoatite	Azul	Dietrich, 1985
Fe^{2+} e Ti^{4+}	Cromóforos em coordenação octaédrica com possível transferência de carga $\text{Fe}^{2+}\text{-O-Ti}^{4+}$	Schorl Elbaíte	Verde	Dietrich, 1985
Fe^{3+}	Transferência de pares iónicos	Dravite	Vermelho	Mattson e Rossman, 1984
Mn^{2+} e Ti^{4+}	Transferência de carga $\text{Mn}^{2+}\text{-O-Ti}^{4+}$	Elbaíte Lidicoatite	Amarelo-verde	Rossman e Mattson, 1986

V ³⁺ e Cr ³⁺	Cromóforos em coordenação octaédrica, sozinhos ou combinados	Dravite Uvite	Verde	Krambrock, <i>et al.</i> , 2009 e Schmetzer e Bank, 1979
Ti ⁴⁺ e Fe ²⁺	Transferência de carga Fe ²⁺ -O-Ti ⁴⁺	Dravite	Amarelo a castanho (pouco ferro amarelo, muito ferro castanho)	Smith, 1977 Dietrich, 1985
Cu ²⁺ e Mn ²⁺ com contributo de Fe ²⁺	Cromóforos em coordenação octaédrica.	Elbaite	Azul néon	Wilson, 2002 Merkel e Breeding, 2009
Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , Mn ²⁺ e Ti ⁴⁺	Cromóforos em coordenação octaédrica Transferência de carga Fe ²⁺ →Ti ⁴⁺	Schorl	Preto	Feral, 2013
Fe ²⁺ e Ti ⁴⁺	Transferência de carga Fe ²⁺ →Ti ⁴⁺	Elbaite Lidicoatite	Castanho	Rossmann e Mattson, 1986
Mn ²⁺ e Mn ³⁺	Centro de cor provocado por Irradiação gama, Mn ²⁺ → Mn ³⁺ (mais Mn ²⁺ róseo pálido, mais Mn ³⁺ vermelho).	Elbaite Lidicoatite	Róseo a vermelho	De Camargo e Isotani, 1988; Gibbons <i>et al.</i> , 1974; Maning, 1973 e Reinitz e Rossmann, 1988
Mn ²⁺	Cromóforo em coordenação octaédrica	Elbaite Lidicoatite	Amarelo esverdeado	Rossmann e Mattson, 1986

Tabela 13.III - Possíveis cromóforos e mecanismos intervenientes na cromatização das turmalinas coloridas

III.3. Diversidade cromática das turmalinas estudadas (aplicação do sistema de referência cromático de Munsell)

Carecendo de uma identificação cromática que seja exata, prática e principalmente traduzível em termos numéricos que possam ser tratados estatisticamente, as turmalinas do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga (fig. 19 e 20) foram caracterizadas com recurso ao Sistema de Cores de Munsell.

Este sistema baseia-se na capacidade de perceção da cor pelo olho humano, apresentando a cor como ela é observada ao invés de outros sistemas que se fundamentam nas propriedades físicas da luz. Baseia-se em três critérios: a matriz, o valor e o croma (fig. 21A) que representam as dimensões que compõem a cor (Cavallaro, 2008; Moretti, 2010).

Desta forma consegue-se definir todas as cores perceptíveis e organizá-las num sólido de cores, como o representado na figura 21B, que é considerado o espaço colorimétrico de Munsell (Moretti, 2010).

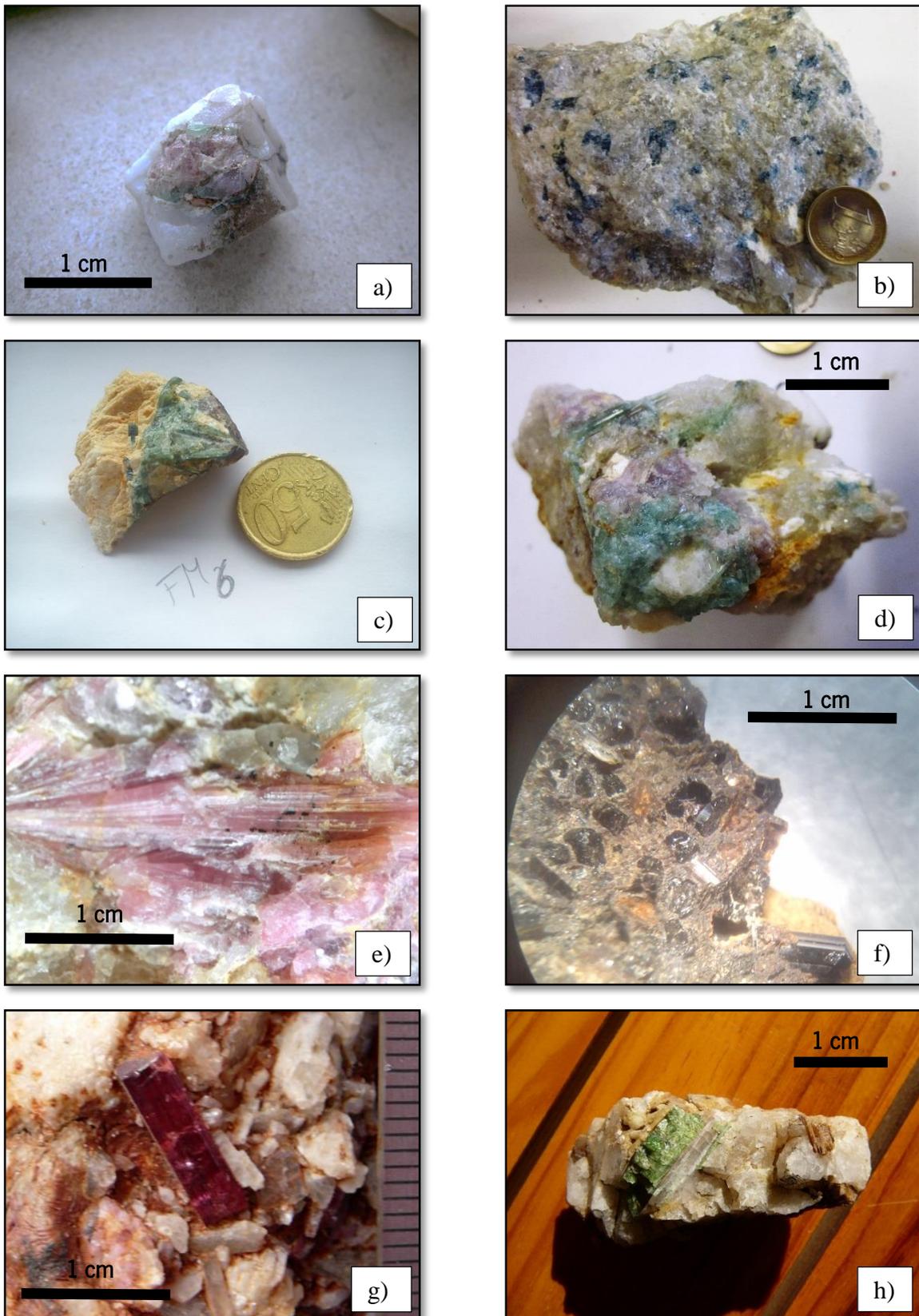


Figura 19 – Diversidade cromática das turmalinas coloridas do Campo Aplito-Pegmatítico de Argô¹⁰

¹⁰ a) Turmalina bicolor incluída em quartzo, Lousado; b) T. azul intercrescida com quartzo e albite, Balouca Sul; c) T. verde radiada intercrescida com feldspato e petalite, Formigoso; d) T. verde clara intercrescida com lepidolite fina, quartzo e albite, Balouca Sul; e) Turmalina rósea radiada intercrescida com lepidolite, Lousado; f) Turmalina castanha escura prismática com quartzo, Balouca Norte; g) Turmalina rósea transparente intercrescida com cookeite tardia, Lousada; h) Turmalina verde clara situada em cookeite de preenchimentos miarolíticos, Balouca Norte



Figura 20 – Diversidade cromática das turmalinas coloridas do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga¹¹

¹¹ a) Turmalina nodular azul escura, Balouca Norte; b) T. verde zonada intercrescida com quartzo e moscovite, Balouca Sul; c) T. nodular azul clara, Balouca Norte; d) T. rósea radiada, Lousado; e) Turmalina verde clara transparente, Lousado; f) Turmalina verde-escuro brechificada, Balouca Norte; g) Turmalina incolor intercrescida com quartzo, Balouca Sul; h) Turmalina amarela e incolores intercrescida com lepidolite, Balouca Sul

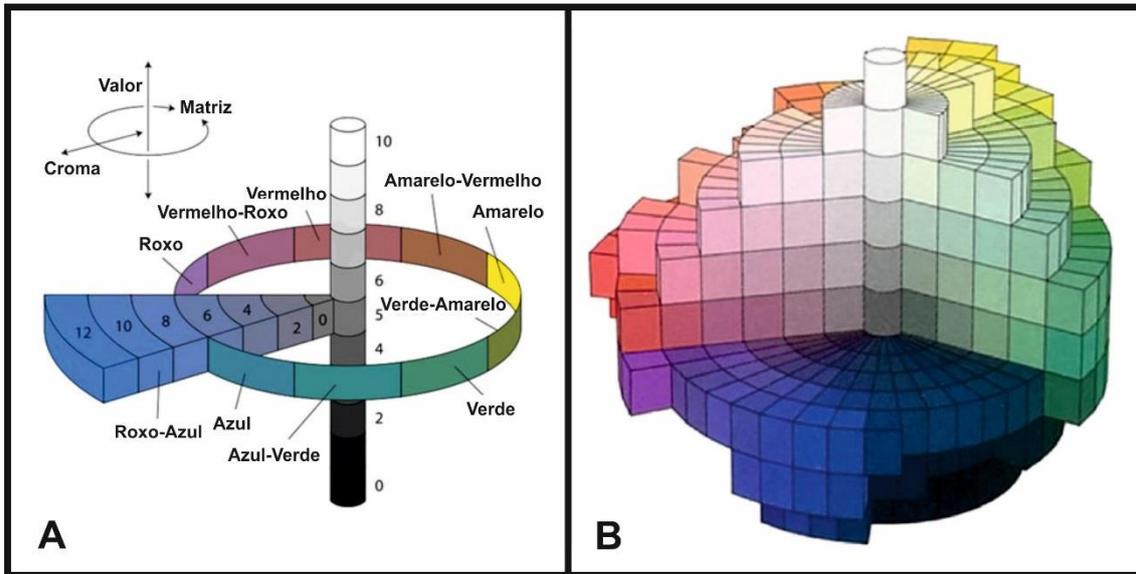


Figura 21 – Sistema Colorimétrico de Munsell. A: Representação das três dimensões que definem os índices de Munsell; B: Representação do sólido deformado correspondente ao Espaço Colorimétrico de Munsell.

O principal contra deste sistema de caracterização, quando aplicado ao estudo de minerais, advém do grau de precisão na identificação, dado que a percepção do olho humano varia para a mesma amostra, resultando numa atribuição diferente. Da mesma maneira a identificação pode variar em função da luz incidente sobre a amostra e das próprias características físicas do mineral.

III.3.1. Diversidade cromática

As turmalinas em estudo foram então classificadas em relação à cor, recorrendo ao Sistema de Cores de Munsell. A identificação dos índices realizou-se no mesmo dia e local e no menor intervalo de tempo possível, limitando assim as variações na luz incidente. De forma a simplificar a atribuição dos índices caracterizados, foram apenas utilizadas as matizes 2.5, 5, 7.5 e 10 de cada cor.

Do conjunto de amostras analisadas, foram reconhecidos 99 índices diferentes de Munsell, correspondendo portanto a 99 cores distintas, distribuídas principalmente entre as matizes 10GY a 10B e 2.5RP a 10R, correspondendo aos intervalos de cores, verde-azul e róseo-vermelho respetivamente e que se encontram representadas na figura 22.

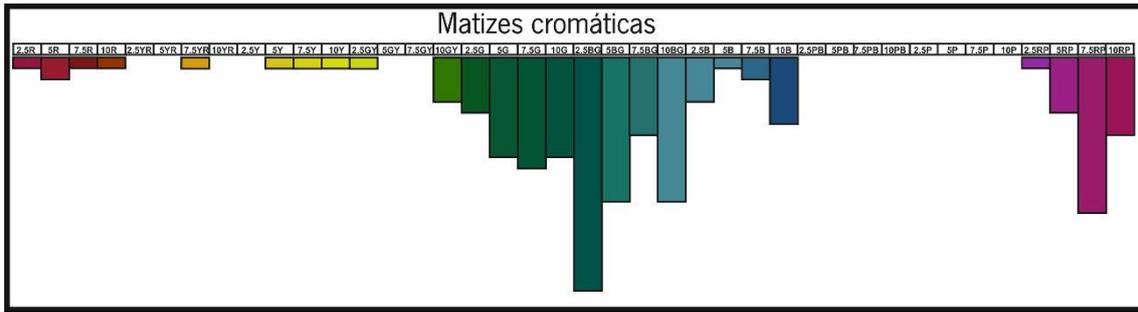


Figura 22 - Representação esquemática da distribuição das amostras caracterizadas pelas respectivas matizes de Munsell.

No do intervalo de cores que representa a maior quantidade de amostras, o tom mais recorrente é o verde azulado (BG), correspondendo a um total de 54 amostras caracterizadas, contendo somente o matiz 2.5BG, 21 amostras. Os tons verdes (G) representados na figura 23 seguem-se aos verdes azulados em ordem decrescente de abundância, detendo ainda 33 amostras do total analisado, sendo mais comuns que os tons azuis (B) descritos na figura 24.

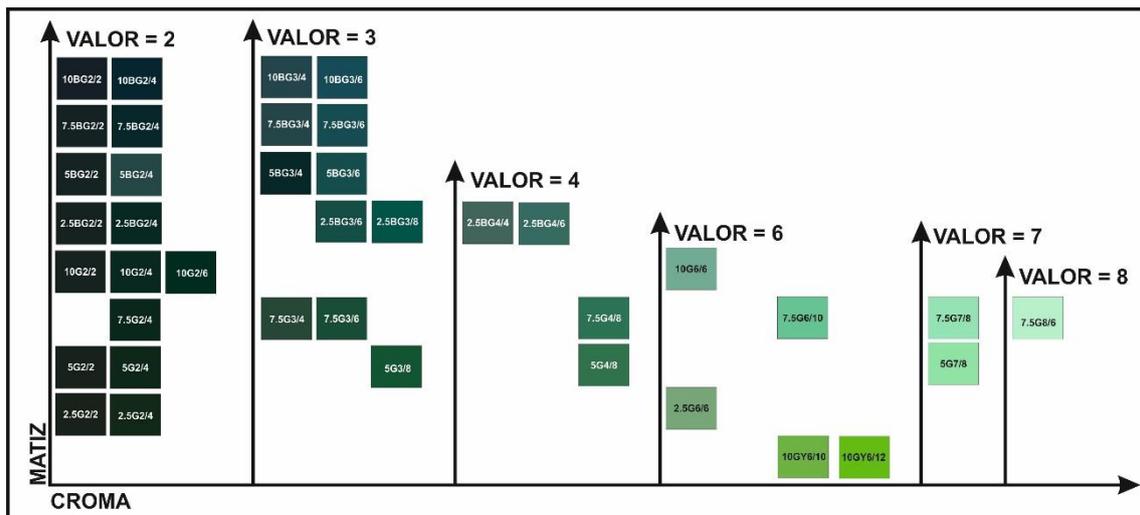


Figura 23 – Representação dos índices de Munsell referentes aos tons verdes, identificados nas amostras analisadas.

Os tons verdes azulados correspondem às turmalinas verdes escuras, às partes nucleares azuis e verdes de turmalinas bicolors, às turmalinas nodulares azuis e às turmalinas azuis e verdes claras, tendendo para os matizes puramente verdes, as turmalinas verdes claras e algumas escuras e tendendo para os matizes azuis, os cristais azuis-claros e alguns nódulos com azuis mais vivos.

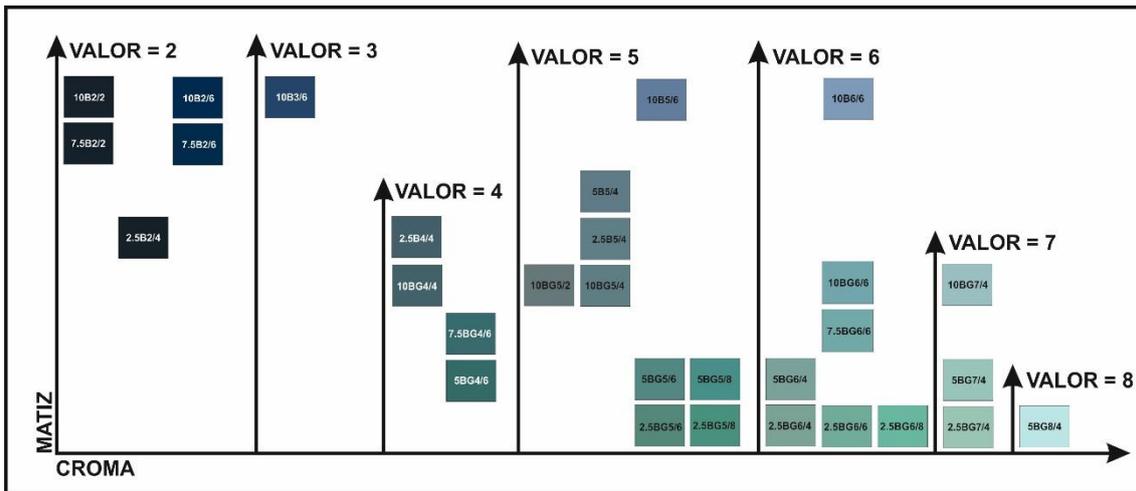


Figura 24 - Representação dos índices de Munsell referentes aos tons azuis, identificados nas amostras analisadas.

As diferentes combinações entre roxo (P) e vermelho (R) originaram um espectro de cores ainda alargado ocorrente no intervalo entre 2.5RP e 10R, ao longo do qual se distribuem todas as turmalinas de tons róseos (fig. 25). O matiz mais significativo é o 7.5RP, ao qual correspondem um total de 14 amostras, sendo que é também neste que ocorre o maior número de amostras (6) com o mesmo índice - 7.5RP 7/8. Os tons roxos avermelhados (róseos) (RP) ocorrem em turmalinas mais escuras e transparentes e os tons mais vermelhos (R) caracterizam as turmalinas róseas mais claras e as alteradas.

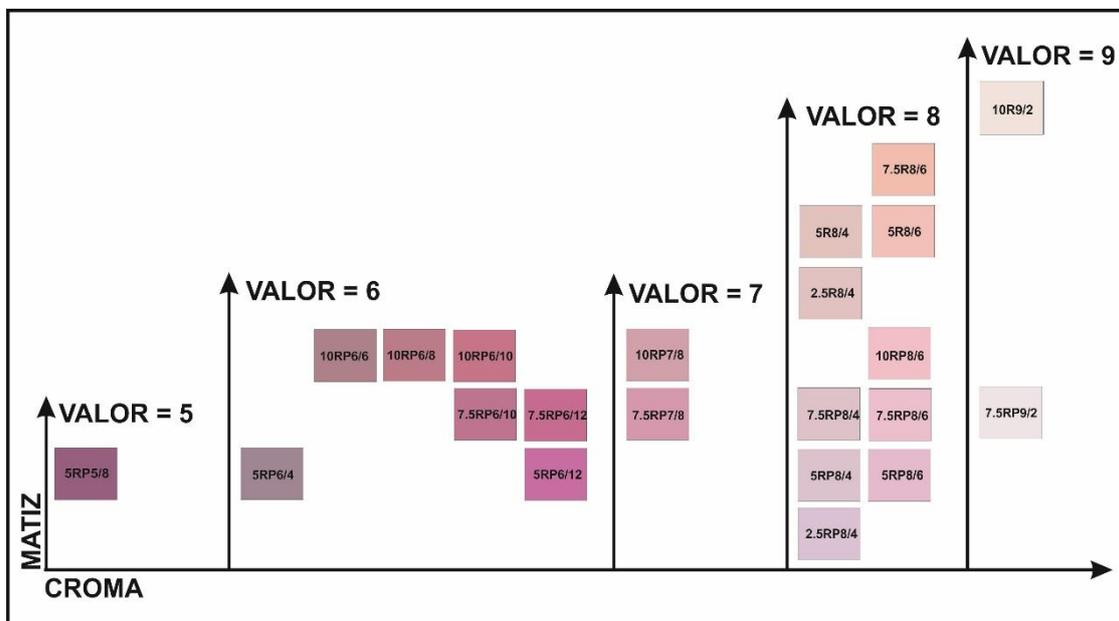


Figura 25 - Representação dos índices de Munsell referentes aos tons róseos, identificados nas amostras analisadas.

Na figura 26 observa-se de forma muito limitada, a existência de índices atribuídos a amostras dentro dos tons amarelos (YR, Y e GY). Correspondem a uma amostra amarela pálida e a três amostras consideradas incolores, mas que por não o serem totalmente, apresentam uma cor amarela muito clara. Ocorre ainda no intervalo amarelo dos matizes, uma amostra com índice 7.5YR 2/2 correspondendo a uma turmalina castanho-escuro.

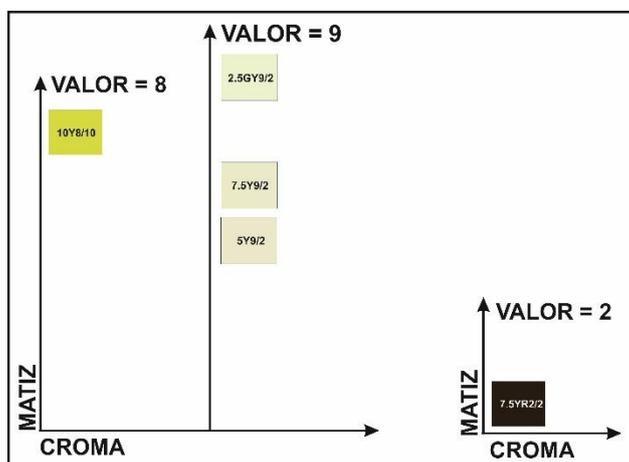


Figura 26 - Representação dos índices de Munsell referentes aos tons amarelos, identificados nas amostras analisadas

Destaca-se ainda a ocorrência de quatro amostras de turmalinas de cor negra, cujo índice de Munsell é N 1/0, situando-se portanto perto do topo do eixo vertical representativo da luminosidade (figura 27). Por não se contemplar este eixo no esquema da figura 22, as cores neutras não puderam ser representadas, contudo são na mesma descritas, dada a pertinência destas para o estudo.

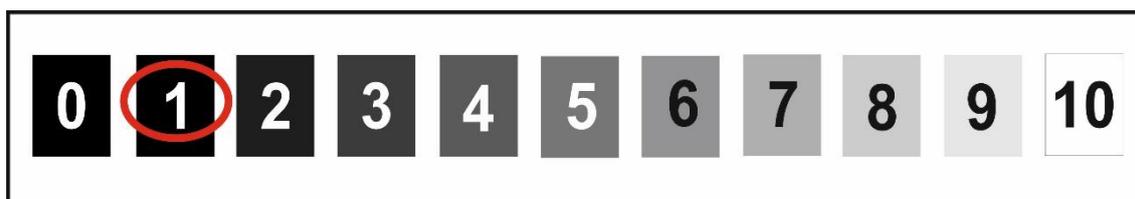


Figura 27 – Representação da escala de luminosidade com indicação do cromato correspondente às amostras negras estudadas

Em relação à luminosidade (valor) dos índices de Munsell definidos nas amostras em estudo, apresentada na figura 28, nota-se um claro domínio do valor 2, identificado em 42 índices. Este, aliado ao valor 3 (caracterizado em 18 índices), representam as cores mais escuras, dizendo respeito às turmalinas verde escuras, nodulares azuis e às negras. A luminosidade com os valores 7, 8 e 9 representam as cores mais claras, pertencendo portanto a índices de turmalinas róseas, verdes a azuis claras e incolores.

Discutida a matriz e a luminosidade, falta abordar o croma, que caracteriza a saturação da cor. Nas amostras em estudo, não foram determinados índices com cromas superiores a 12 (fig. 29), sendo o croma com maior representação o 4, que caracteriza 46 dos índices definidos no estudo.

A maioria das turmalinas apresenta muita saturação pois os seus índices concentram-se nos cromas 4 e 6. As cores mais saturadas correspondem às turmalinas verdes escuras, bicolores e róseas alteradas e as cores mais limpas (grosso modo) pertencem a turmalinas nodulares, verdes e azuis claras e róseas.

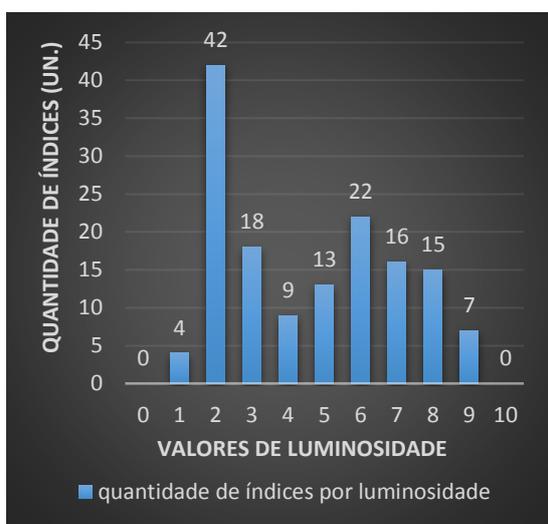


Figura 28 - Representação diagramática da distribuição dos índices obtidos nas amostras pela luminosidade

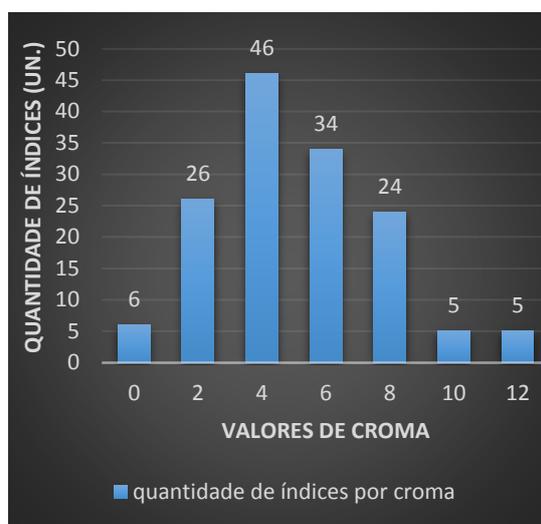


Figura 29 - Representação diagramática da distribuição dos índices obtidos nas amostras pelo croma

Do exposto é possível comprovar a enorme multiplicidade cromática das turmalinas, que é enfatizada pelos 98 diferentes índices cromáticos de Munsell definidos neste estudo. De todos estes índices, destacam-se o 7.5RP 7/8 (rosa arroxeadado moderado); o 2.5BG 3/8 (verde azulado profundo) e o 7.5G 2/4 (verde escuro), uma vez que são os índices identificados com mais frequência nas amostras.

A prevalência nos índices dos matizes verde-azulados, amplamente distribuídos entre 2.5G 2/2 e 10BG 4/4, o predomínio de amostras saturadas e com luminosidades baixas, traduzem-se num domínio dos tons verde-azulados escuros, sendo esta a cor observada com mais frequência nas turmalinas que foram selecionadas para o estudo.

III.4. Diafaneidade

A diafaneidade ou transparência é uma propriedade ótica dos minerais que corresponde à quantidade de luz que é transmitida pelo mineral, permitindo assim classifica-los de acordo com a capacidade que têm para serem atravessados pela luz.

Desta forma os minerais, relativamente à diafaneidade, podem ser **transparentes**, **translúcidos** e **opacos**, podendo ainda ser definidos os estados intermédios, semi-transparente e semi-translúcido (tabela 14.III). A aplicação do termo opaco varia com a espessura do mineral, uma vez que este pode ser opaco quando muito espesso e ficar translúcido/ transparente quando cortado numa lâmina mais fina.

Transparente	Um objeto observado através do mineral pode-se ver claramente.	Quartzo hialino, topázio
Semi-transparente	A imagem de um objeto observado através do mineral é turva mas ainda identificável.	Turmalina, berilo, quartzo
Translúcido	O mineral transmite alguma luz, mas não se consegue observar os objetos.	Jadeíte, turmalina, apatite
Semi-translúcido	Alguma luz consegue penetrar no mineral, mas apenas através dos cantos mais translúcidos.	Jaspe, cassiterite
Opaco	O mineral é opticamente denso o suficiente para evitar a passagem de qualquer luz.	Arsenopirite, malaquite

Tabela 14.III – Caracterização dos graus de diafaneidade

Quando se aborda minerais para joalheria, como o são as turmalinas em estudo, a diafaneidade revela-se uma característica importante, uma vez que é baseado nesta que se define qual a lapidação a aplicar. Assim, a diafaneidade e a cor são as características que tornam as gemas mais atrativas.

De acordo com Leal Gomes (2005), a quase totalidade de turmalinas ocorrentes em Arga não apresenta transparência por se encontrarem alteradas e deformadas. A exceção resume-se a pequenos cristais verdes claros ocorrentes em cavidades mirolíticas ou em cavidades de corrosão preenchidas por B-cookeite e pequenos fragmentos róseos em cristais de maiores dimensões, pois apresentam uma boa transparência.

As amostras submetidas ao estudo cromático foram classificadas de acordo com o seu grau de diafaneidade em opacas, translúcidas e transparentes, sendo representadas na figura 30.

Da totalidade de amostras analisadas, 61% são consideradas opacas, 36% translúcidas e as restantes 3% foram classificadas como transparentes, corroborando o afirmado por Leal Gomes (2005).

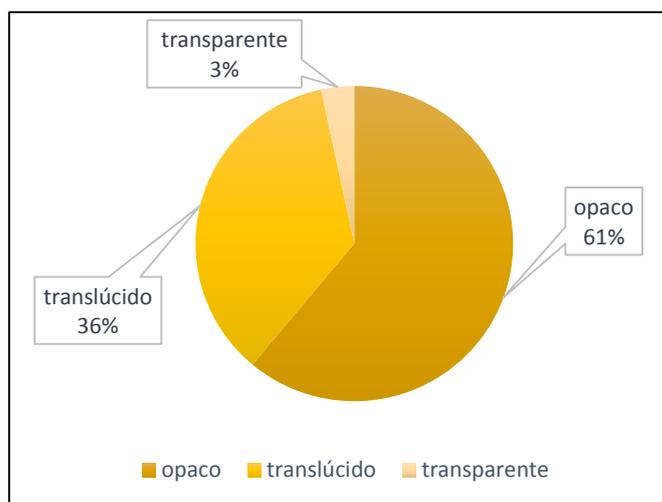


Figura 30 – Distribuição das amostras analisadas, pelo grau de diáfaneidade

Os cristais transparentes são róseos ou verdes claros, sempre de pequenas dimensões e raros, ocorrem nas unidades nucleares ou intermédias (figura 31A). Os cristais translúcidos podem ocorrer em todas as unidades descritas e correspondem às turmalinas com cores e tamanhos variados que por transmitirem alguma luz não se consideraram transparentes nem opacas (figura 31B). Os cristais considerados opacos correspondem às turmalinas negras das unidades de equilíbrio com a rocha encaixante, às turmalinas azuis nodulares e verdes escuras das unidades de bordadura e intermédias, às turmalinas róseas e bicolores das unidades nucleares e de substituição que se encontram alteradas (figura 31C).

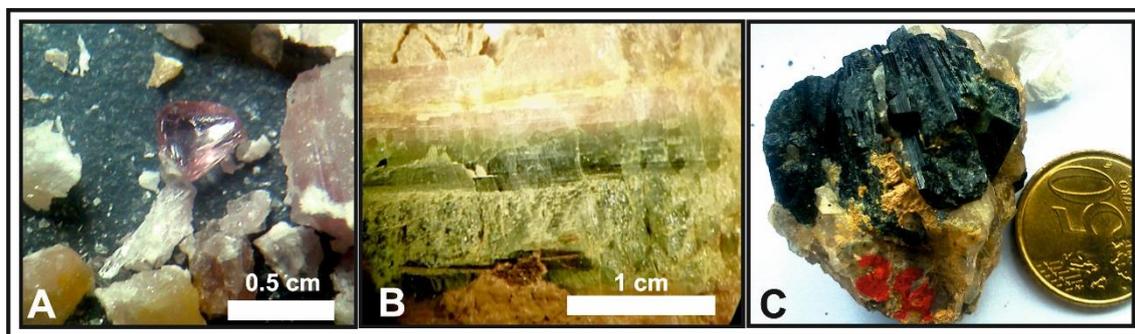


Figura 31 – Representação dos diferentes graus de diáfaneidade identificados nas amostras em estudo. A – Cristal róseo transparente; B- Cristal bicolor translúcido; C- Turmalina verde escura opaca

III.5. Grau de prevalência dos tipos cromáticos:

Os tipos cromáticos identificados nas turmalinas de Arga através do estudo pelo Sistema de Cores de Munsell são abundantes e diversificados, mas por questões de simplificação para futuras referências, foram agrupados em cores padrão mais generalistas. A figura 32 esquematiza a distribuição das amostras analisadas por dez intervalos de cores diferentes: róseo, incolor, amarelo, preto, verde claro e escuro, azul claro e escuro, castanho e ainda bicolor.

No conjunto das amostras em estudo, destaca-se o predomínio das turmalinas verdes, principalmente as verdes escuras sobre as restantes cores, sendo as turmalinas azuis e róseas com quantidades semelhantes de amostras, as cores com maior expressão a seguir às verdes.

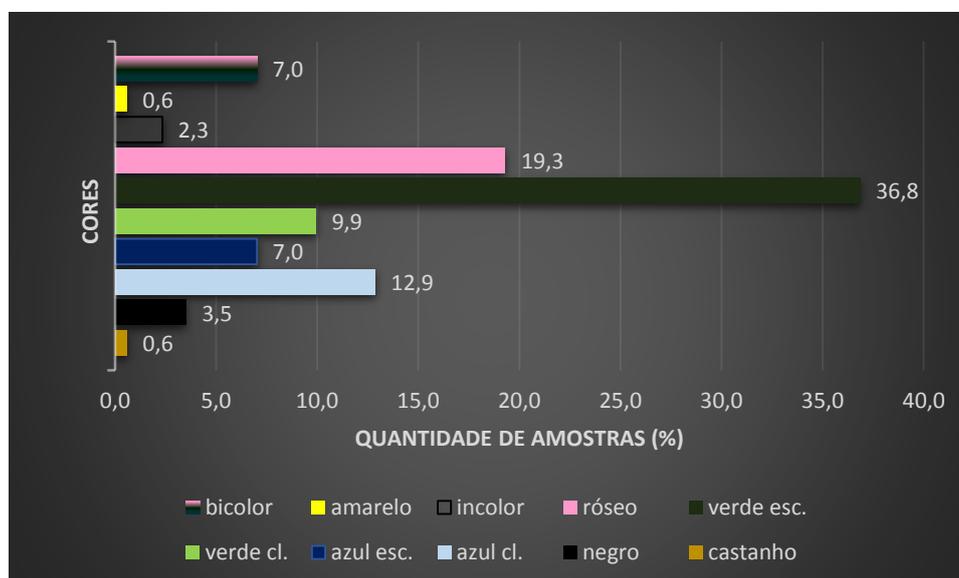


Figura 32 – Distribuição das amostras estudadas pela cor que possuem.

A distribuição apresentada das turmalinas pelas suas cores é uma aproximação representativa da prevalência real com que estas cores podem ocorrer, nos corpos portadores. Considerando isto, o grau de prevalência de cada cor será estabelecido com base na frequência apresentada na figura 32 e considerando o que já foi descrito sobre as turmalinas dos aplito-pegmatitos de Arga.

III.5.1. Negro

No conjunto das amostras recolhidas para o estudo foram consideradas apenas quatro turmalinas como negras, o que representa uma prevalência muito baixa desta cor no total das

amostras (3.5%) (fig. 32). Extrapolada para o campo aplito-pegmatítico, esta reduzida prevalência significaria a existência de poucas turmalinas negras, porém, a ocorrência da cor negra no campo é bem mais frequente. A reduzida prevalência apresentada deve-se ao facto de, como já foi referido, o alvo desta dissertação serem as turmalinas coloridas, recorrendo somente aos cristais negros para auxiliar na compreensão das tendências evolutivas.

Assim, de acordo com Leal Gomes (1994; 2005) e Dias (2012) as turmalinas negras ocorrem nas unidades de metassomatismo do encaixante nos corpos em estudo, em pegmatitos não especializados em Li, em salbandas de filões cruzados, em veios de segregação metamórfica quartzo-andaluzíticos e em turmalinitos, sendo, desta forma, no contexto do campo aplito-pegmatítico, a cor mais frequente das turmalinas (fig. 33).

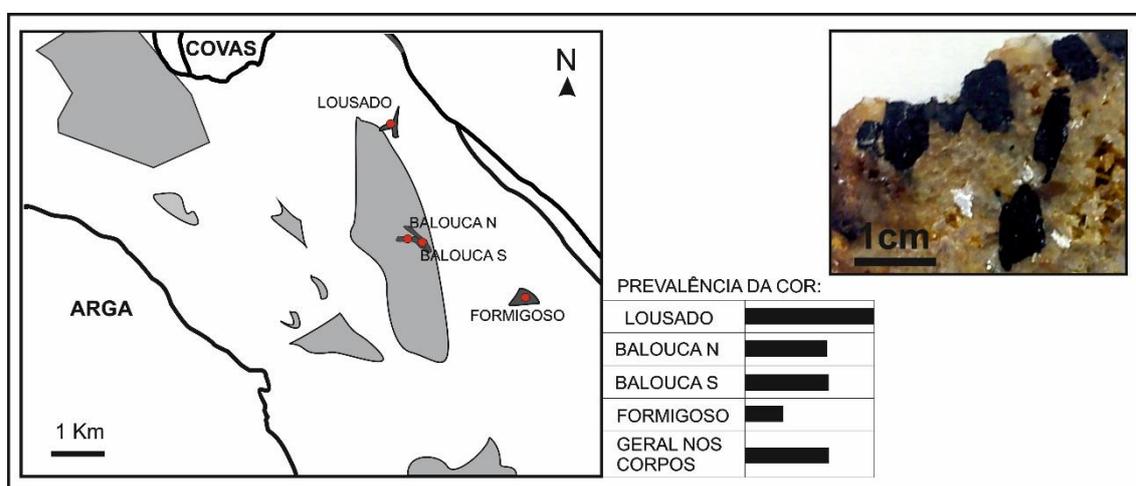


Figura 33 – Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina negra no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Argal.

III.5.2. Verde a verde azulado

O verde é a cor mais frequente do conjunto de turmalinas coloridas analisadas, ocorrendo em 36.8% destas como verde-escuro e em 9.9% como verde-claro. Leal Gomes (1994; 2005) também considera o verde como a cor mais abundante nas turmalinas litíferas, ocorrendo com quantidades razoáveis em diferentes unidades dos corpos e em diferentes situações paragenéticas, apresentando mesmo zonalidades em diferentes tons de verde. As turmalinas mais escuras são abundantes e os seus tons variam entre verde e verde azulado muito escuro. Por sua vez, as turmalinas de cor verde clara são menos comuns e geralmente ocorrem transparentes.

São por norma mais tardias que as verdes escuras e situam-se na bordadura de cristais verde escuros ou ocorrem como recristalizações nas unidades de substituição e do núcleo.

Assim, como se encontraram com facilidade amostras de tons verdes no corpo do Lousado e da Balouca e como no corpo do Formigoso as turmalinas coloridas ocorrentes são todas verdes, é seguro afirmar que o verde é uma cor recorrente, seguindo-se ao negro como cor com maior taxa de prevalência nas turmalinas dos corpos aplito-pegmatíticos de Arga, (fig. 34). Destacando ainda que ocorrem cristais verdes nos corpos Paiol do Formigoso e Verdes.

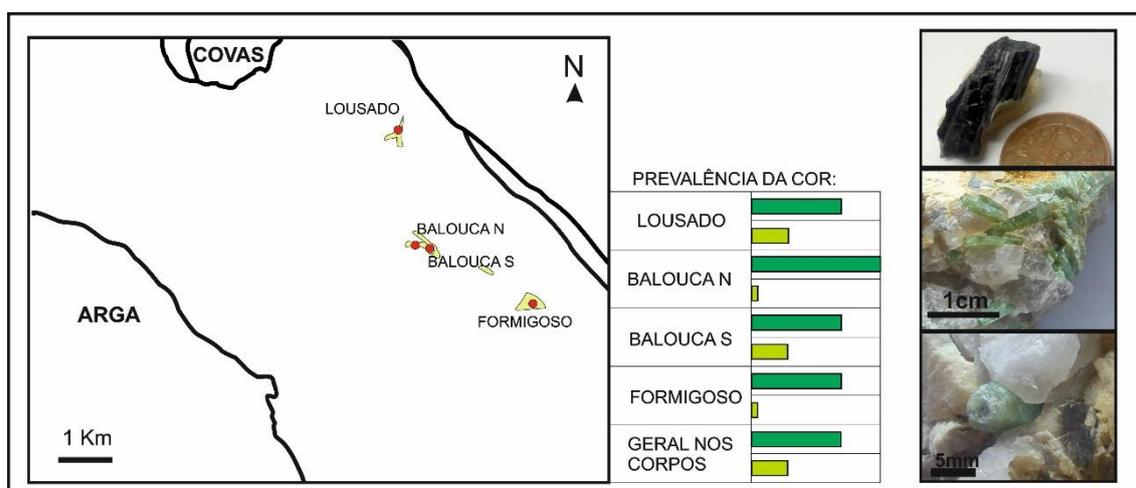


Figura 34 - Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina verde no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga

III.5.3. Azul

Os valores obtidos na figura 32 remetem para uma prevalência significativa da cor azul nas turmalinas de Arga onde foi identificada em 19.9 % das amostras estudadas, correspondendo 12.9% aos tons claros e 7.0 % aos tons mais escuros. A prevalência estimada por Leal Gomes (2005) para as turmalinas que apresentam coloração azul varia bastante de um corpo para o outro. Este autor considera a ocorrência de turmalinas nodulares azuis encontradas no corpo da Balouca Norte muito abundante, pois embora se resuma a uma ocorrência isolada, esta apresenta quantidades de turmalina excepcionais. Refere também que as turmalinas azul claras das unidades intermédias e unidades paroxismais do núcleo do corpo Balouca S são muito raras e já as elbaïtes azuis escuras das unidades ricas em lepidolite do corpo pegmatítico do Picoto do Carvalho são abundantes.

Do conjunto das amostras azuis estudadas a maior percentagem atribuída aos tons azul claro deve-se principalmente às turmalinas nodulares, juntando-se a estas, os poucos exemplares de turmalinas azuis claras da Balouca S. Por sua vez a percentagem mais reduzida nos tons azul escuros justifica-se pelos poucos cristais nodulares com tons mais escuros e pelos cristais azul escuros do Lousado. Assim, a cor azul nas turmalinas, apesar de muito comum no corpo da Balouca N, é rara relativamente aos corpos aplito-pegmatíticos de Arga (figura 35).

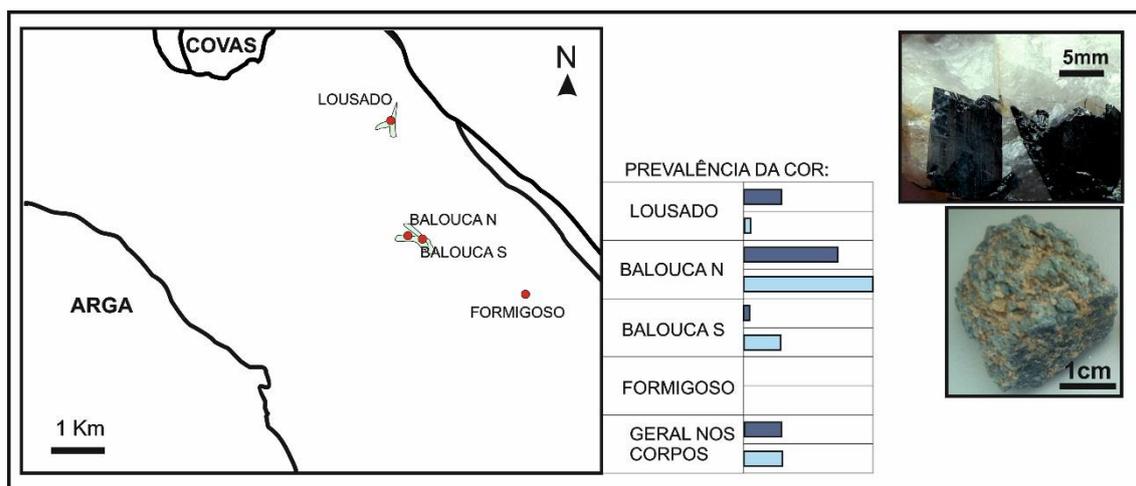


Figura 35 - Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina azul no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga

III.5.4. Róseo

Os cristais com tons róseos apresentam uma prevalência de 19.3 % no conjunto das amostras estudadas, constituindo imediatamente a seguir ao azul, a última cor mais comum nas turmalinas de Arga. Leal Gomes (1994; 2005) considerou as turmalinas róseas como muito raras a raras no campo aplito-pegmatítico, registando a sua ocorrência de forma esporádica sob as espécies elbaíte e lidicoatite em unidades nucleares e de substituição com lepidolite e quartzo.

A composição altamente evoluída destas turmalinas justifica a sua rara ocorrência ao longo dos corpos (fig. 36) e sentenciam a diminuta prevalência que apresentam no campo. Quando ocorrem apresentam-se sob a forma de massas de cristais radiados, de pequenos cristais disseminados ou de cristais bastante alterados, numa matriz lepidolítica ou lepidolítico-albítica.

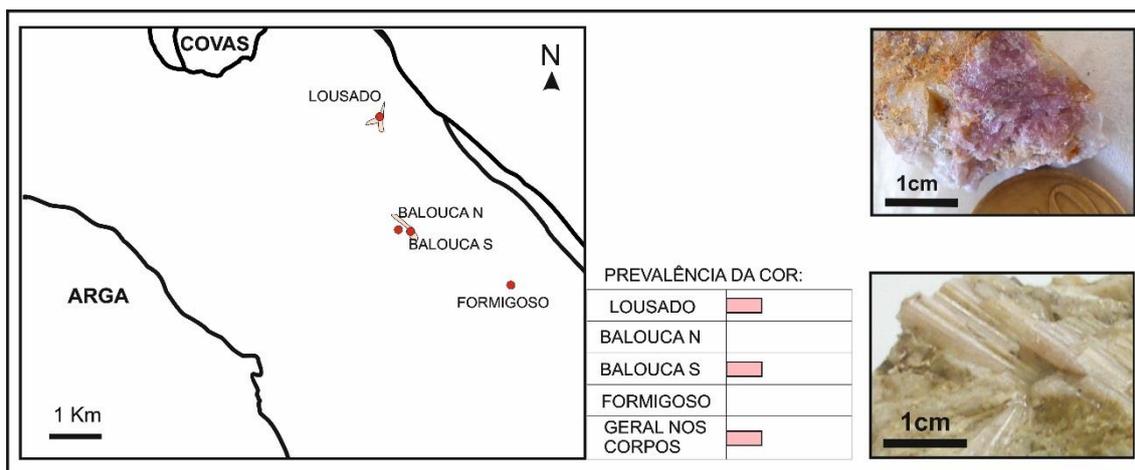


Figura 36 - Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina rósea no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga

III.5.5. Outras cores

Foram apresentadas, até então, as cores mais frequentes que ocorrem nas turmalinas de Arga - preto, verde, azul e róseo, correspondendo a 89.4 % das amostras estudadas e podendo as prevalências destas cores alcançar no campo, valores mais elevados. Além destes, mas de forma muito mais parca, ocorrem no campo de Arga, turmalinas que apresentam outras cores.

O registo de turmalinas com cor amarela resume-se a um pequeno cristal amarelado, coexistente com outros incolores e bicolores, numa matriz lepidolítica, oriundo do corpo da Balouca S. Desta forma, a cor amarela exhibe uma reduzida prevalência de 0.6 % no conjunto das cores caracterizadas, sendo também a sua identificação nos corpos em campo muito rara (fig.37).

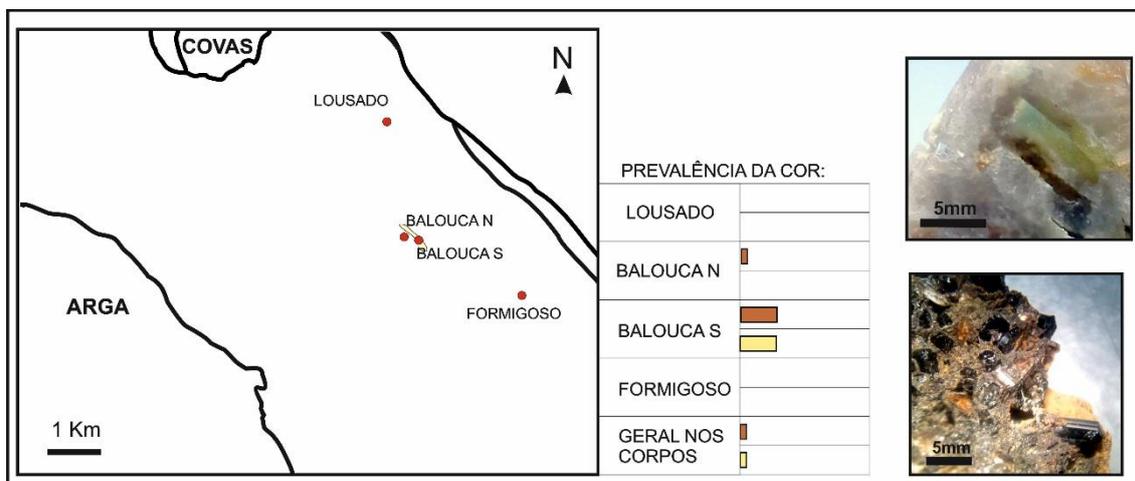


Figura 37 - Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina amarela no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga

Foi identificada uma outra cor correspondendo a 0.6 % das amostras, representada por um conjunto de cristais castanho escuros, coletados num veio de segregação metamórfica de quartzo e andaluzite nas proximidades do corpo Balouca N. Este conjunto corresponde às dravites verde claras a cor de mel consideradas por Leal Gomes (2005) e, tendo uma afinidade marcadamente mais metamórfica, devem ser mais abundantes nestes corpos hiperaluminosos, sendo a sua prevalência, quando relacionada com os aplito-pegmatitos propriamente ditos, muito rara (fig. 37).

III.5.6. Incolor

Os cristais incolores identificados são muito pequenos, translúcidos e com ocorrência rara. Somente observados em amostras do núcleo do corpo de Balouca S, estes cristais permitem, ainda assim, registar para este tipo cromático, uma prevalência de 2.3 % no conjunto de todas as cores observadas nas turmalinas. Porém, a sua raridade é bem mais generalizada no contexto do campo aplito-pegmatítico (fig. 38), podendo ser admitido que esta reduzida ocorrência é mesmo única, explicando o facto de Leal Gomes (2005) não ter referido a ocorrência de turmalinas incolores.

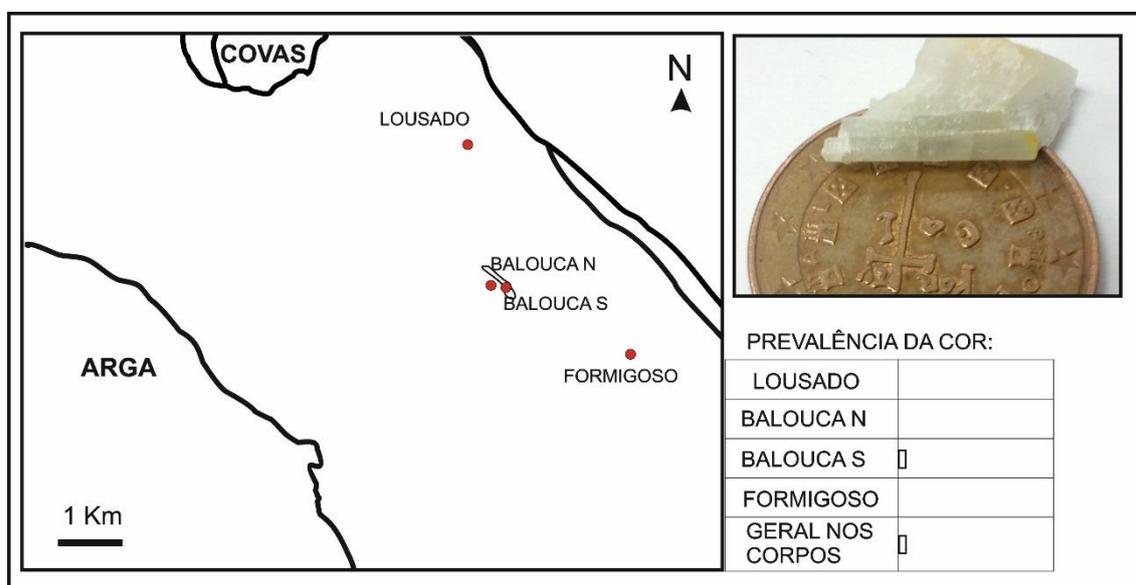


Figura 38 - Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina incolor no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga

III.5.7. Bicolor

O zonamento cromático observado em 7.0 % das turmalinas estudadas, representa um número ainda relevante de ocorrência de cristais bicolors. Estes cristais apresentam, maioritariamente, bordo róseo e núcleo verde azulado escuro, ocorrendo em menor número, cristais da variedade gemológica “*watermelon*”, que exibem núcleo róseo e bordo verde (fig. 39). Leal Gomes (2005) considera esta ocorrência rara e restrita a unidades do núcleo com quartzo e lepidolite, fazendo com que na generalidade do campo aplito-pegmatítico, estes cristais sejam considerados raros ou mesmo muito raros.

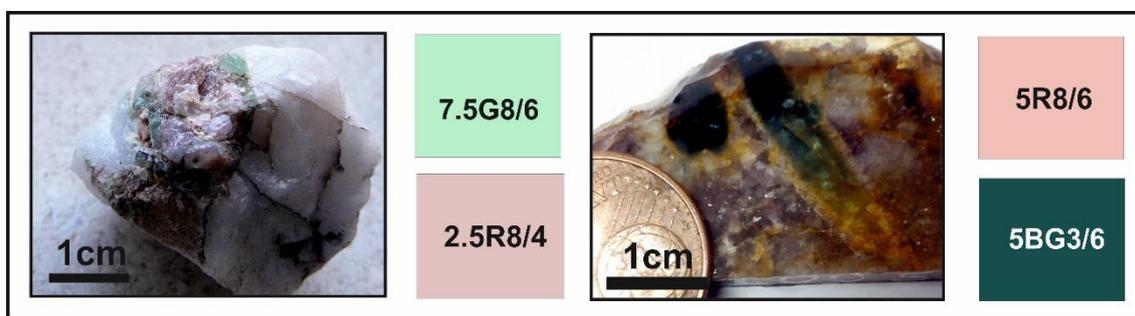


Figura 39 - Prevalência e distribuição das principais ocorrências de turmalina bicolor no contexto dos corpos estudados e do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga.

III.6. Seleção de tipos cromáticos para estudo mineroquímico

O estudo mineroquímico é de importância cardinal pois permite realizar a identificação das diferentes espécies de turmalinas através das suas composições químicas, mas principalmente, definir tendências composicionais que possam ocorrer ao longo do conjunto de amostras selecionadas, utilizando-as como indicadores petrogenéticos da fracção dos corpos onde ocorrem. Por isso, os tipos cromáticos a selecionar têm de representar toda a variabilidade composicional ocorrente nas turmalinas, mas também têm de espelhar todas as unidades portadoras dos corpos em estudo.

Atentando no referido, foram selecionados para o estudo mineroquímico os tipos cromáticos mais frequentes das turmalinas ocorrentes nas diversas paragêneses caracterizadas dos corpos do Lousado, Balouca e Formigoso, os cristais verdes escuros e claros, azuis escuros e claros e róseos. Dentro do tipo cromático verde incluíram-se ainda as amostras de Paiol do Formigoso e Verdes.

Do Lousado e Balouca Sul foram ainda aprovadas para o estudo mineroquímico amostras zonadas, com zonamentos verde escuro-verde claro ou bicolores (“*watermelon*” ou inversas), para se interpretar a variação da composição em função da cor num mesmo cristal.

Como já foi discutido, serão também alvo deste estudo amostras de turmalinas pretas, oriundas da zona mural do corpo do Lousado mas também de outros corpos que possam estar relacionados com os aplito-pegmatitos, incluindo-se aqui as amostras de um filão cruzado, de um turmalinito e de um pegmatito estéril em minerais de Li (Lourinhal).

Com menor representação nos corpos em estudo e com menor influência na variação composicional das turmalinas foram, finalmente, incluídas para respectiva caracterização mineralógica uma amostra de cada um dos restantes tipos cromáticos, uma incolor e outra amarela.

A amostra castanha não foi selecionada para o estudo mineroquímico uma vez que a sua afinidade claramente metamórfica, impõe que esta não se relacione composicionalmente com as restantes turmalinas pegmatíticas estudadas.

CAPÍTULO IV

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

IV.1. Quadro composicional das turmalinas coloridas

As análises pontuais das amostras seleccionadas para o estudo mineroquímico foram obtidas na microsonda electrónica (MSE) das instalações do LNEG-Porto e a partir destas foram calculadas as fórmulas estruturais, com base em 31 oxigénios, considerando o B = 3 apfu e OH+F =4 apfu e calculando todo o Li por estequiometria (Neiva e Leal Gomes, 2011).

Nas tabelas 15.IV a 21.IV encontram-se representadas as composições químicas das turmalinas coloridas analisadas nos diferentes corpos do Campo Aplito-Pegmatítico.

Dos elementos essenciais nas turmalinas, o Al é o mais significativo, ocorrendo em todas as amostras em excesso, nas posições octaédricas (Y). As turmalinas mais ricas em Al na posição Y são as turmalinas róseas da Balouca Sul e Lousado, variando entre 1.43 e 1.89 apfu Al . Com valores mais baixos mas ainda significativos, variando entre 0.80 e 1.64 apfu Al , encontram-se as amostras verde claras e escuras e as azuis claras e escuras, sendo as amostras negras, as que apresentam menores valores de Al (≤ 1.214 apfu Al).

O Fe surge também com valores bastante representativos no conjunto das amostras analisadas e com uma variação ampla entre 1.71 apfu Fe em amostras negras até valores abaixo do limite de deteção em turmalinas róseas. As turmalinas negras do Lourinhal, do Paiol do Formigoso e do Lousado exibem portanto os valores de Fe mais elevados (entre 1.45 e 1.71 apfu Fe), seguindo-se com menores valores as turmalinas verdes claras e escuras. Nestas, os valores mais elevados encontram-se nas amostras do Lousado (1.48 a 0.41 apfu Fe) e os menores nas amostras do Formigoso (0.97 a 0.035 apfu Fe). As amostras róseas apresentam os valores de apfu Fe mais reduzidos das turmalinas de Arga (≤ 0.011), registando-se mesmo amostras onde os valores de Fe se situam abaixo do limite de deteção.

O cálculo por estequiometria do Li está bem definido e testado (Tindle *et al.*, 2002) e no caso de Arga, os resultados sugerem que este elemento é constante nas turmalinas coloridas, apresentando os maiores valores em amostras róseas do corpo do Lousado e Balouca Sul (1.09

a 1.31 apfu de Li_{calc}). Excluindo uma amostra verde escura do Lousado que apresenta valores mais baixos (0.224 apfu Li_{calc}), as amostras verdes apresentam quantidades significativas embora inferiores de Li_{calc} , comparativamente com as turmalinas róseas, variando entre 0.61 e 1.33 apfu Li_{calc} . As amostras nodulares azuis da Balouca Norte expressam muito menos Li_{calc} que as restantes amostras coloridas ocorrentes nesse corpo (0.42 a 0.86 apfu Li_{calc}), mas são as turmalinas negras, as que possuem os valores de Li mais reduzidos, oscilando entre 0.19 e 0.33 apfu Li_{calc} , ocorrendo mesmo amostras que não apresentam teores de Li.

Dos restantes elementos analisados que ocupam as posições octaédricas (Y), Ti, V, Cr, Mg e Mn, o que se apresenta na generalidade das amostras com maiores valores é o Mn. Este elemento é particularmente mais elevado nas amostras do Lousado que nas restantes amostras, sendo as amostras verdes detentoras dos maiores valores, seguindo-se das róseas e finalmente as turmalinas pretas apresentam menores valores de Mn. Este padrão aplica-se aos outros corpos, destacando o corpo do Formigoso que globalmente apresenta pouco Mn, chegando este mesmo a não ser detetado em algumas amostras.

O Mg é abundante nas amostras negras, porém insignificante nas restantes turmalinas coloridas estudadas (≤ 0.008 apfu Mg). As amostras do Lourinhal são as que apresentam maiores valores, atingindo os 0.46 apfu Mg, a amostra negra do Paiol do Formigoso exhibe um valor mais modesto (0.012 apfu Mg) que este, mas comparativamente com a sua homóloga verde (0.003 apfu Mg), permite definir a existência de uma boa relação entre a presença de Mg e a cor negra.

O Ti apresenta uma distribuição ao longo das amostras semelhante ao Mg, ocorrendo mais abundante nas amostras negras, porém em quantidades menores, não ultrapassando os 0.079 apfu de Ti e sendo nas coloridas muito reduzido (≤ 0.009 apfu Ti), não atingindo em muitas delas o limite de deteção.

O V e o Cr ocorrem na totalidade das amostras de Arga com valores muito reduzidos, não justificando a sua discussão.

Amostra	T. em greisen de bordo		T. parcialmente coqueitizada intercrescida c/ lepidolite e quartzo		T. parcialmente coqueitizada intercrescida c/ lep. e alb.	T. envolvida por lepidolite e quartzo.	
	Z. Gradacional		Z. Gradacional		N.Z.	Z. Normal	
Zonalidade	Bordo	Núcleo	Núcleo	Bordo	Núcleo	Núcleo	Bordo
Cor	Verde	Preto	Róseo esc.	Róseo cl.	Rósea	Verde esc.	Verde cl.

Nº da análise	P19.1	P19.2	P19.3	P19.4	P19.5	P14.1	P14.2
SiO2	33,36	32,94	35,67	35,32	36,29	36,33	36,93
TiO2	0,0482	0,0738	0,0219	—	—	0,0195	0,0493
Al2O3	39,42	39,64	45,52	44,49	46,05	39,44	38,53
V2O3	—	0,0019	—	0,004	0,0121	0,0041	—
Cr2O3	0,0041	—	—	—	—	0,0067	—
FeO	10,76	10,48	0,5831	—	0,0088	6,76	8,78
MgO	0,4368	0,8288	0,7126	—	—	0,0019	0,012
CaO	0,0094	0,0401	—	1,2218	0,3485	0,0773	0,0172
MnO	0,0776	0,0597	0,0485	0,44	0,0821	0,3375	0,4575
Na2O	1,67	1,55	1,51	1,57	1,71	2,32	1,47
K2O	0,0244	0,0344	0,0961	0,0005	0,0348	0,026	—
Cs2O	—	0,0105	—	0,0036	—	—	0,0051
F	0,39	0,1126	—	1,19	0,767	0,8761	0,2701
H2O*	3,45	3,56	3,86	3,26	3,54	3,34	3,62
B2O3*	10,54	10,48	11,19	11,09	11,33	10,87	10,86
Li2O*	0,34	0,00	1,42	1,88	1,77	1,25	0,89

Total	100,53	99,81	100,63	100,46	101,95	101,66	101,88
O=F	0,16	0,05	0,00	0,50	0,32	0,37	0,11
Total*	100,36	99,76	100,63	99,96	101,63	101,29	101,77

T	Si	5,503	5,464	5,538	5,537	5,567	5,809	5,913
	Al	0,497	0,536	0,462	0,463	0,433	0,191	0,087
B		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Z	Al	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Y	Al	1,166	1,214	1,867	1,758	1,894	1,240	1,183
	Ti	0,006	0,009	0,003	0,000	0,000	0,002	0,006
	V	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000
	Cr	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
	Mg	0,107	0,205	0,165	0,000	0,000	0,000	0,003
	Mn	0,011	0,008	0,006	0,058	0,011	0,046	0,062
	Fe2+	1,484	1,454	0,076	0,000	0,001	0,904	1,176
Li*	0,224	0,000	0,883	1,183	1,093	0,806	0,570	
ΣY		3,000	3,000	2,891	3,000	3,000	3,000	3,000
X	Ca	0,002	0,007	0,000	0,205	0,057	0,013	0,003
	Na	0,534	0,499	0,455	0,477	0,509	0,719	0,456
	K	0,005	0,007	0,019	0,000	0,007	0,005	0,000
	Cs	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	□	0,459	0,486	0,526	0,317	0,427	0,262	0,540
OH		3,797	3,941	3,941	3,410	3,628	3,557	3,863
F		0,203	0,059	0,059	0,590	0,372	0,443	0,137

Designação	Schorl	Schorl	Rossmannite	F- Elbaite	Elbaite	Elbaite	Rossmannite
------------	--------	--------	-------------	------------	---------	---------	-------------

Tabela 15.IV - Composições de turmalinas do corpo do Lousado (análises em microsonda electrónica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH, F). * -valores calculados por estequiometria

Amostra	T. bicolor na transição feldspato K – albite + quartzo + lepidolite			T. parcialmente coqueitizada intercrescida c/ lepidolite e amblygonite - montebrasite			T. bicolor na transição feldspato K – albite + quartzo + lepidolite		
	Z. Normal			Z. Gradacional			Z. Normal		
Zonalidade	Núcleo	Bordo	Núcleo	Núcleo	Bordo	Fase cl.	Núcleo	Bordo	Bordo
Cor	Verde	Róseo	Verde	Róseo cl.	Róseo	Róseo	Verde	Róseo	Róseo

Nº da análise	P5.1	P5.2	P5.3	P5.4	P5.5	P5.7	P5.8	P5.9	P5.10
SiO2	37,15	37,91	37,15	38,67	38,49	38,66	36,97	37,71	38,49
TiO2	0,0355	0,0631	0,0078	—	0,0423	—	—	—	0,0196
Al2O3	37,44	41,38	37,31	41,22	41,10	40,29	37,36	41,84	40,80
V2O3	0,0115	0,0140	0,0322	0,0164	—	0,0094	0,0046	0,0234	—
Cr2O3	0,0075	—	0,0577	0,0537	0,0104	0,0454	—	—	0,0021
FeO	4,03	0,0409	4,2	0,0353	0,0645	0,0058	2,97	0,0818	—
MgO	—	—	—	0,0077	—	—	—	0,0093	—
CaO	0,0311	0,4792	0,0726	0,2690	0,3819	0,6909	0,2058	0,3901	0,3817
MnO	1,0582	1,0494	0,9582	0,4799	0,5604	0,8045	1,0859	0,8810	0,7859
Na2O	2,27	1,83	2,15	1,81	1,89	1,87	2,54	1,79	1,73
K2O	—	—	0,0137	0,0212	—	0,0221	0,0415	0,0235	0,0144
Cs2O	n.d.								
F	0,9931	0,8750	0,9235	0,7863	1,0600	1,3800	1,3600	0,9232	1,0900
H2O*	3,21	3,41	3,24	3,47	3,33	3,18	3,02	3,39	3,31
B2O3*	10,68	11,09	10,66	11,15	11,12	11,10	10,64	11,09	11,08
Li2O*	1,70	2,00	1,70	2,15	2,13	2,31	1,90	1,95	2,14

Total	98,62	100,14	98,48	100,13	100,19	100,36	98,10	100,10	99,84
O=F	0,42	0,37	0,39	0,33	0,45	0,58	0,57	0,39	0,46
Total*	98,20	99,77	98,09	99,80	99,74	99,78	97,52	99,71	99,38

T	Si	6,048	5,942	6,056	6,030	6,015	6,052	6,042	5,910	6,037
	Al	0,000	0,058	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,090	0,000
B		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Z	Al	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Y	Al	1,184	1,585	1,168	1,576	1,570	1,434	1,195	1,638	1,542
	Ti	0,004	0,007	0,001	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,002
	V	0,002	0,002	0,004	0,002	0,000	0,001	0,001	0,003	0,000
	Cr	0,001	0,000	0,007	0,007	0,001	0,006	0,000	0,000	0,000
	Mg	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
	Mn	0,146	0,139	0,132	0,063	0,074	0,107	0,150	0,117	0,104
	Fe2+	0,549	0,005	0,573	0,005	0,008	0,001	0,406	0,011	0,000
Li*	1,115	1,261	1,114	1,346	1,341	1,452	1,248	1,230	1,351	
ΣY		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
X	Ca	0,005	0,080	0,013	0,045	0,064	0,116	0,036	0,066	0,064
	Na	0,717	0,556	0,680	0,547	0,573	0,568	0,805	0,544	0,526
	K	0,000	0,000	0,003	0,004	0,000	0,004	0,009	0,005	0,003
	Cs	n.d.								
	□	0,278	0,363	0,305	0,404	0,363	0,312	0,151	0,386	0,407
OH		3,489	3,566	3,524	3,612	3,476	3,317	3,297	3,542	3,459
F		0,511	0,434	0,476	0,388	0,524	0,683	0,703	0,458	0,541

Designação	F-Elbaite	Elbaite	Elbaite	Elbaite	F-Elbaite	F-Elbaite	F-Elbaite	Elbaite	F-Elbaite
------------	-----------	---------	---------	---------	-----------	-----------	-----------	---------	-----------

Tabela 16.IV - Composições de turmalinas do corpo do Lousado (análises em microsonda electrónica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH, F). * -valores calculados por estequiometria; n.d. – análise não disponível.

Amostra	T, entre bandas pegmatíticas intercrescida com ambligonite e microclina		T, intercrescida com lepidolite em torno da petalite e no seio da lepidolite			T. no interior da petalite	T. na interfase feldspato K + quartzo - petalite		T. intercrescida com quartzo e petalite	
	Z. Oscilatório		Z. Gradacional			N.Z.	Z. Oscilatório		Z. Oscilatório	
Zonalidade	Bordo	Núcleo	Núcleo	Bordo	Periferia	Centro	Núcleo	Núcleo	Bordo	Núcleo
Cor	Verde cl.	Verde es.	Verde es.	Verde cl.	Verde +cl	Verde cl.	Verde es.	Verde cl.	Verde cl.	Verde esc.

Nº da análise	P17.2	P17.3	P17.4	P17.5	P17.6	P17.7	P17.8	P17.9	P3.7	P3.8
SiO2	37,45	36,06	36,49	37,36	37,46	36,58	37,34	37,14	35,54	35,40
TiO2	0,0574	0,0235	—	0,0319	0,0141	—	—	0,04	—	0,0052
Al2O3	40,40	35,90	35,58	38,85	36,74	36,04	39,62	39,28	40,69	39,81
V2O3	0,0140	—	—	0,0209	—	—	0,0047	—	0,0041	—
Cr2O3	—	0,0080	—	0,0278	—	0,0285	0,0350	0,01	—	0,0268
FeO	1,84	8,19	6,37	1,94	4,36	6,90	1,74	3,26	5,92	7,25
MgO	—	—	0,0223	—	0,0091	0,0200	—	—	0,0259	0,0218
CaO	0,0549	0,0770	0,1390	0,4342	0,2572	0,2004	0,3226	0,34	0,1878	0,0854
MnO	0,6772	0,2685	0,2468	0,4976	0,5758	0,3250	0,9772	0,44	0,8755	0,4294
Na2O	1,95	2,43	2,63	1,99	2,51	2,60	1,96	2,15	2,54	2,56
K2O	0,0038	0,0242	0,0373	0,0006	0,0254	0,0268	0,0297	0,03	0,0421	0,0202
Cs2O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,15	0,00	0,00
F	0,6808	1,1400	1,5500	1,1500	1,3800	1,3900	0,8670	1,13	1,26	1,25
H2O*	3,45	3,07	2,88	3,17	3,03	2,98	3,33	3,21	3,17	3,14
B2O3*	10,93	10,47	10,46	10,78	10,69	10,55	10,85	10,84	10,92	10,82
Li2O*	1,76	1,22	1,66	1,97	1,97	1,51	1,82	1,75	1,25	1,14

Total	99,26	98,88	98,07	98,22	99,02	99,16	98,90	99,62	102,43	101,97
O=F	0,29	0,48	0,65	0,48	0,58	0,59	0,37	0,48	0,53	0,53
Total*	98,97	98,40	97,42	97,73	98,44	98,57	98,53	99,15	101,90	101,44

T	Si	5,957	5,985	6,060	6,026	6,089	6,024	5,980	5,952	5,656	5,685
	Al	0,043	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	0,048	0,344	0,315
B		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Z	Al	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
	Al	1,531	1,008	0,965	1,385	1,039	0,995	1,459	1,371	1,287	1,219
Y	Ti	0,007	0,003	0,000	0,004	0,002	0,000	0,000	0,005	0,000	0,001
	V	0,002	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000
	Cr	0,000	0,001	0,000	0,004	0,000	0,004	0,004	0,001	0,000	0,003
	Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,005
	Mn	0,000	0,000	0,006	0,000	0,002	0,005	0,000	0,060	0,118	0,058
	Fe2+	0,091	0,038	0,035	0,068	0,079	0,045	0,133	0,437	0,788	0,974
	Li*	1,124	0,814	1,110	1,275	1,285	1,001	1,170	1,125	0,800	0,739
	ΣY	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
X	Ca	0,009	0,014	0,025	0,075	0,045	0,035	0,055	0,058	0,032	0,015
	Na	0,601	0,782	0,847	0,622	0,791	0,830	0,609	0,668	0,784	0,797
	K	0,001	0,005	0,008	0,000	0,005	0,006	0,006	0,007	0,009	0,004
	Cs	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	□	0,388	0,199	0,120	0,303	0,159	0,129	0,330	0,268	0,000	0,000
OH	3,658	3,402	3,186	3,413	3,291	3,276	3,561	3,427	3,000	3,000	
F	0,342	0,598	0,814	0,587	0,709	0,724	0,439	0,573	0,634	0,635	

Designação	Elbaite	F-Elbaite	F-Elbaite	F-Elbaite	F-Elbaite	F-Elbaite	Elbaite	Elbaite	F-Elbaite	F-Elbaite
------------	---------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	---------	---------	-----------	-----------

Tabela 17.IV - Composições de turmalinas do corpo do Formigoso (análises em microsonda electrónica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH, F). * -valores calculados por estequiometria

Amostra	T. intercrescida c/ lepidolite, quartzo, albite e ambligonite			T. intercrescida c/ quartzo, berilo e lepidolite		T. venular em fratura tardia maciça, c/ textura coloide				T. alterada intercrescida c/ albite e lepidolite maciça		T. intercrescida c/ quartzo e lepidolite fina
	Z. Inverso			Z. Gradacional		Z. Normal		Z. Normal		N.Z.	N.Z.	N.Z.
Zonalidade	Núcleo	Bordo	Bordo	Início	Verde	Núcleo	Bordo	Núcleo	Bordo	Total	Total	Interior
Cor	Róseo	Verde	Verde	Róseo	Róseo	Verde	Verde	Verde cl.	Verde esc.	Rósea	Rósea	Verde cl.

Nº de análise	P13.1	P13.2	P13.3	P13.4	P13.5	P13.7	P13.8	P13.9	P13.10	P13.11	P13.12	P2.1
SiO2	38,43	37,86	37,21	38,78	37,87	37,09	37,95	36,84	37,45	38,05	38,01	38,38
TiO2	0,0093	0,0734	0,0139	0,0121	—	0,0168	0,0510	0,0207	0,0114	—	0,0061	0,0543
Al2O3	42,30	40,94	38,73	41,94	41,75	36,61	39,92	37,09	39,87	41,74	42,01	42,03
V2O3	—	—	—	—	—	0,0023	0,0092	—	0,0208	0,0139	—	0,0042
Cr2O3	0,0371	—	0,0108	—	0,0359	—	—	0,0086	0,0359	0,0068	—	—
FeO	0,0409	0,6241	1,52	0,0874	0,0465	6,78	1,79	5,39	1,89	—	0,0755	2,24
MgO	—	—	0,0010	—	—	—	0,0218	0,0284	—	—	—	—
CaO	0,0647	0,1199	0,1413	0,0979	0,0604	0,0100	0,2650	0,0811	0,3165	0,1377	0,1177	0,1663
MnO	0,0274	0,1100	0,3821	0,0211	0,0500	0,2951	0,5333	0,3693	0,4864	0,2342	0,1516	0,9125
Na2O	1,65	1,81	2,32	1,76	1,84	2,32	2,00	2,69	2,18	1,68	1,71	2,19
K2O	0,0085	0,0026	0,0205	0,0381	—	0,0096	0,0093	0,0553	0,0238	0,0079	0,0126	0,0443
Cs2O	n.d.											
F	0,6587	0,963	1,32	1,03	1,06	1,28	1,20	1,37	1,15	0,9122	0,8825	1,07
H2O*	3,54	3,33	3,07	3,38	3,30	3,07	3,22	3,03	3,22	3,38	3,41	3,40
B2O3*	11,17	10,97	10,72	11,20	11,03	10,65	10,97	10,65	10,91	11,06	11,08	11,33
Li2O*	1,99	1,97	2,05	2,11	2,00	1,51	1,92	1,63	1,90	1,98	1,98	1,79

Total	99,93	98,77	97,50	100,45	99,05	99,64	99,86	99,25	99,46	99,21	99,44	103,61
O=F	0,28	0,41	0,56	0,43	0,45	0,54	0,51	0,58	0,48	0,38	0,37	0,45
Total*	99,65	98,36	96,95	100,01	98,61	99,11	99,35	98,68	98,98	98,82	99,07	103,16

T	Si	5,980	5,997	6,036	6,018	5,965	6,052	6,013	6,011	5,967	5,980	5,960	5,887
	Al	0,020	0,003	0,000	0,000	0,035	0,000	0,000	0,000	0,033	0,020	0,040	0,113
B		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Z	Al	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
	Al	1,739	1,641	1,404	1,670	1,715	1,040	1,454	1,132	1,455	1,712	1,723	1,486
Y	Ti	0,001	0,009	0,002	0,001	0,000	0,002	0,006	0,003	0,001	0,000	0,001	0,006
	V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,003	0,002	0,000	0,001
	Cr	0,005	0,000	0,001	0,000	0,004	0,000	0,000	0,001	0,005	0,001	0,000	0,000
	Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
	Mn	0,004	0,015	0,052	0,003	0,007	0,041	0,072	0,051	0,066	0,031	0,020	0,119
	Fe2+	0,005	0,083	0,206	0,011	0,006	0,925	0,237	0,735	0,252	0,000	0,010	0,287
	Li*	1,247	1,253	1,334	1,314	1,267	0,991	1,225	1,071	1,219	1,254	1,246	1,101
	$\sum Y$	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
	X	Ca	0,011	0,020	0,025	0,016	0,010	0,002	0,045	0,014	0,054	0,023	0,020
Na		0,498	0,556	0,730	0,530	0,562	0,734	0,614	0,851	0,674	0,512	0,520	0,651
K		0,002	0,001	0,004	0,008	0,000	0,002	0,002	0,012	0,005	0,002	0,003	0,009
Cs		n.d.											
□		0,490	0,423	0,242	0,447	0,428	0,262	0,339	0,123	0,268	0,463	0,458	0,313
OH	3,676	3,518	3,323	3,495	3,472	3,339	3,399	3,293	3,420	3,547	3,562	3,481	
F	0,324	0,482	0,677	0,505	0,528	0,661	0,601	0,707	0,580	0,453	0,438	0,519	

Designação	Elbaite	Elbaite	F-Elbaite	Elbaite	Elbaite	F-Elbaite						
------------	---------	---------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	---------	---------	-----------

Tabela 18.IV - Composições de turmalinas do corpo da Balouca Sul (análises em microsonda electrónica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH, F). * -valores calculados por estequiometria; n.d. – análise não disponível.

Amostra	T. em coroas de gigafeldspatos e em crescimento miarolítico			T. em coroa de gigafeldspatos		T. situada em coqueite de preenchimentos intersticiais de gigafeldspatos			T. brechificada c/ coqueite	T. em crescimento miarolítico entre gigafeldspatos		
	Z. Normal			Z. Gradacional		Z. Gradacional			N.Z.	Z. Oscilatório		N.Z.
Zonalidade	Núcleo	Bordo	Periferia	Núcleo	Bordo	Núcleo	Bordo	Núcleo	Núcleo	Núcleo	Bordo	Cristal
Cor	Verde esc.	Verde cl.	Verde +cl.	Verde cl	Verde cl	Verde esc.	Verde cl.	Verde	Verde esc.	Verde cl.	Verde +cl	Verde

Nº de análise	P15.1	P15.2	P15.3	P15.4	P15.5	P15.6	P15.7	P15.8	P15.9	P15.10	P15.11	P15.12
SiO2	37,49	37,97	37,68	37,63	37,17	37,28	36,57	37,31	37,05	37,82	37,69	37,70
TiO2	—	0,0284	—	0,0519	0,0121	—	0,0726	—	—	0,0698	0,0072	0,0171
Al2O3	37,26	41,51	39,04	37,68	37,82	38,00	35,17	39,52	36,03	38,23	40,37	39,91
V2O3	0,0182	0,0300	—	—	0,0091	0,0159	0,0288	—	—	0,0023	0,0045	0,0045
Cr2O3	0,0448	—	0,0051	0,0292	0,0078	—	0,0106	0,0077	0,0059	—	—	0,0292
FeO	4,93	1,09	3,30	4,17	3,44	3,99	10,58	1,99	7,59	2,86	1,1419	2,02
MgO	0,0020	—	0,0090	—	0,0091	—	—	0,0051	0,0012	0,0081	0,0145	—
CaO	0,2902	0,2146	0,1682	0,3642	0,1905	0,3996	—	0,3669	0,1185	0,5195	0,5044	0,4727
MnO	0,5939	0,3023	0,3314	0,4549	0,5389	1,1268	0,0196	1,1455	0,3361	1,0604	1,0841	0,3686
Na2O	2,59	1,82	2,26	2,43	2,42	2,53	2,77	2,21	2,58	2,19	2,02	2,08
K2O	—	0,0090	0,0075	0,0253	0,369	0,0307	0,0238	0,0034	0,0268	0,0465	—	—
Cs2O	n.d.											
F	1,68	0,92	1,18	1,65	1,32	1,52	1,44	1,33	1,55	1,52	1,35	1,34
H2O*	2,92	3,39	3,20	2,95	3,07	3,01	2,97	3,12	2,94	3,03	3,15	3,14
B2O3*	10,78	11,09	10,89	10,81	10,72	10,81	10,59	10,88	10,65	10,87	11,00	10,96
Li2O*	1,80	1,90	1,82	1,90	1,89	1,73	1,10	1,83	1,50	1,96	1,93	1,93

Total	100,41	100,28	99,88	100,15	98,99	100,44	101,34	99,72	100,38	100,20	100,26	99,97
O=F	0,71	0,39	0,50	0,69	0,56	0,64	0,61	0,56	0,65	0,64	0,57	0,56
Total*	99,70	99,89	99,38	99,46	98,43	99,80	100,74	99,16	99,72	99,56	99,70	99,41

T	Si	6,043	5,948	6,015	6,047	6,024	5,992	6,003	5,961	6,047	6,045	5,956	5,981
	Al	0,000	0,052	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,039	0,000	0,000	0,044	0,019
B		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Z	Al	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Y	Al	1,078	1,612	1,345	1,137	1,224	1,191	0,804	1,402	0,931	1,201	1,475	1,443
	Ti	0,000	0,003	0,000	0,006	0,001	0,000	0,009	0,000	0,000	0,008	0,001	0,002
	V	0,002	0,004	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
	Cr	0,006	0,000	0,001	0,004	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,004
	Mg	0,000	0,000	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,003	0,000
	Mn	0,081	0,040	0,045	0,062	0,074	0,153	0,003	0,155	0,046	0,144	0,145	0,050
	Fe2+	0,665	0,142	0,441	0,560	0,466	0,536	1,452	0,266	1,036	0,382	0,151	0,268
Li*	1,168	1,198	1,166	1,231	1,230	1,117	0,726	1,175	0,985	1,262	1,224	1,233	
ΣY		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
X	Ca	0,050	0,036	0,029	0,063	0,033	0,069	0,000	0,063	0,021	0,089	0,085	0,080
	Na	0,809	0,553	0,700	0,757	0,760	0,788	0,882	0,685	0,816	0,679	0,619	0,640
	K	0,000	0,002	0,002	0,005	0,076	0,006	0,005	0,001	0,006	0,009	0,000	0,000
	Cs	n.d.											
□	0,140	0,409	0,270	0,175	0,130	0,136	0,113	0,252	0,157	0,223	0,296	0,280	
OH	3,144	3,544	3,404	3,161	3,323	3,227	3,252	3,328	3,200	3,232	3,325	3,328	
F	0,856	0,456	0,596	0,839	0,677	0,773	0,748	0,672	0,800	0,768	0,675	0,672	

Designação	F- Elbaite	Elbaite	F- Elbaite									
------------	------------	---------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

Tabela 19.IV - Composições de turmalinas do corpo da Balouca Sul (análises em microsonda electrónica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH, F). * -valores calculados por estequiometria; n.d. – análise não disponível.

Amostra	T.nodular corte paralelo a alongamento	T.nodular corte paralelo a alongamento	T.nodular corte perpendicular a alongamento	T.nodular corte perpendicular a alongamento	T. em coroas de gigafeldspatos e em crescimento miarolítico				T. em coroas de gigafeldspatos e em crescimento miarolítico	
	N.Z. Núcleo	N.Z. Bordo	N.Z. Núcleo	N.Z. Bordo	Z. Normal				Z. Oscilatório	
Cor	Azul Esc.	Azul Esc.	Azul esc.	Azul Cl.	Perif. Verde esc.	Bordo Verde cl.	Int. Verde esc.	Núcleo Verde esc.	Borda Verde cl.	Núcleo Verde cl.

Nº de análise	P1.1	P1.2	P1.3	P1.4	P11.1	P11.2	P11.3	P11.4	P11.5	P11.6
SiO2	35,75	35,56	36,09	36,96	36,77	35,69	37,96	37,94	38,97	37,20
TiO2	—	0,0319	0,0219	0,032	0,075	0,06	—	0,041	0,015	0,034
Al2O3	39,20	40,52	38,56	39,79	43,66	40,93	38,18	38,01	40,88	42,21
V2O3	—	0,0041	—	—	—	0,034	—	0,052	0,006	0,022
Cr2O3	—	0,0357	0,0137	0,0298	—	0,008	—	—	0,016	0,006
FeO	8,47	5,85	10,92	6,53	3,10	6,40	9,39	9,86	3,72	3,93
MgO	0,0108	0,0007	0,0296	0,0003	—	0,012	0,003	0,002	0,015	0,007
CaO	0,0842	0,132	0,0063	0,1166	0,24	0,15	—	0,006	0,229	0,168
MnO	0,2437	0,3695	0,1593	0,4557	0,379	0,600	0,503	0,425	0,534	0,459
Na2O	2,49	2,58	1,69	2,57	2,35	2,65	2,00	1,89	2,44	2,47
K2O	0,0103	0,0495	0,0126	0,0005	0,012	0,008	0,042	0,047	—	0,021
Cs2O	0,0144	0,0069	0,0105	0,0005	—	0,006	—	0,001	0,004	—
F	1,29	1,30	0,4077	1,23	1,09	1,22	0,916	0,846	1,27	1,24
H2O*	3,07	3,07	3,51	3,16	3,39	3,22	3,38	3,41	3,32	3,29
B2O3*	10,68	10,69	10,74	10,84	11,32	11,00	11,05	11,04	11,36	11,25
Li2O*	0,00	0,00	0,00	0,00	1,61	1,25	1,02	0,96	1,80	1,59

Total	101,32	100,21	102,17	101,71	103,9	103,2	104,4	104,5	104,6	103,9
O=F	0,54	0,55	0,17	0,52	0,46	0,51	0,39	0,36	0,53	0,52
Total*	100,78	99,66	102,00	101,19	103,5	102,7	104,1	104,2	104,0	103,4

T	Si	5,815	5,780	5,842	5,926	5,647	5,641	5,973	5,974	5,964	5,747
	Al	0,185	0,220	0,158	0,074	0,353	0,359	0,027	0,026	0,036	0,253
B		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Z	Al	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Y	Al	1,330	1,542	1,197	1,444	1,550	1,266	1,053	1,027	1,338	1,433
	Ti	0,000	0,004	0,003	0,004	0,009	0,007	0,000	0,005	0,002	0,004
	V	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,007	0,001	0,003
	Cr	0,000	0,005	0,002	0,004	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,001
	Mg	0,003	0,000	0,007	0,000	0,000	0,003	0,001	0,000	0,003	0,002
	Mn	0,034	0,051	0,022	0,062	0,049	0,080	0,067	0,057	0,069	0,060
	Fe2+	1,152	0,795	1,478	0,876	0,398	0,846	1,236	1,298	0,476	0,508
	Li*	0,000	0,000	0,000	0,000	0,994	0,792	0,644	0,606	1,109	0,991
	ΣY	3,000	2,518	2,398	2,709	2,390	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
X	Ca	0,015	0,023	0,001	0,020	0,039	0,026	0,000	0,001	0,038	0,028
	Na	0,785	0,813	0,530	0,799	0,700	0,812	0,610	0,577	0,724	0,740
	K	0,002	0,010	0,003	0,000	0,002	0,002	0,008	0,010	0,000	0,004
	Cs	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	r	0,197	0,153	0,465	0,181	0,259	0,160	0,381	0,412	0,238	0,228
OH	3,346	3,336	3,332	3,791	3,376	3,390	3,544	3,579	3,385	3,394	
F	0,654	0,664	0,668	0,209	0,624	0,610	0,456	0,421	0,615	0,606	

Designação	F-Elbaite	F-Elbaite	Elbaite	F-Elbaite	F-Elbaite	F-Elbaite	Elbaite	Elbaite	F-Elbaite	F-Elbaite
------------	-----------	-----------	---------	-----------	-----------	-----------	---------	---------	-----------	-----------

Tabela 20.IV - Composições de turmalinas do corpo da Balouca Norte (análises em microsonda electrónica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH, F). * -valores calculados por estequiometria

Amostra	U. de bordadura - Lourinhal		Aplito, Verdes	Leucogranito	Fácies aplítica Paio do Formigoso	
Zonalidade	Z. Oscilatório		N.Z.	N.Z.	Z. Oscilatório	
Cor	Núcleo	Bordo	Núcleo	Bordo	Núcleo	Núcleo
	Preto	Preto	Verde	Preto	Preto	Verde esc.

Nº da análise	P3.1	P3.2	P3.3	P3.4	P3.5	P3.6
SiO2	35,68	36,29	34,32	32,91	34,10	33,87
TiO2	0,1649	0,2828	0,0856	0,631	0,1726	0,1226
Al2O3	36,92	36,08	40,25	36,76	38,29	38,90
V2O3	0,012	0,0219	0,0041	—	—	—
Cr2O3	0,014	0,0316	—	0,0216	—	—
FeO	11,93	11,88	5,32	12,26	11,51	10,90
MgO	1,287	1,399	0,033	1,83	0,0505	0,0122
CaO	0,0613	0,0613	0,1135	0,1958	0,0489	0,0131
MnO	0,1076	0,1738	0,8203	0,1523	0,1971	0,1954
Na2O	1,53	1,78	2,51	1,89	1,95	2,05
K2O	0,0508	0,0309	0,0247	0,0362	0,0256	0,0264
Cs2O	0,0057	—	0,0005	0,0067	—	0,0269
F	0,1449	0,3232	1,36	0,5628	0,5975	0,6793
H2O*	3,63	3,54	3,03	3,33	3,36	3,33
B2O3*	10,72	10,70	10,65	10,43	10,57	10,58
Li2O*	0,29	0,00	1,22	0,00	0,49	0,54

Total	102,54	102,59	99,74	101,01	101,36	101,24
O=F	0,06	0,14	0,57	0,27	0,25	0,29
Total*	102,48	102,46	99,17	100,78	101,11	100,96

T	Si	5,787	5,894	5,600	5,487	5,608	5,565
	Al	0,213	0,105	0,400	0,513	0,392	0,435
B		3,000	3,000	3,0000	3,000	3,0000	3,000
Z	Al	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Y	Al	0,844	0,802	1,340	0,709	1,030	1,098
	Ti	0,020	0,035	0,011	0,079	0,021	0,015
	V	0,002	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000
	Cr	0,002	0,004	0,000	0,003	0,000	0,000
	Mg	0,311	0,339	0,008	0,455	0,012	0,003
	Mn	0,015	0,024	0,113	0,021	0,027	0,027
	Fe2+	1,618	1,614	0,726	1,709	1,583	1,498
	Li*	0,188	0,00	0,801	0,000	0,326	0,359
	∑Y	3,000	3,000	2,8197	3,000	2,9770	3,000
X	Ca	0,011	0,011	0,020	0,035	0,009	0,002
	Na	0,481	0,561	0,794	0,611	0,622	0,653
	K	0,011	0,006	0,005	0,008	0,005	0,006
	Cs	0,000	0,000	0,000	0,0005	0,000	0,002
	□	0,497	0,422	0,181	0,346	0,364	0,337
OH	3,926	3,835	3,8340	3,703	3,7033	3,647	
F	0,074	0,165	0,1660	0,297	0,2967	0,353	

Designação	Foiteite	Schorl	F-Elbaite	Schorl	Schorl	Schorl
------------	----------	--------	-----------	--------	--------	--------

Tabela 21.IV - Composições de turmalinas das outras ocorrências estudadas (análises em microsonda electrónica) e fórmulas estruturais baseadas em 31 aniões (O, OH, F). * -valores calculados por estequiometria

Das composições de turmalinas de Arga analisadas, destaca-se ainda o F por se verificar que este elemento ocorre com valores elevados o suficiente, para intervir na classificação das diferentes turmalinas, principalmente das verdes, azuis e róseas. Estas apresentam na maioria dos casos valores superiores a 0.5 apfu F, alcançando o valor máximo nos 0.86 apfu F, detetado

numa turmalina verde escura do corpo da Balouca Norte. As turmalinas verdes da Balouca Norte e Sul, do Lousado e Verdes destacam-se das róseas e as azuis nodulares por conterem, em média, os maiores valores de F e finalmente as turmalinas negras do Lousado e Lourinhal representam as amostras com os menores valores de F, variando 0.059 a 0.311 apfu F.

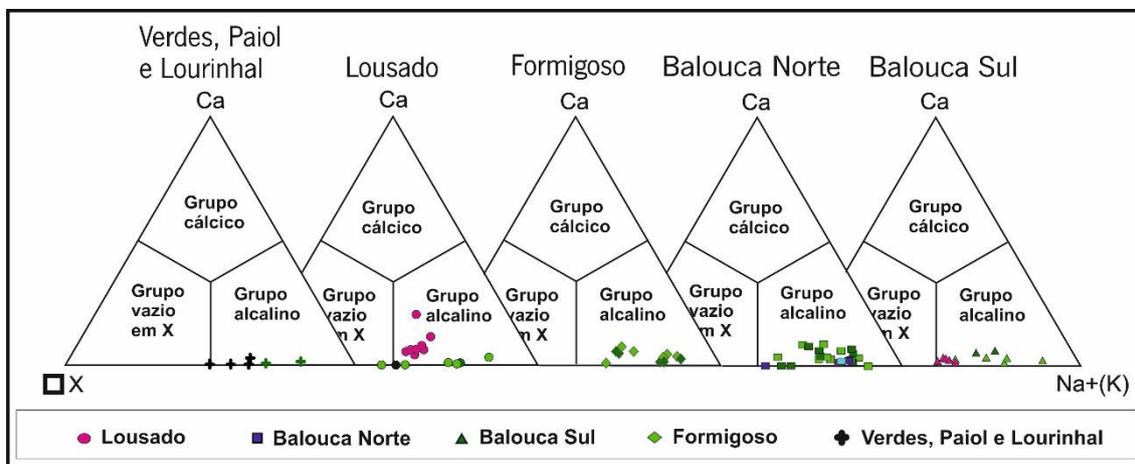


Figura 40 - Composições das turmalinas pegmatíticas em estudo, projetadas no diagrama ternário Ca- Na+K -X□, representativo da ocupação dominante no sítio X estrutural.

A projeção das composições obtidas na análise pontual, no diagrama triangular Ca- Na+K -X□ (fig. 40), que define a ocupação das posições tetraédricas X, demonstra que as turmalinas estudadas são maioritariamente alcalinas. A exceção é representada por uma amostra negra do pegmatito do Lourinhal e por uma amostra verde do Lousado, que se projetam nos domínios do diagrama referentes às turmalinas com excesso de vazios nas posições estruturais X. Das tabelas 15.IV a 21.IV percebe-se que o Na é o catião dominante nas composições das turmalinas, atingindo um valor máximo de 0.88 apfu Na. Os valores mais elevados encontram-se nas amostras verdes e azuis, notando-se uma diminuição dos valores nas amostras negras e róseas. Os menores valores de Na encontram-se obviamente nas amostras cujo espaço X é dominado por vazios estruturais. As turmalinas róseas do Lousado são, no conjunto de amostras analisadas, as que se aproximam mais dos domínios cálcicos do diagrama da figura 40, sendo também as que apresentam maiores valores de Ca (0.08 a 0.21 apfu Ca).

IV.2. Tipos mineraloquímicos principais

Além das composições químicas e das respetivas fórmulas estruturais das turmalinas analisadas, as tabelas 15.IV a 21.IV apresentam a atribuição dos tipos mineraloquímicos adequados a essas composições. A partir desta atribuição e com base nos diagramas da figura 42, constata-

se que a maioria das composições de turmalinas coloridas do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga enquadra-se na série elbaíte-lidicoatite, devido à grande prevalência das espécies F-elbaíte e elbaíte, onde o tipo mineralógico mais comum é a F-elbaíte. Em quantidades menores regista-se a ocorrência de elbaítes e schorl, registando-se ainda uma amostra de rossmanite e uma de foitite (tabs. 15.IV a 21.IV, figs. 41 e 42).

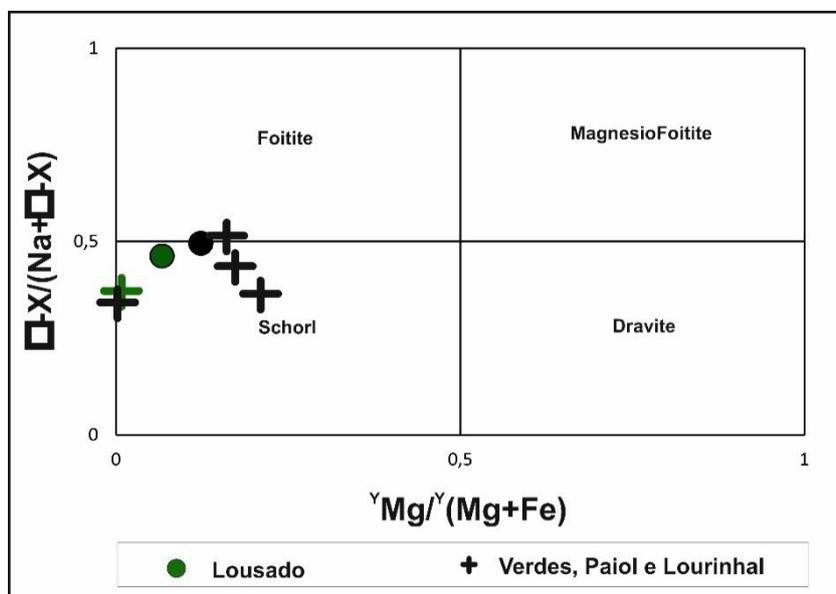


Figura 41 – Classificação das turmalinas estudadas do Lousado, Verdes, Paiol e Lourinhal através da projecção no diagrama $X_{\square}/(Na+X_{\square})$ sobre $Y_{Mg}/Y(Mg + Fe)$

As turmalinas azuis, verdes e róseas selecionadas das zonas intermédias e nucleares e das unidades de substituição da Balouca Norte e Sul, de Verdes e do Formigoso são todas F-elbaítes a elbaítes, com o predomínio das F-elbaítes sobre as elbaítes devendo-se aos teores consideráveis de F que caracterizam essas amostras.

Do conjunto de amostras verdes e róseas do Lousado, à semelhança com o que ocorre nos corpos anteriormente descritos, os tipos mineralógicos predominantes são as F-elbaítes, ocorrendo as elbaítes em menor número. Caracterizou-se ainda nas amostras deste corpo uma amostra verde clara correspondendo a uma rossmanite, bem como amostras com composições atribuídas à espécie schorl, sendo uma negra e outra verde muito escura (figs. 41 e 42).

O tipo mineralógico referente à schorl está também representado nas amostras verde escura e preta do Paiol do Formigoso e nas amostras negras do filão cruzado e do Lourinhal, sendo que neste corpo ainda se regista a única ocorrência de uma amostra atribuída ao tipo mineralógico foitite (fig. 41).

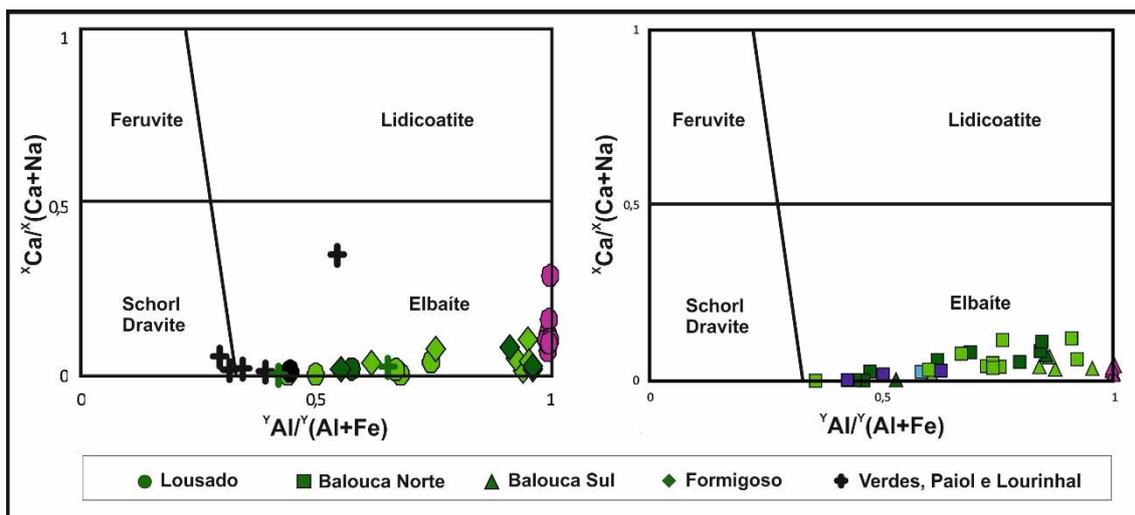


Figura 42 – Classificação das turmalinas estudadas do Lousado, Balouca e Formigoso, através do diagrama $x_{Ca}/(Ca+Na)$ sobre $y_{Al}/(Al+Fe)$, destacando o predomínio das elbaïtes

Além das análises pontuais em MSE, também se realizaram análises em DRX, no laboratório de Difractometria de Raio- X da Universidade do Minho. Foi analisado num difractorómetro com ampola de Cu sobre radiação $K\alpha$ no intervalo 2θ , um conjunto de 28 pós de turmalinas referentes a amostras morfológica e parageneticamente semelhantes às analisadas em MSE e verificou-se:

- ❖ A ocorrência de elbaïte como espécie mais recorrente nas turmalinas de Lousado, Balouca e Formigoso (tab. 22.IV), com picos de reflexão a ajustarem-se melhor a esta espécie do que à schorl ou à lidicoatite;
- ❖ Os picos referentes à composição olenítica foram caracterizados em amostras azuis nodulares da Balouca Norte;
- ❖ Todas as amostras negras analisadas apresentam os picos de reflexão típicos da schorl;
- ❖ Alguns espectros de amostras de turmalinas róseas do Lousado ajustam-se melhor às reflexões características da espécie lidicoatite padrão do que à elbaïte, destacando a possível ocorrência desta espécie no conjunto das turmalinas coloridas de Arga.

Espécie	Quantidade de amostras
Elbaïte	15
Lidicoatite	4
Schorl	5
Olenite	4

Tabela 22.IV – Classificações obtidas por DRX de 28 pós de turmalinas dos corpos em estudo

A DRX salienta que os espectros referentes às turmalinas nodulares azuis ajustam-se à olenite, o que é concordante com a identificação atribuída por Leal Gomes (2003) para as mesmas turmalinas, porém contrariando os resultados obtidos nas análises pontuais, nos quais estas foram consideradas elbaïtes, assim como referido em Leal Gomes (1994). A divergência na classificação das mesmas amostras pode ser aceite, se for considerado que as suas composições posicionam-se ao longo da série olenite-elbaïte, onde maiores quantidades da molécula olenítica fazem com que as composições se aproximem deste tipo mineroquímico. Outra justificação prende-se com o facto da análise pontual não incluir os reais teores de OH, B e Li, que são obtidos por cálculo estequiométrico, desta forma, a classificação das turmalinas oleníticas, não líticas e desidratadas, vai ser condicionada e enviesando-se para composições elbaïticas.

A identificação dos tipos mineroquímicos através de DRX veio confirmar o predomínio da série elbaïte-lidicoatite denunciado pela análise pontual. Fundamentando-se na diversidade de composições enquadradas no intervalo do tipo mineroquímico atribuído à elbaïte e na definição de amostras róseas caracterizadas como ricas em Ca, comprova-se a extensão até composições próximas do membro final lidicoatítico desta série, pelas turmalinas de Arga.

IV.3. Tendências de substituição isoestrutural

As diversas variações observadas ao nível das composições químicas das turmalinas são responsáveis pela génese dos diferentes tipos mineroquímicos existentes, devido a um conjunto de substituições isoestruturais que operam na fórmula estrutural. Os principais mecanismos de substituição nas turmalinas ocorrem nos espaços X e Y, sendo facilmente percecionados através da representação diagramática das correlações entre os elementos que se incluem nesses espaços.

No Campo Aplito-Pegmatítico de Arga, Leal Gomes (1994; 2003) e Leal Gomes e Lopes Nunes (1990), consideraram que a generalidade das turmalinas se inseria na série isomórfica elbaïte-lidicoatite, sendo a variabilidade composicional dependente da substituição $(Li_{1.5}Al_{1.5})(Fe^{2+})$.³ É este, pois, o principal mecanismo de substituição a atuar nas turmalinas de Arga (fig. 43a, b e c).

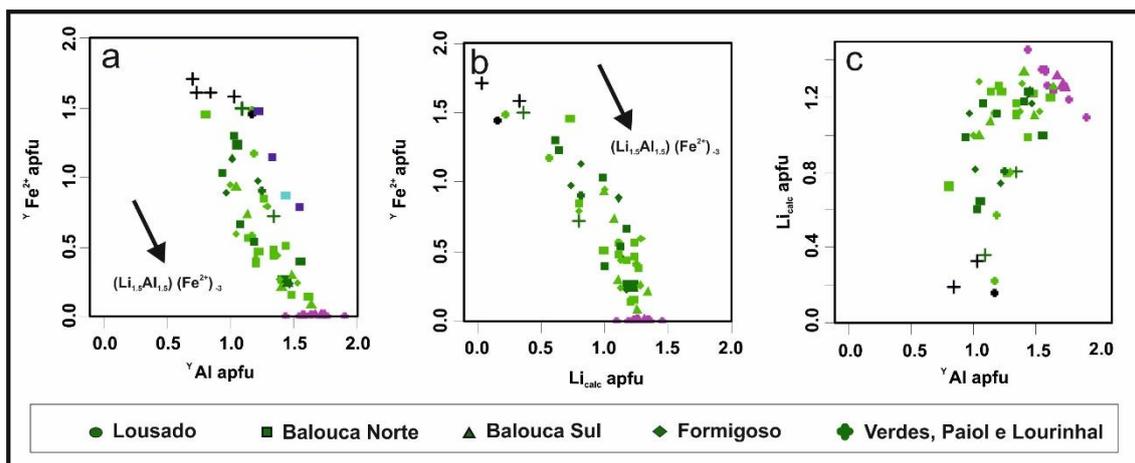


Figura 43 – Diagramas de variação composicional das turmalinas coloridas em estudo. a- fracionamento Fe/Al ; b- fracionamento Fe/Li_{calc}; c- fracionamento Li_{calc}/Al. Os vectores de substituição principais estão representados pelas setas negras

O Fe e possivelmente o Mg foram substituídos gradualmente, por teores de Al acompanhados posteriormente por teores Li_{calc} (fig.43a), permitindo a evolução das espécies mais ricas em Fe, as schorl, para as olenites e para as elbaïtes, continuando esta substituição a operar até alcançar as fases elbaïticas róseas mais ricas em Ca, uma vez que exprimem os menores teores de Fe e evidentemente os maiores teores de Li_{calc}. Este mecanismo é observado em todas as turmalinas dos corpos caracterizados, sendo mais evidente nos corpos do Lousado e Balouca.

Outro mecanismo de substituição evidente na figura 44a e b marca a transição de elbaïtes para lidicoatites, expressa pelas substituições: $\text{CaLi}_{0.5}(\text{NaFe}_{0.5})_{-1}$ e principalmente $\text{CaLi}_{0.5}(\text{NaAl}_{0.5})_{-1}$ sendo por esta última denominada como substituição lidicoatítica (Burt, 1989). Na figura 44b, este mecanismo desenha uma tendência bem destacada no sentido do enriquecimento em Li_{calc} e em Ca, culminando nas elbaïtes róseas do Lousado ricas em Ca. As restantes elbaïtes do Lousado, bem como todas as outras distribuem-se ao longo desta tendência em função da maior quantidade de Li_{calc} + Al e Ca que possuam, a tendência é marcada por iniciar-se junto da base do diagrama nas schorl e elbaïtes pobres em Ca. A identificação da lidicoatite nas amostras, somente por DRX e a ausência desta espécie nos diagramas das composições finais confinadas a esta substituição, justificam-se pelos respetivos teores de Ca, que mesmo favorecidos pela substituição $(\text{Ca}_{0.5}\square_{0.5})_{-1}(\text{Na})_{-1}$ (fig. 44c) são consideravelmente baixos, não conseguindo suplantar-se aos teores de Na, mantendo as turmalinas a sua composição elbaïtica.

O vetor da substituição $(\text{Ca}_{0.5}\square_{0.5})_{-1}(\text{Na})_{-1}$ (Burt, 1989) representado no diagrama da figura 44c é muito discreto, sendo delineado somente por duas amostras róseas mais enriquecidas em

Ca, que se destacam do conjunto total das restantes amostras que se concentram junto do polo rico em Na e pobre em Ca desse mesmo diagrama.

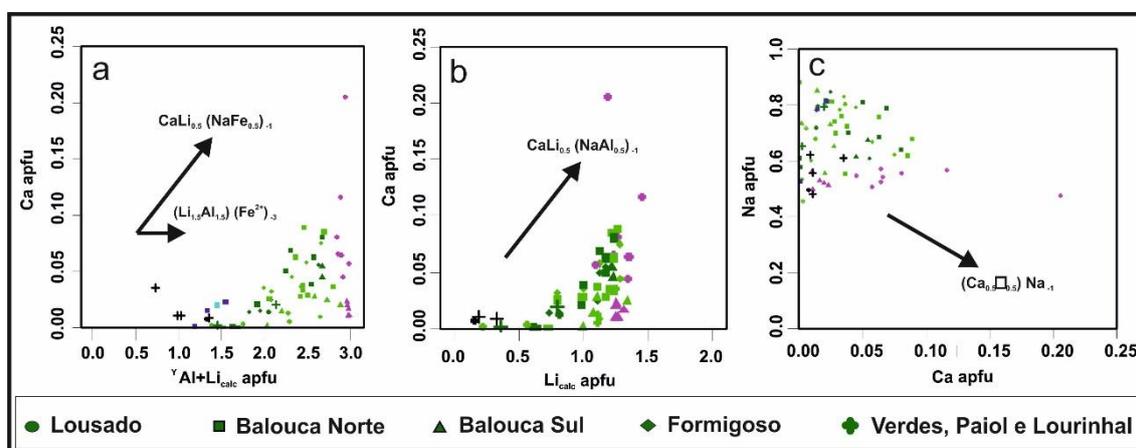


Figura 44 - Diagramas de variação composicional das turmalinas coloridas em estudo. a- fracionamento Ca/AL+Li_{calc}; b- fracionamento Ca/Li_{calc}; c- fracionamento Na/Ca. Os vectores de substituição principais estão representados pelas setas negras

Sabendo que a espécie dominante é a F-elbaíte, existem outros mecanismos de substituição, com tendências menos marcadas, sendo efetivamente menos recorrentes nos processos de substituição.

O mecanismo de substituição $X\square Al (NaR^{2+})_{-1}$, (Burt, 1989; Neiva e Leal Gomes, 2011) representado na figura 45a surge associado à substituição elbaítica, sendo responsável neste caso, pela introdução de vazios estruturais no espaço X aquando da incorporação do Al. A intervenção deste, observa-se na evolução das elbaítes e F-elbaítes do Lousado, Balouca e Formigoso, desenvolvendo uma tendência mais ou menos bem definida de composições com muito Na e Fe como as elbaítes e F-elbaítes verdes para composições ricas em $X\square$ e Al, como as elbaítes e F-elbaítes róseas, desviam-se desta tendência as schorl e as F-elbaítes azuis nodulares, que não parecem ser afetadas por este mecanismo de substituição.

O facto das turmalinas azuis nodulares não se inscreverem na tendência definida pelas elbaítes reforça a ideia de estas poderem de facto corresponder a olenites. Efetivamente assume-se que na solução sólida schorl-foitite-olenite ocorre a incorporação progressiva de Al em Y por substituição do Mg e Fe que é compensada na foitite pela criação de vazios em X e na olenite pela substituição de O^{2-} por OH. Este mecanismo fica representado pelo vetor horizontal, $AlO (R^{3+}OH)_{-1}$ que está identificado no diagrama da figura 45a e poderá explicar alguma distribuição das projeções referentes às schorl e turmalinas nodulares da Balouca.

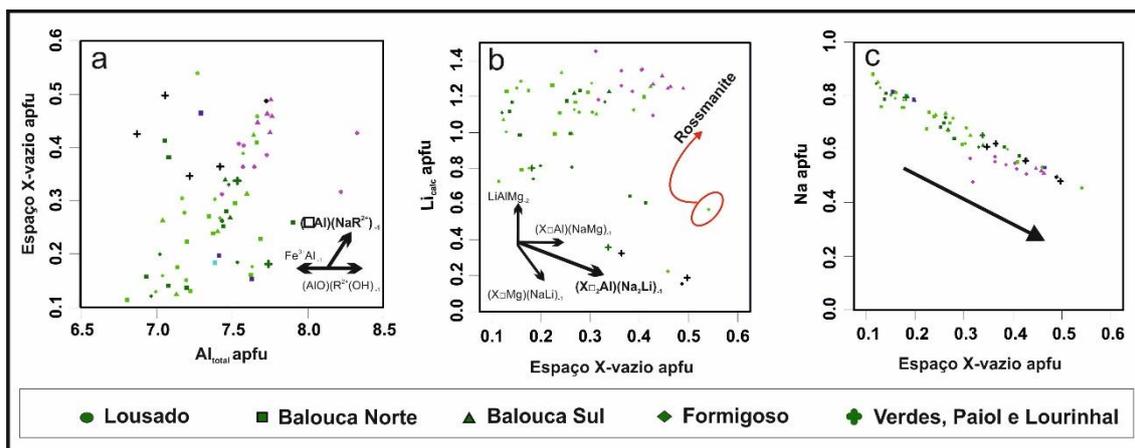


Figura 45 – Diagramas de variação composicional das turmalinas coloridas em estudo. a- fracionamento $X\Box/Al$; b- fracionamento $Li_{calc}/X\Box$; c- fracionamento $Na/X\Box$. Os vectores de substituição principais estão representados pela seta negra

As amostras de rossmanite determinadas na análise mineraloquímica são raras (1), não se podendo referir tendências definidas pelos mecanismos de substituição que possam operar neste tipo mineraloquímico. Porém, a boa correlação negativa entre o Na e o $X\Box$ e a dispersão dos valores de Li_{calc} em função $X\Box$, observadas na figura 45b, c, permitem indicar como possível mecanismo ocorrente, a substituição $(X\Box_2Al)(Na_2Li)_3$, ao longo da solução sólida elbaíte–rossmanite e em direção a esta última (Burt, 1989). A amostra de rossmanite do Lousado ao ser interpretada como integrante no conjunto total das amostras projetadas no diagrama da figura 45b, encontra-se ligeiramente afastada das elbaítes apresentando o mesmo sentido que o vetor de substituição representado, admitindo-se então que estas possam ter evoluído a partir de composições elbaíticas. Por sua vez, as elbaítes e F-elbaítes do Lousado, Balouca, Verdes, Paiol do Formigoso e Formigoso concentram-se no polo mais lítico do diagrama, tendo mais Li_{calc} e $X\Box$ as turmalinas róseas e menos as verdes, ao contrário, pelo polo menos lítico distribuem-se as schorl.

Dentro do conjunto das schorl, $(Fe)(Mg)_3$ é o mecanismo mais comum a operar na substituição da série schorl- dravite (Burt, 1989), mas não é evidente nas turmalinas analisadas ao ponto de poder definir uma tendência.

Como discutido acima o tipo mineraloquímico considerado para as amostras azuis nodulares não foi bem definido, tendo sido admitido que uma variabilidade composicional entre o tipo mineraloquímico elbaíte e olenite nestas amostras justificaria a diferente classificação atribuída. Burt (1989) referiu que a substituição $(AlO_2)(Li(OH)_2)_3$ opera na solução sólida elbaíte-olenite, sendo possivelmente através deste mecanismo que a olenite evoluiu na direção da elbaíte.

Foram analisados de forma independente das restantes amostras, cristais zonados concentricamente em relação a C_1 , procurando interpretar as variações composicionais decorrentes da zonalidade. Para o efeito foram selecionados 2 cristais do filão “E-W” do Lousado, bicolores, da transição unidade intermédia/unidade nuclear, com bordo róseo e núcleo verde azulado escuro, um cristal da unidade nuclear do filão “E-W” da Balouca Sul com núcleo róseo e bordo verde claro (“*watermelon*”) e uma amostra zonada da unidade intermédia do “*sill*” da Balouca Norte apresentando 3 zonas cromáticas diferentes, um núcleo verde escuro, um bordo verde claro pálido e uma pequena periferia com verde claro mais intenso.

As projeções nos diagramas A e B da figura 46 mostram que a composição dos cristais do Lousado e Balouca Norte varia do núcleo para o bordo no sentido do enriquecimento em Li e Al e diminuição do Fe. Relativamente ao Ca, observa-se também um enriquecimento deste no sentido do bordo, sendo gradual do núcleo para a periferia no cristal da Balouca Norte e bastante mais expressivo nos cristais do Lousado.

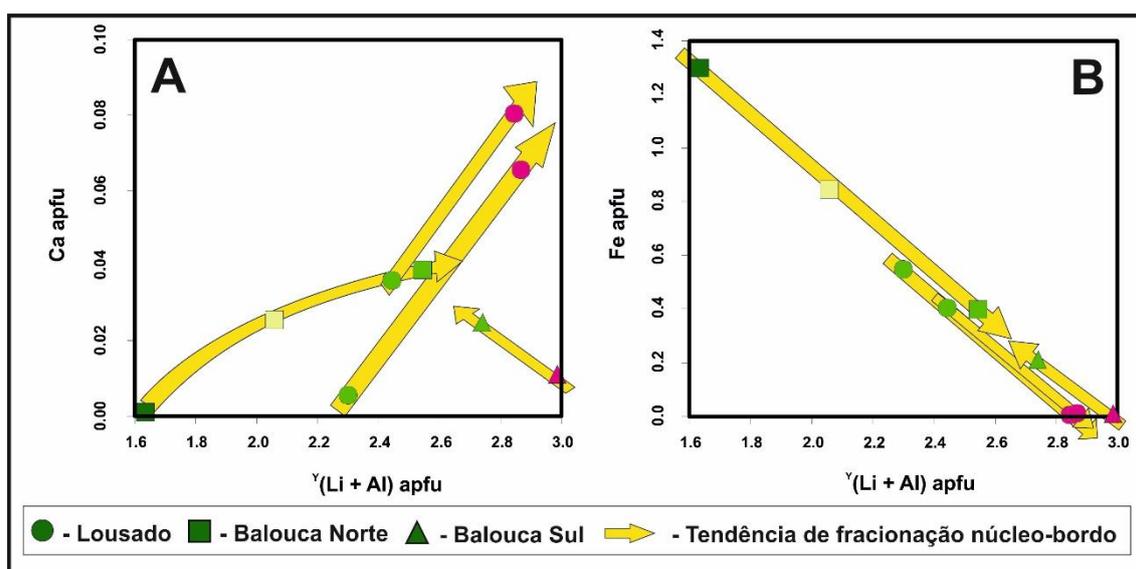


Figura 46 – Diagramas de variação composicional de cristais zonados de turmalinas do Lousado e Balouca, com a representação das tendências de fracionamento. A- fracionamento $Ca/Al + Li_{\text{alc}}$; B - fracionamento $Fe/Al + Li_{\text{alc}}$.

O cristal da Balouca Sul apresenta um padrão de fracionamento composicional diferente, ocorrendo no sentido inverso em relação aos restantes. Apresenta um bordo enriquecido em Fe comparativamente com o seu núcleo que é mais elbaítico, já os valores de Ca são maiores no bordo que no seu núcleo, assemelhando-se neste ponto, aos outros cristais zonados, embora sendo o seu núcleo mais rico em Al e Li.

Excluindo a amostra da Balouca Sul, a variação composicional observada nas zonalidades dos restantes cristais é coerente com o zonamento cromático, onde as zonas mais internas (núcleo) são verdes e mais escuras devido aos maiores valores de Fe presentes e as zonas de

bordadura são róseas ou verdes mais claras, observando-se nessas transições o incremento de Ca e principalmente Li e Al. Por apresentarem este padrão de fracionamento enquadram-se nas principais tendências de fracionamento definidas para as turmalinas de Arga.

A amostra da Balouca Sul é peculiar do ponto de vista composicional, uma vez que apesar do seu bordo apresentar-se ligeiramente mais enriquecido em Ca que o núcleo, é a maior quantidade de Fe que promove a sua cor verde, distinguindo-se do seu núcleo róseo mais lítico. Esta fracionamento ocorre no sentido oposto à tendência geral proposta para as turmalinas dos corpos de Arga, evoluindo de composições ricas em Al + Li para composições ricas em Fe.

Os maiores teores de Fe e menores de Li observados na amostra do “*sill*” da Balouca Norte, face os cristais dos filões “E-W” do Lousado e Balouca Sul, sugerem que esta teve origem num corpo menos evoluído que os corpos portadores das restantes.

IV.4. Tendências de evolução geoquímica interna dos corpos pegmatíticos deduzidas da composição do marcador turmalina

Leal Gomes (2003) no estudo de inclusões fluídas em turmalinas de Arga indicou que as condições de pressão e temperatura determinadas para inclusões nas turmalinas menos evoluídas, as elbaïtes verdes e olenites, são coerentes com a trajetória de fracionamento dos pegmatitos litíferos do enxame “*sill*” e da sua continuidade para os filões paroxismais, pelo menos ao nível das tendências primárias.

Assumindo então que a cristalização destas turmalinas é concordante com a fracionamento dos corpos pegmatíticos portadores e sabendo que a variação composicional nas turmalinas correlaciona-se com a composição global da rocha hospedeira, os dados das análises pontuais das turmalinas coloridas foram projetados nos diagramas triangulares, Al-Fe-Mg e Ca-Fe-Mg definidos por Henry e Guidotti (1985), podendo destacar-se qual a natureza geoquímica suporte das paragénese hospedeiras.

Constata-se que no diagrama Al-Fe-Mg, figura 47, todas as F-elbaïtes e elbaïtes verdes, azuis e róseas, bem como as schorl do Lousado e do Paiol do Formigoso localizam-se no campo 1, referente a aplitos e pegmatitos ricos em Li, com valores muito baixos de Mg. As schorl negras do Lourinhal projetam-se no campo 2 do diagrama, correspondendo aos aplitos, pegmatitos e granitos pobres em Li.

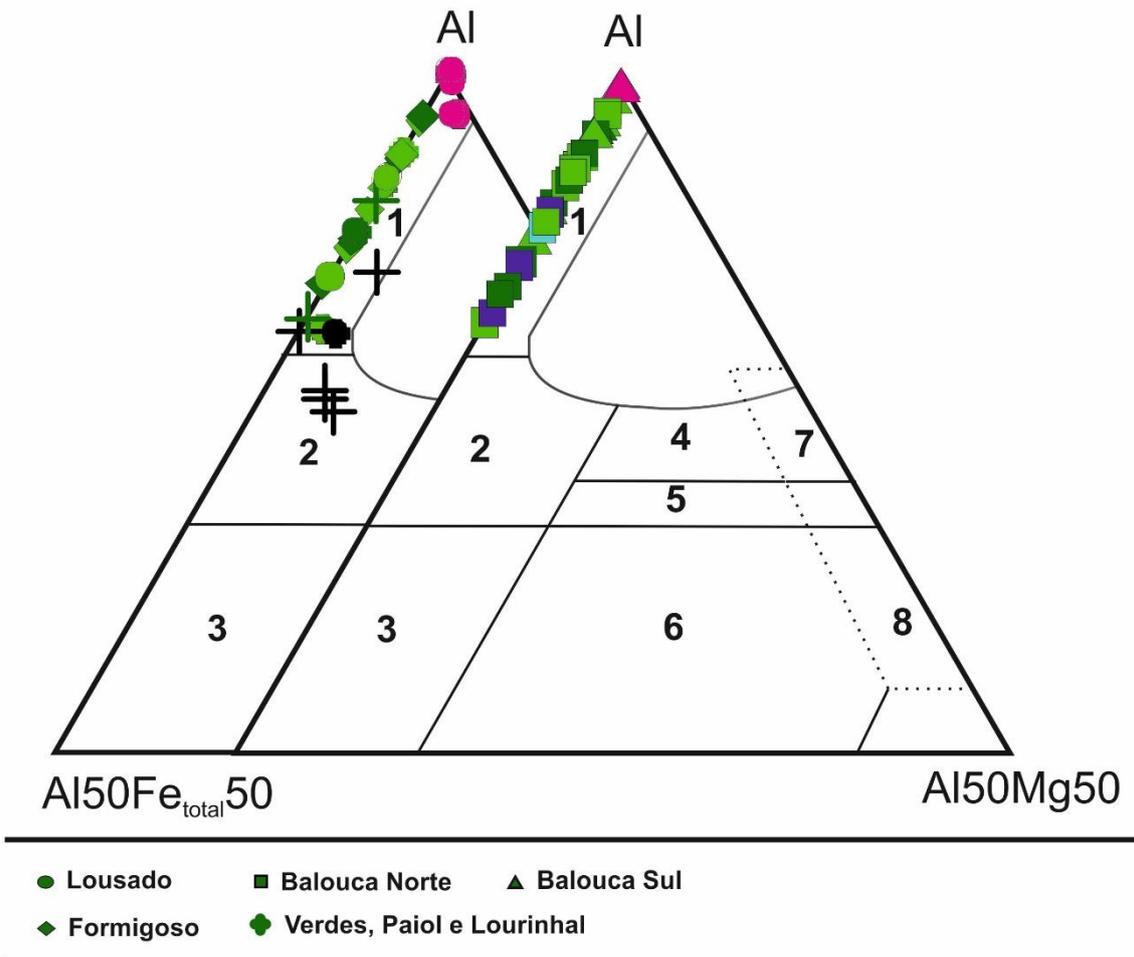


Figura 47 – Projeção das composições das turmalinas em estudo no diagrama Al-Fe-Mg de Henry e Guidotti (1985) para turmalinas de diferentes tipos rochosos. Domínios composicionais: 1- aplitos e pegmatitos graníticos ricos em Li; 2- aplitos, pegmatitos e granitos pobres em Li; 3- rochas quartzo-turmalínicas ricas em Fe³⁺; 4- metapelitos e metapsamitos com fases saturadas em Al; 5- metapelitos e metapsamitos sem fase saturadas em Al; 6- rochas quartzo-turmalínicas ricas em Fe³⁺, rochas calcossilicatadas e metapelitos; 7- rochas metaultramáficas pobres em Ca e metassedimentos ricos em Cr e V; 8- rochas metacarbonatadas e metapiroxenitos

Evidencia-se uma relação entre o tipo cromático e a composição com a sua paragênese, pois as turmalinas róseas encontram-se junto ao polo do Al e as verdes e azuis nodulares mais afastadas deste.

A mesma propensão para as elbaïtes verdes, azuis e róseas se projetarem em locais afastados é observada no diagrama Ca-Fe-Mg, figura 48, ao longo do eixo Fe-Ca, que especifica a tendência schorl-idicoatite, dentro do domínio do campo 1, atribuído aos aplitos e pegmatitos ricos em Li. Neste, as turmalinas azuis e verdes posicionam-se nas proximidades do polo rico em Fe, projetam-se no canto oposto as róseas, junto do vértice mais cálcico. As schorl do Lourinhal e Lousado são neste diagrama remetidas para o campo 2, atribuído aos corpos aplito-pegmatíticos pobres em Li.

As projeções observadas em ambos os diagramas exprimem uma sucessão paragenética operante nas turmalinas coloridas que, de acordo com Leal Gomes (1994) pode ser alargada aos corpos aplito-pegmatíticos litiníferos de Arga, demarcando uma evolução das fácies “*sill*” precursoras, marcada pelas turmalinas verdes e nodulares azuis e que se prolonga até expressões de paroxismo evolutivo nos filões “E-W” em turmalinas róseas enriquecidas em Li e Ca. As *schorl* negras ocorrem em corpos pobres em Li, não expressando paragéneses com minerais de Li, ou então ocorrendo nas salbandas metassomáticas, no contacto dos corpos litiníferos com o encaixante. A correlação estabelecida entre a cor e as paragéneses hospedeiras das turmalinas é apresentada na tabela 23.IV.

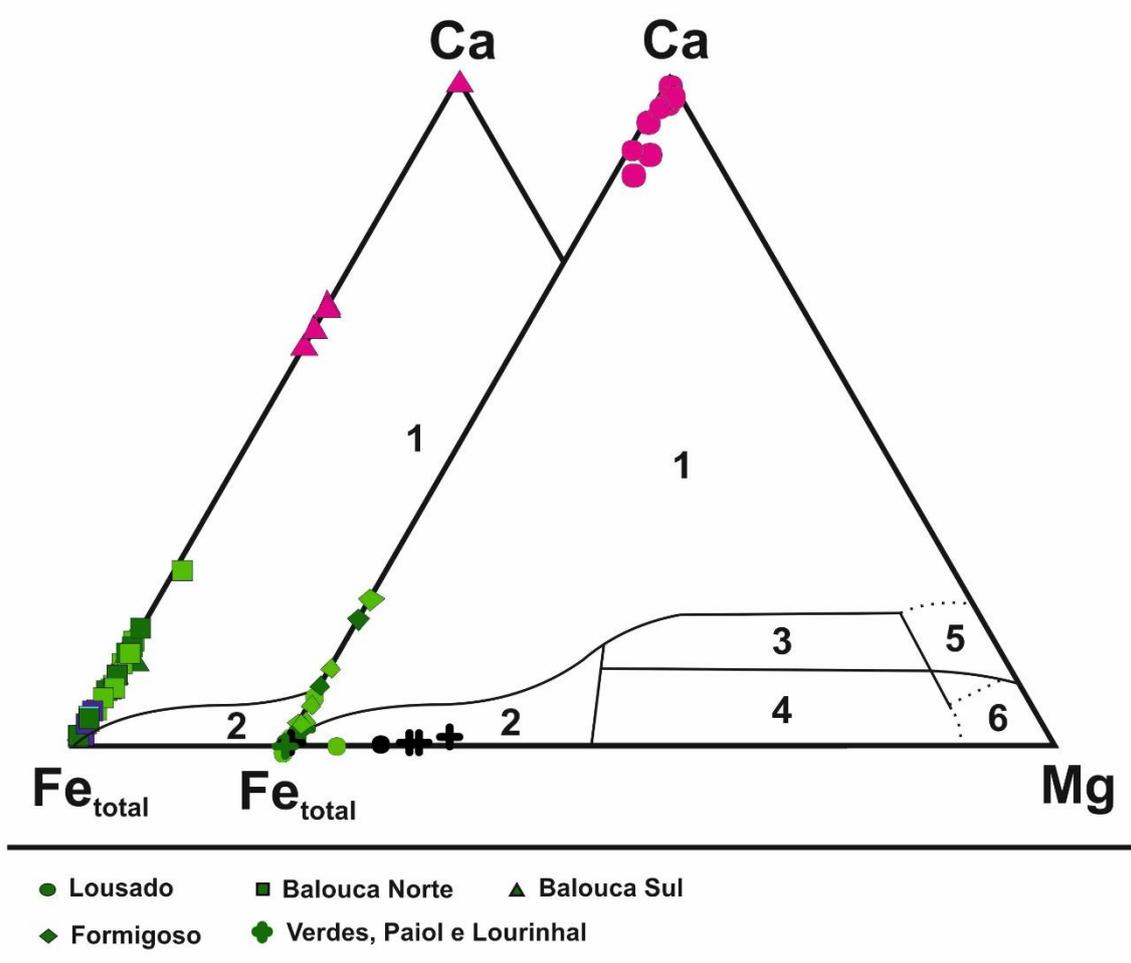


Figura 48 – Projeção das composições das turmalinas em estudo no diagrama Ca-Fe-Mg de Henry e Guidotti (1985) para turmalinas de diferentes tipos rochosos. Domínios composicionais em B: 1- aplitos e pegmatitos graníticos ricos em Li; 2- aplitos, pegmatitos e granitos pobres em Li; 3- metapelitos e metapsamitos ricos em Ca e rochas calcossilicatadas, 4- metapelitos e metapsamitos pobres em Ca e rochas quartzo-turmalínicas, 5- rochas metacarbonatadas, 6- rochas metaultramáficas

Espécie	Cor	Corpo		Paragéneses de base
		Fácies		
Schorl	Preta	"Sill"	Salbanda metassomática	Quartzo + feldspato + moscovite + albite
Olenite-elbaíte	Azul	"Sill"	Aplítica	Albite + feldspato + quartzo ± cassiterite ± Nb-tantalatos ± Lazulite
Elbaíte	Verde	"Sill"	Pegmatítica	Feldspato + albite + quartzo + moscovite ± zinvaldite ± berilo ± ambligonite ± cassiterite ± Nb-tantalatos
Elbaíte-Lidicoatite	Rósea	Filão "E-W"	Pegmatítica paroxismal	Lepidolite maciça + quartzo ± cleavelandite ± ambligonite ± polucite ± cookeite

Tabela 23.IV – Quadro-síntese das relações entre as paragéneses e composições das turmalinas

Com base nas projeções dos diagramas anteriores e considerando os principais vetores de substituição entre as fases turmalínicas, pode-se delinear uma tendência de fracionamento operante nestas e que se traduza nas suas paragéneses hospedeiras.

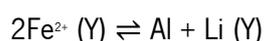
Desta forma as paragéneses iniciais dos corpos "sill" ricos em Li geraram-se a partir de magmas peraluminosos ricos em Na, Al e consideráveis teores de Li, F e B ainda a temperaturas altas, permitindo a gênese das primeiras turmalinas coloridas, ricas em Na e Al e que marcam a primeira manifestação do Li nestes corpos. As sucessivas etapas de injeção de magmas cada vez mais diferenciados e enriquecidos em Li promovem uma fracionamento dentro das paragéneses ao longo desses corpos do Fe em favor do Al e Li, originando turmalinas cada vez mais ricas em Al e Li, as elbaítes e F-elbaítes verdes a azuis. Estas de acordo com Leal Gomes (1994) expressam as turmalinas mais evoluídas dos corpos "sill". Os filões "E-W" acolheram os magmas residuais dos corpos "sill" altamente enriquecidos em elementos raros, especialmente Cs e Li, promovendo uma fracionamento ainda mais expressiva no sentido do enriquecimento em Li e Al e da diminuição do Fe. Esta tendência de fracionamento primária culmina com um enriquecimento ainda mais marcado em Li, com aportes, possivelmente metassomáticos, de Ca, dando origem a elbaítes róseas ricas em Ca e pobres em Fe e mesmo lidicoatites através da substituição bicatiónica do Na por Ca e do Fe por Li em paragéneses de paroxismo evolutivo com lepidolite e polucite (Leal Gomes, 1994).

A interação das paragêneses primárias com fluidos tardios metassomáticos ou mesmo hidrotermais pode originar uma ligeira inversão da tendência de fracionamento, inclinando para um aumento de Fe e Na e com considerável Al, originando elbaïtes tardias ou sobrecrescimentos e zonalidades mais férricas na bordadura de turmalinas com composições mais evoluídas.

IV.5. Tendências gerais da evolução geoquímica das turmalinas nos sistemas pegmatíticos LCT do N de Portugal

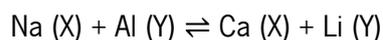
Os mecanismos de substituição isoestrutural operantes nas turmalinas ao longo da fracionamento dos sistemas pegmatíticos permitem sequenciar os diferentes tipos mineroquímicos ocorrentes, esboçando a tendência de evolução geoquímica destes ao longo das unidades portadoras.

Dos principais mecanismos de substituição caracterizados nas turmalinas de Arga, o mais recorrente ao longo de todos os corpos é a substituição elbaítica:



Através desta, as turmalinas mais precoces ricas em Fe e algum Mg, vão evoluindo para elbaïtes cada vez mais ricas em Al e Li.

Com o decorrer da fracionamento ocorre uma outra substituição fundamental nestes corpos, a substituição lidicoatítica:



Esta substituição alcança o tipo mineroquímico mais evoluído, a lidicoatite, expressando um enriquecimento gradual em Li e Ca a partir de elbaïtes.

Desta forma, com pequenas variações ao longo de cada corpo estudado, a sucessão mineroquímica generalizada das turmalinas do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga derivada da prevalência das substituições é:



De acordo com esta sequência e com base nos diagramas da figura 49, pode-se delinear a tendência de evolução geoquímica das turmalinas do campo de Arga, que pode também ser generalizada para as restantes turmalinas dos sistemas pegmatíticos LCT do N de Portugal.

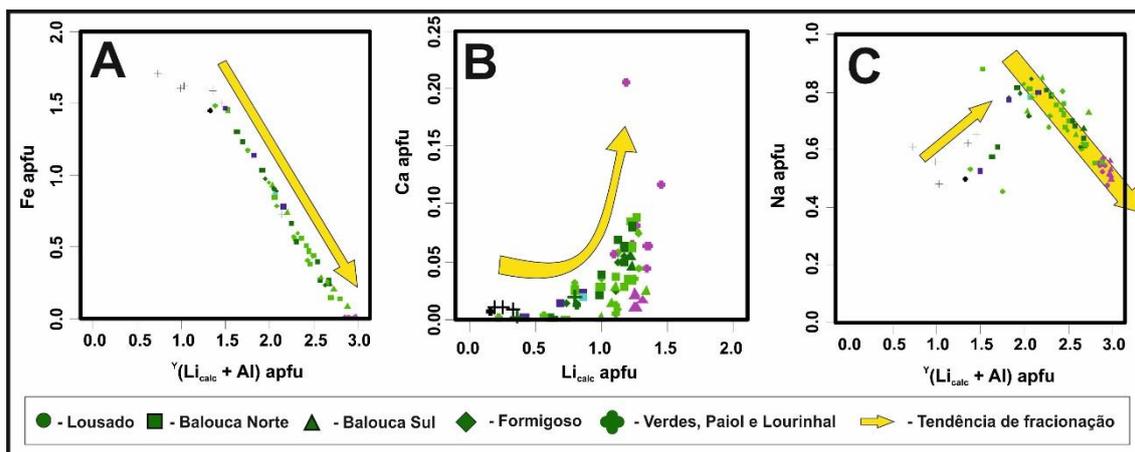


Figura 49 - Diagramas de variação composicional das turmalinas coloridas em estudo, indicando as tendências gerais de fracionamento destas nos corpos do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga. A- fracionamento Fe/ $Li_{calc}+Al$; B- fracionamento Ca/ Li_{calc} ; C- fracionamento Na/ $Li_{calc}+Al$

As primeiras turmalinas a formarem-se nestes corpos pegmatíticos pertencem à série schorl –dravite, sendo mais marcada a molécula schorlítica, com composições significativas de Fe. A substituição do Fe por Al e Li, acompanhada por um enriquecimento em Na, marca a tendência de fracionamento, dando origem a elbaïtes (fig.49A e C). A evolução geoquímica culmina com um enriquecimento mais marcado em Li, acompanhado por um aumento do Ca que substitui o Na, originando as turmalinas mais tardias, elbaïtes ricas em Ca ou mesmo lidicoatites (fig. 49B e C).

Desta forma a tendência geral de evolução geoquímica nas turmalinas dos sistemas pegmatíticos do N de Portugal, faz-se no sentido do enriquecimento em Li e Al e redução de Fe de turmalinas precoces até às mais tardias.

IV.6. Comparação da mineraloquímica das turmalinas LCT da Província Varisca com as de outros enquadramentos geotectónicos

Como foi referido, mundialmente ocorrem campos pegmatíticos muito conhecidos pela mineralização turmalínica que comportam. Assim, no sentido de estabelecer comparações com os termos composicionais desses campos, os resultados obtidos para as turmalinas coloridas de Arga foram projetados nos diagramas da figura 50 juntamente com os que dizem respeito a esses locais paradigmáticos. Na projeção foram utilizados dados referentes a elbaïtes e/ou lidicoatites provenientes do Grupo Pegmatítico de Naipa em Moçambique (Neiva e Leal Gomes, 2010 e Neiva e Leal Gomes, 2011), do pegmatítico de Black Rapids no Alasca (Lussier *et al.*, 2011), do pegmatito Pakeagama Lake no Canada (Tindle *et al.*, 2002), do pegmatito Anjanaboina em

Madagáscar (Dirlam *et al.*, 2002), do pegmatito Pinilla de Fermoselle em Espanha (Roda-Robles *et al.*, 2004) e da Província Pegmatítica de Borborema no Brasil (Soares *et al.*, 2008), corpos aplito-pegmatíticos e pegmatíticos de elementos raros da família LCT, geralmente zonados, com núcleo de quartzo com bastantes cavidades miarolíticas e apresentando em alguns casos unidades lepidolíticas.

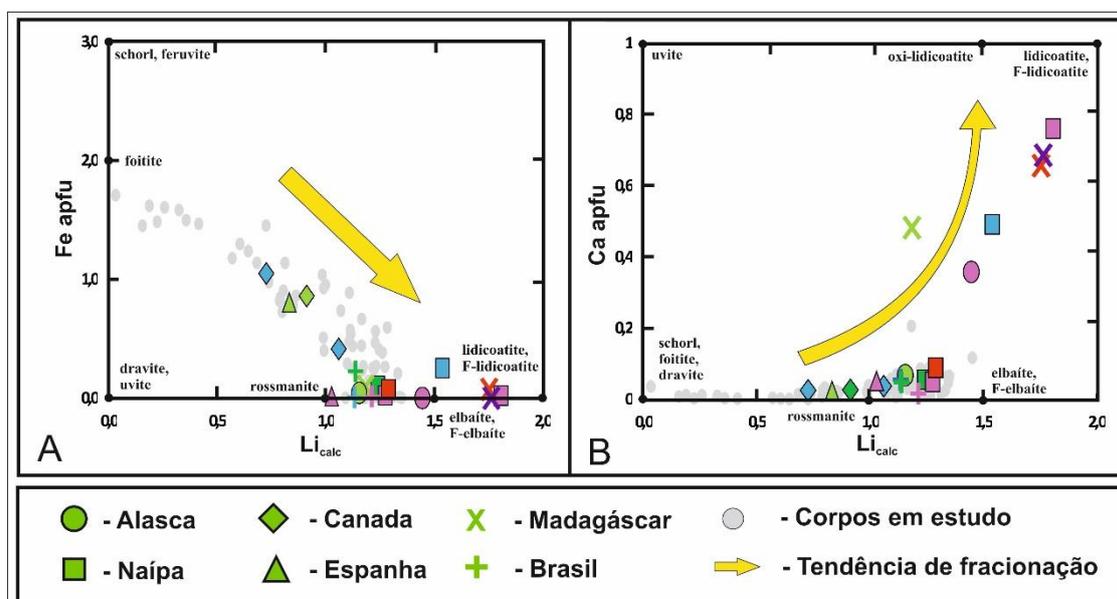


Figura 50 – Diagramas de variação composicional (apfu) das turmalinas pegmatíticas: A – fracionamento Fe/Li_{calc} evidenciando a tendência de fracionamento elbaítica; B - fracionamento Ca/Li_{calc} evidenciando a tendência de fracionamento lidicoatítica

No diagrama A da figura 50 verifica-se a tendência da fracionamento no sentido do enriquecimento em Li, já observada nas turmalinas coloridas de Arga, marcando a transição de termos ricos em Fe para termos enriquecidos em Li. As composições elbaíticas do Canada que apresentam mais Fe representam transições de schorl para elbaíte (Tindle *et al.*, 2002). Nota-se no mesmo diagrama, o prolongamento para posições muito ricas em Li das composições de lidicoatites de Madagáscar e Moçambique, sendo este coerente com os maiores teores de Li que este tipo mineralógico contém face as elbaítes. A correlação entre o tipo cromático e a respectiva composição, à semelhança do que ocorre nos corpos de Arga, é também perceptível, uma vez que as turmalinas azuis e verdes projetam-se em posições mais ricas em Fe e com menor quantidade de Li que as róseas ou avermelhadas, com a mesma proveniência. Este processo é evidente no caso das composições selecionadas de turmalinas de Naípa, onde as elbaítes de cor verde e cor rósea das unidades de substituição apresentam uma razão Li/Fe menor que as lidicoatites azul e rósea, representativas de uma cavidade miarolítica do núcleo, mas em cada uma dessas unidades

portadoras, o tipo cromático mais rico em Li é sempre o róseo (Neiva e Leal Gomes, 2010 e Neiva e Leal Gomes, 2011).

A adição das composições de turmalinas coloridas destes corpos paradigmáticos, às composições de turmalinas de Arga, patente no diagrama B da figura 50, veio comprovar a tendência de fracionamento dentro dos corpos LCT para o polo lidicoatítico, assinalada de forma muito ténue nas turmalinas de Arga. Com isto, observa-se perfeitamente uma evolução no sentido do enriquecimento simultâneo de Li e Ca pelas espécies mineroquímicas mais evoluídas de todos os corpos analisados, culminando nas lidicoatites de Naípa e Madagáscar.

As amostras de Madagáscar, embora descrevendo a mesma tendência de fracionamento que as outras turmalinas (um enriquecimento gradual em Li e Ca no sentido dos tipos mineroquímicos mais evoluídos), partem de termos composicionais muito mais ricos em Ca, salientando a particularidade desta ocorrência face as restantes (Dirlam *et al.*, 2002).

A evolução composicional representada nos diagramas manifesta uma tendência de fracionamento que é comum a todas as turmalinas, traduzindo-se numa variação do tipo cromático e mineroquímico. Podemos assim representar a fracionamento das turmalinas coloridas desses corpos de forma generalizada como:

- ✓ Naípa, elbaítes verdes → elbaítes róseas a vermelhas → lidicoatites azuis → lidicoatites róseas;
- ✓ Madagáscar, lidicoatite verde → lidicoatites vermelhas/púrpura;
- ✓ Canada, elbaítes azuis ricas em Fe → elbaítes verdes → elbaítes azuis ricas em Li;
- ✓ Espanha, elbaíte verde → elbaíte/rossmanite rósea;
- ✓ Brasil, elbaítes verdes e azuis → elbaíte rósea;
- ✓ Alasca, elbaíte verde → lidicoatite rósea.

Do exposto, comprova-se que as turmalinas de Arga obedecem à fracionamento geoquímica geral típica da maioria dos sistemas pegmatíticos LCT, um enriquecimento em Li generalizado, com incorporação de Ca capaz para gerar os tipos cromáticos mais evoluídos. A fracionamento a partir do Fe e em direção a composições mais ricas em Li e Al, as elbaítes, nas amostras das turmalinas de Arga apresenta a mesma tendência que a maioria das turmalinas de outros locais, menos evidente nas turmalinas de Arga é a tendência correspondente à fracionamento mais evoluída

no sentido do enriquecimento final em Ca e Li, que nas amostras dos outros corpos se encontra bem estabelecida.

A maior particularidade reside no destaque das lidicoatites de Naípa e Madagáscar em relação às restantes turmalinas, devido à elevada quantidade de Ca e Li que apresentam.

A capacidade de génese de uma diversidade mineroquímica compatível com a identificada nos corpos com outros enquadramentos geotectónicos demonstra a complexidade geoquímica do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga, quando comparada a sua reduzida dimensão com a que estes campos apresentam.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

V.1. Aspetos essenciais das composições das turmalinas pegmatíticas LCT da Serra de Arga

No Campo Aplito-Pegmatítico de Arga, a identificação das unidades portadoras de turmalinas coloridas mais produtivas verificou-se nas zonas mais internas dos corpos “*sill*” aplito-pegmatíticos LCT e dos filões de paroxismo evolutivo litinífero, com lepidolite.

Com base na caracterização da diversidade cromática que era admitida para estas turmalinas, reconheceu-se, a partir de amostras selecionadas, a ocorrência de 99 cores diferentes ao longo desses corpos. As cores mais comuns das turmalinas identificadas nos corpos “*sill*” são o verde a verde azulado muito escuro (índices de Munsell 2.5G 2/2 a 10BG 3/6) e o azul (5BG 4/6 a 5BG 8/4), já nos pegmatitos paroxismais os tons róseos (índices de Munsell 2.52PR 8/4 a 10R 9/2) a par dos verdes (5G 3/8 a 7.5G 6/10) são os mais predominantes.

A variabilidade cromática destas turmalinas traduz-se num espectro composicional de tal forma alargado, que permite definir a ocorrência generalizada de schorl, elbaite, F-elbaite, lidicoatite e olenite ao longo dos corpos aplito-pegmatíticos LCT de Arga. Com menor expressão ocorrem ainda composições atribuídas ao tipo mineroquímico rossmanite e foitite.

V.1.1. *Schorl*

A *schorl* foi caracterizada como o tipo mineroquímico de turmalina com ocorrência mais frequente no Campo Aplito-Pegmatítico de Arga, sendo identificada nos corpos pegmatíticos, nas litologias dos metassedimentos encaixantes e nos granitos associados. A ocorrência restrita aos aplito-pegmatitos LCT observa-se nas faixas de metassomatismo do encaixante e nas zonas de bordadura, exibindo uma cor que varia de negro a verde muito escuro. Composicionalmente caracteriza-se por ser o tipo mineroquímico mais férrico e o que apresenta menores valores de Al, F e Ca. Distinguem-se ainda dos restantes tipos mineroquímicos, pelo maior conteúdo de Mg e Ti que contêm.

A quantidade de Fe nas *schorl* dos aplito-pegmatitos LCT (representadas pelas amostras do Lousado e Paiol do Formigoso) diminui em relação às composições das *schorl* analisadas de outras origens. A mesma tendência de diminuição é observada nos conteúdos de Ti e Mg, porém comparativamente com as *schorl* com outras origens, os valores de Ca, Li_{calc}, Al e F aumentam nas composições das *schorl* pegmatíticas.

Comentando somente as turmalinas pegmatíticas, verifica-se que as verdes escuras apresentam composições ligeiramente mais líticas e sódicas que as negras, contrariamente, os valores de Mg e Ti são nas *schorl* verdes muito menores.

Conjugando a alta temperatura estimada para a cristalização destas turmalinas (440° C a 390°C, (Leal Gomes, 2005)), a ocorrência em posições marginais nos corpos aplito-pegmatíticos e a composição pouco evoluída que as caracteriza, admite-se que as *schorl* representam a manifestação mais precoce de turmalina nos aplito-pegmatitos LCT.

V.1.2. Dravite

A composição dravítica não foi identificada no estudo mineralógico decorrente desta dissertação, não significando a sua ausência, que a mesma não possa ocorrer nos pegmatitos LCT, pelo menos limitada às zonas de contacto com o encaixante.

A identificação de uma dravite castanha num veio quartzo-andaluzítico intersectado por uma faixa de metassomatismo peripegmatítica corrobora a ocorrência desta, que pelo menos em parte, está relacionada com esse metassomatismo.

V.1.3. Elbaíte

As turmalinas elbaíticas englobam os tipos mineralógicos elbaíte e F-elbaíte, sendo esta última a espécie turmalínica com a ocorrência mais frequente nos aplito-pegmatitos LCT de Arga.

A variabilidade cromática mais significativa das turmalinas pegmatíticas é observada nestas turmalinas, apresentando mesmo cristais zonados, porém as cores mais observadas são o azul, o verde e o róseo. As elbaítes azuis e verdes têm uma ocorrência mais frequente nas unidades intermédias dos “*sill*” e filões paroxismais e, finalmente, as róseas concentram-se com mais frequência nas unidades nucleares dos pegmatitos paroxismais.

Composicionalmente definem uma tendência de fracionamento linear com a *schorl*, através da substituição $(Li_{1.5}Al_{1.5})(Fe^{2+})_{-3}$, que origina um gradual enriquecimento em Li_{calc} e Al e diminuição do Fe, no sentido de composições elbaíticas mais tardias e evoluídas. Ao longo desta tendência, as elbaítes verdes e as azuis apresentam, globalmente, mais Fe e Na que as róseas e menor conteúdo de Li_{calc} , Al e Ca. Entre si, as verdes tendem a ser mais líticas e cálcicas quando comparadas com as azuis. No conjunto das elbaítes róseas, algumas turmalinas do Lousado destacam-se das restantes, por apresentarem valores de Ca muito mais elevados e um significativo aumento de Li_{calc} . Esta particularidade aproxima estas elbaítes, das composições lidicoatíticas típicas de corpos LCT altamente fracionados.

Nos cristais de elbaíte zonados, a fracionamento /evolução observada no zonamento mostra-se coerente com a relação estabelecida entre a cor e a composição das elbaítes, onde as zonas mais claras ou róseas apresentam-se enriquecidas em $Li_{calc} + Al$ e Ca relativamente às partes verdes e mais escuras, que são mais férricas.

Observando que a cristalização fracionada ocorre no sentido das unidades mais tardias e evoluídas no interior do corpo e considerando as temperaturas aproximadas da cristalização das elbaítes, apresentadas em Leal Gomes (2005), constata-se que as composições de elbaítes azuis são as mais precoces e as róseas mais tardias, variando as composições de elbaítes verdes entre estas.

As elbaítes do Campo Aplito-Pegmatítico de Arga apresentam valores de Fe e Li_{calc} semelhantes às composições de elbaítes do pegmatito de Pakeagama Lake, Canada (Tindle *et al.*, 2002) e do pegmatito Pinilla em Espanha (Roda-Robles *et al.*, 2004), porém somente as elbaítes róseas têm valores de Fe e Li nas suas composições equiparáveis aos das elbaítes dos pegmatitos da Província Pegmatítica de Borborema, Brasil (Soares *et al.*, 2008), dos pegmatitos de Black Rapids, Alasca (Lussier *et al.*, 2011) e de pegmatitos do Grupo Pegmatítico de Naípa, Moçambique (Neiva e Leal Gomes, 2011).

V.1.4. Lidicoatite

Este tipo mineralógico é composicionalmente muito evoluído, sendo a sua ocorrência associada às fácies paroxismais mais tardias. Marcado por espécimes extraordinariamente enriquecidos em Li e com Ca como íão dominante no espaço X, a lidicoatite origina-se então pela

fracionação no sentido do Li a partir de composições elbaíticas ricas em Al e Na, necessitando ainda de um aporte de Ca na fase final da fracionação.

A lidicoatite propriamente dita foi identificada somente pelo método DRX, referente a uma amostra rósea do pegmatito paroxismal do Lousado. O estudo mineralógico revelou que os teores de Ca obtidos nas turmalinas pegmatíticas são muito reduzidos, sendo os mais consideráveis, detetados precisamente nas unidades mais tardias dos corpos paroxismais, ocorrendo em composições elbaíticas enriquecidas em Ca.

Quando comparadas com as composições de lidicoatites de pegmatitos do Grupo Pegmatítico de Naípa, Moçambique (Neiva e Leal Gomes, 2011) e do pegmatito Anjanabonoina em Madagáscar (Dirlam *et al.*, 2002), observa-se claramente a disparidade dos seus conteúdos em Ca e Li_{calc} face as turmalinas mais evoluídas de Arga (róseas do Lousado). Porém a tendência da fracionação no sentido do enriquecimento em Ca e Li das composições de Arga, ainda que menos expressiva, ajusta-se à tendência da fracionação definida pela lidicoatites de Naípa e Madagáscar.

Desta forma a lidicoatite tem nos pegmatitos LCT de Arga, uma ocorrência limitada pelo reduzido conteúdo de Ca disponível durante a cristalização destas.

V.1.5. Olenite, Rossmanite

O tipo mineralógico olenite foi identificado por DRX nos nódulos de turmalinas azuis do “sill” da Balouca. O elevado conteúdo de Al e a deficiência em Fe deste tipo mineralógico, indicam que esta turmalina possa ter cristalizado num diferenciado magmático peraluminoso, com condições relativamente anidras e a altas temperaturas (Burt, 1989), o que se enquadra na caracterização estrutural e geoquímica deste corpo.

A existência nos nódulos de composições elbaíticas e oleníticas justifica-se pela substituição $(AlO_2)(Li(OH)_2)_{-1}$, originando turmalinas mais líticas e hidratadas. Assim neste corpo, a par do mecanismo de fracionação das schorl em elbaítes, ainda operou um outro mecanismo, que originou turmalinas elbaíticas a partir das olenites.

A temperatura de cristalização estimada por Leal Gomes (2005) para as olenites (360°C a 330°C), expressa a ocorrência mais precoce de turmalinas coloridas no Campo Aplito-Pegmatítico de Arga.

A rossmanite foi identificada somente numa amostra verde clara do Lousado. Apresenta maiores conteúdos de Fe relativamente às restantes elbaïtes deste corpo, porém menores valores de Li, Al e Na, o que é coerente já que esta rossmanite do Lousado cristalizou nas cicatrizes de estiramento de elbaïtes primárias, evoluindo composicionalmente a partir desta, através do enriquecimento em Fe.

As amostras analisadas do filão cruzado foram identificadas como rossmanites, mas uma imprecisão na análise pontual destas, levou à exclusão destas para o estudo mineralógico.

V.2. Substituições cristal químicas e tendências de evolução composicional em sistemas pegmatíticos delimitados

Dentro de cada caixa pegmatítica e no sentido do seu interior, as substituições cristal químicas operantes nas turmalinas, servem de guia na determinação das condições geoquímicas presentes durante a fracionamento do corpo. No caso das turmalinas em estudo, as substituições isoquímicas mais representativas são a substituição elbaítica $(Li_{1.5}Al_{1.5})(Fe^{2+})_{-3}$ e a lidicoatítica $CaLi_{0.5}(NaAl_{0.5})_{-1}$.

Um outro mecanismo de substituição envolvido na génese de composições elbaíticas é o $X \square Al (NaR^{2+})_{-1}$, resultando em elbaïtes mais aluminosas e menos sódicas, que em continuidade, podem originar rossmanites.

O conjunto de substituições cristal químicas apresentado esboça então, para os corpos LCT de Arga, a tendência de fracionamento composicional apresentada esquematicamente na figura 51. Esta parte de termos ricos Fe para termos enriquecidos em Al + Li, promovida pela substituição $2Fe^{2+}(Y) \rightarrow Al^{3+}(Y) + Li^{+}(Y)$. Nos corpos mais evoluídos destaca-se uma tendência final no sentido da expressão mais nítida do Li, que é acompanhado por um enriquecimento em Ca, atuando neste caso a substituição, $Na^{+}(Y) + Fe^{2+}(Y) \rightarrow Ca^{2+}(X) + Li^{+}(Y)$.

A fracionamento operante nos sistemas pegmatíticos de Arga é concordante com a maioria dos sistemas pegmatíticos LCT que ocorrem em outros enquadramentos geotectónicos (Dirlam *et al.*, 2002; Lussier *et al.*, 2011; Neiva e Leal Gomes, 2010 e Neiva e Leal Gomes, 2011; Roda-Robles *et al.*, 2004; Soares *et al.*, 2008; Tindle *et al.*, 2002).

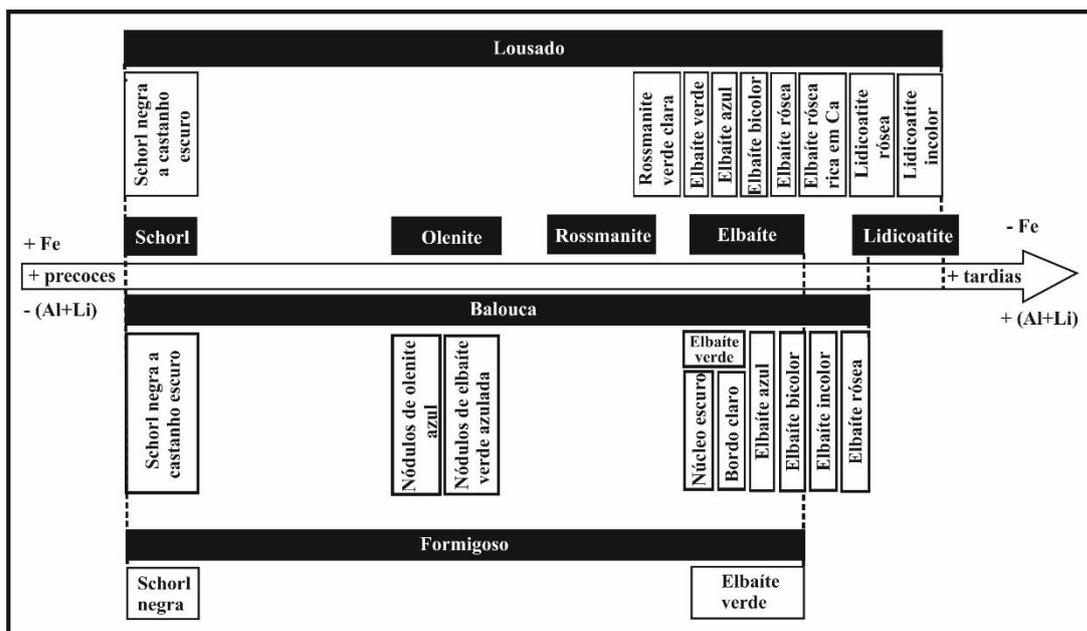


Figura 51 – Representação esquemática da fracinação composicional dos apilito-pegmatitos LCT de Arga.

V.3. Tipos paragenéticos de turmalinas (minerais tipomórficos associados)

A mudança nas condições geoquímicas ocorrentes ao longo da fracinação descrita para os sistemas pegmatíticos de Arga, relacionada com os episódios estruturais decorrentes, originou uma grande diversidade de turmalinas, expressa em 29 diferentes modos de ocorrência que foram observados ao longo de todas as unidades dos corpos em estudo. Assim foram identificadas turmalinas nas seguintes unidades portadoras dos pegmatitos em estudo:

- Unidades de equilíbrio com a rocha encaixante;
- Unidades primárias de bordadura;
- Unidades intermédias primárias;
- Unidades nucleares, miarolíticas ou não;
- Frentes turmalínicas fracionais;
- Preenchimentos turmalínicos venulares ou brechoides;
- Unidades de substituição.

Esta consistência na ocorrência de turmalina ao longo de todas as unidades é de facto invulgar dado que o que sucede mais frequentemente nos sistemas pegmatíticos é uma cristalização exuberante de turmalina negra na zona de bordo que resulta da disponibilidade de

Fe e Mg que podem entrar no magma pegmatítico por interação com as rochas encaixantes, voltando só a existir condições para se formar turmalina nas zonas mais internas dos pegmatitos, quando passa a existir Li disponível (cujo enriquecimento depende em grande medida da fracionamento do magma) para estabilizar as turmalinas de Li.

Todos estes modos de ocorrência podem contudo, ser resumidos nas seguintes paragéneses tipo:

- i. Schorl - dravite + moscovite + quartzo ± feldspato;
- ii. Schorl - elbaíte + feldspato + moscovite + quartzo ± albite ± cassiterite;
- iii. Olenite - elbaíte + albite + quartzo + feldspato ± cassiterite ± Nb-tantalatos;
- iv. Elbaíte + quartzo + feldspato + petalite ± moscovite ± albite ± Nb-tantalatos;
- v. Elbaíte + quartzo + cookeite + feldspato ± moscovite ± albite;
- vi. Elbaíte + quartzo + feldspato + moscovite ± albite ± ambligonite-montebbrasite;
- vii. Elbaíte + lepidolite ± cookeite ± albite clevelandítica ± quartzo ± ambligonite-montebbrasite ± cassiterite;
- viii. Elbaíte-lidicoatite + lepidolite ± albite clevelandítica ± quartzo ± cassiterite;
- ix. Elbaíte-lidicoatite + lepidolite + cookeite ± albite clevelandítica ± quartzo;
- x. Elbaíte + cookeite + lepidolite + polucite.

As paragéneses 1 e 2 referem-se às ocorrências de turmalina nas zonas de bordadura e contacto com o encaixante.

As paragéneses 3 a 6 representam as ocorrências típicas das zonas intermédias a nucleares "sill".

Caracterizando as unidades mais evoluídas e fracionadas dos pegmatitos paroxismais, observam-se as paragéneses 7 a 9.

A paragénese 10 representa a manifestação mais tardia de turmalina colorida nos aplito-pegmatitos LCT.

As associações 1, 3, 5 e 7 são as mais frequentes nos corpos aplito-pegmatíticos e as que comportam maiores quantidades de turmalinas.

As mineralizações metálicas (Nb-Ta, Sn) ocorrem em todas as paragéneses-tipo, porém são mais significativas nas paragéneses 2, 3, 4, 7 e 8.

V.4. Valor intrínseco das turmalinas portuguesas e utilidade prospetiva

O potencial económico que as turmalinas gema adquirem no mercado mundial dos minerais ornamentais, incentiva a sua exploração, quando a ocorrência em qualidade e quantidade o justifica. Em Portugal, o Campo Aplito-Pegmatítico de Arga é nessa aceção, o mais promissor, apresentando uma diversidade de espécimes de rara beleza cromática.

Tendo sido algumas destas turmalinas alvo de ensaio gemológico (fig. 52), foram consideradas por Leal Gomes (2005; 2010) e Ferreira *et al.*, (1999), como potenciais focos de interesse no âmbito do aproveitamento ornamental, porém limitando-se a um número reduzido de ocorrências.

Porém, a fraca transparência, a alteração e deformação observadas na maioria dos cristais, aliadas à reduzida dimensão dos corpos portadores, inviabilizam o aproveitamento económico das turmalinas coloridas de Arga. A falta de legislação referente aos Recursos Geológicos que incida sobre os minerais de qualidade gemológica e a excessiva colheita ilegal de espécimes são também fatores que pesam no sentido do estrangulamento da viabilidade.



Figura 52 – Resultados do ensaio gemológico por talhe em cabochão e lapidação

O valor das turmalinas deve ser encarado então como objeto de interesse científico/educacional, representativo da complexidade geológica dos aplito-pegmatitos LCT de Arga e do exotismo das suas ocorrências, sendo necessário portanto, a sua preservação.

Quando a potencialidade económica das turmalinas coloridas não se verifica nos corpos aplito-pegmatíticos, podem ainda ser utilizadas como índices paragenéticos na prospeção de concentrações metálicas ou de minerais industriais de interesse económico, com génese nestes corpos. Pois, de acordo com Leal Gomes (1999) a seguir à nucleação da turmalina pela extração do B e Li dos diferenciados, ocorre uma forte cristalização de minerais essenciais, desta forma as unidades que apresentam maiores concentrações minerais económicas, por norma exibem na periferia uma concentração anómala de turmalinas.

Assim se a uma escala de afloramento, a presença de turmalinas coloridas é indicador da ocorrência de um corpo LCT potencialmente evoluído, ao longo da estrutura interna destes, a identificação da turmalina antecede a localização das unidades portadoras de minerais de interesse económico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antunes, I. M. H. R.; Neiva, A. M. R.; Silva, M. M. V. G.; Silva, P. B. (2010). Mineralogia dos filões aplito-pegmatíticos litíferos da região de Segura. *“Ciências Geológicas - Ensino e investigação e sua história”*, vol. 1, capítulo I – Cristalografia e Mineralogia, p. 3-14.
- Beurlen, H.; Trumbull, R.B.; Wiedenbeck, M. e Soares, D.R., (2011). Boron-isotope variations in tourmaline from granitic pegmatites of the Borborema Pegmatite Province, NE-Brazil. *Asociación Geológica Argentina*, serie d, publicación especial nº 14, p. 37-39.
- Burt, D.M., (1989). Vector representation of tourmaline compositions. *American Mineralogist*, vol. 74, p. 826-839.
- Cameron E. N.; Jahns, R. H.; Mcnair, A. H. e Page, I. R., (1949). Internal structure of granitic pegmatites. *Economia Geology*. Monograph 2, p. 115.
- Campos de Lima, A. M., (2000). Estrutura, mineralogia e gênese dos filões aplitopegmatíticos com espodumena da região Barroso-Alvão. Tese de doutoramento. Universidade do Porto
- Carneiro, G. A.; Fuchs, Y.; Rossano, S.; Horn, H. A. e Linares, J., (2009). Study of the causes of color in four selected crystals of tourmaline from the pegmatite of Matinha in Divino das Laranjeiras, MG. *Estudos Geológicos*, vol. 9 (2), p. 83-88.
- Castañeda, C.; Botelho, N.F.; Krambrock, K.; Dantas, M.S. e Pedrosa-Soares, A.C., (2006). Centros paramagnéticos em elbaíte rosa natural e irradiada. *Geonomos*, 14 (1-2), p.7-15.
- Cavallaro, T.R., (2008). Caracterização física, mineralógica e gemológica de diamantes coloridos da coleção do museu de geociências. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo.

- Černý, P. (1982). Anatomy and Classification of Granitic Pegmatite. Canada: Mineralogical Association of Canada.
- Černý, P. (1991a). Anatomy and Internal Evolution of Pegmatite Deposits. *Rare-element granite pegmatites*. Geosci. Canada, vol. 18, p. 49-67.
- Černý, P. (1991b). Regional to global environments and petrogenesis. *Rare-element granite pegmatites*. Geosci. Canada, vol.18, p. 68-81.
- Černý, P., Ercit, T. S., (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. Canada: The Canadian Mineralogist, vol. 43, p. 2005-2026.
- Chappell, B.W. e White, A.Jr., (1974). Two contrasting granites types. Oxford: Pacific Geology, vol. 8, p.173-174.
- Chaussidon, M. e Albarède, F., (1992). Secular boron isotope variations in the continental crust: an ion microprobe study. *Earth Planet. Sci. Lett.* 108, p. 229-241.
- De Camargo, M.B. e Isotani, S., (1988). Optical absorption of natural and irradiated pink tourmaline. *American Mineralogist*, Vol. 73, p. 172-180.
- Dias, P. A. e Leal Gomes, C., (2007). Estudo da natureza protolítica das formações do Serro – Serra de Arga, Minho, Portugal – Contributo para o conhecimento da poligénese vulcano-sedimentar dos terrenos Silúricos. XV Semana de Geoquímica/ VI Congresso Ibérico de Geoquímica (Vila Real).
- Dias, P. A. e Leal Gomes, C., (2008). Study of the volcanosedimentary nature of the Serro Formations – Silurian terranes of Serra de Arga (Minho, Northern Portugal). Vila Real: e-Terra, Revista Electrónica de Ciências da Terra. Vol. 5, nº 9.

- Dias, P. A. e Leal Gomes, C., (2010). Anfibólitos e rochas relacionadas do Monteiro e dos Verdes – hipótese de correlação riftogénica para alguns terrenos Silúricos da região da Serra de Arga (Minho). Braga: e-Terra, Revista Eletrónica de Ciências da Terra. Vol. 16 - nº 7.
- Dias, P. A. e Leal Gomes, C., (2013). Considerações sobre a natureza vulcanogénica e exalativa de algumas formações metamórficas da Serra de Arga – Minho – Portugal – consequências para a cartografia. Geodinâmica e Tectónica global; a Importância da Cartografia Geológica, Évora: Livro de atas da 9ª Conferência Anual do GGET-SGP, p. 117-121.
- Dias, P. A. e Leal Gomes, C., (2013). Petrogenesis of peraluminous anatectic pegmatoids. PEG 2013: The 6Th International Symposium on Granitic Pegmatites, p. 41-42.
- Dias, P. A., (2012). Análise estrutural e paragenética de produtos litológicos e mineralizações de segregação metamórfica. - Estudo de veios hiperaluminosos e protólitos poligénicos Silúricos da região da Serra de Arga (Minho). Tese de Doutoramento, Braga: Universidade Minho.
- Dias, P. A.; Pereira, B.; Leal Gomes, C. e Guimarães, F., (2009). Structure and mineralogy of the Muro Alto granitic pegmatite (Vieira do Minho – Portugal). Peculiar assemblages of high – F hydrothermal evolution. *Estudos Geológicos*, 19 (2), p. 105-110.
- Dietrich, R.V., (1985). *The Tourmaline Group*. Von Nostrand Reinhold Co., New York.
- Dirlam, D. M.; Laurs, B. M.; Pezzotta, F. e Simmons, W. B., (2002). Liddicoatite tourmaline from Anjanabonoina, Madagascar. *Gems & Gemology*, Springe Eds, vol. 38, p. 28-53.
- Dunn, P. J.; Appleman, D. E. e Nelen, J. E., (1977). Liddicoatite, a new calcium end-member of the tourmaline group. *American Mineralogist*, vol. 62, p. 1121-1124.

- Dutrow, B. L. e Henry, D. J., (2000). Complexly zoned fibrous tourmaline, Cruzeiro Mine, Minas Gerais, Brazil: a record of evolving magmatic and hydrothermal fluids. *The Can. Mineral*, vol. 38, p.131-143.
- Ercit, T. S.; Groat, L. A. e Gault, R. A., (2003). Granitic pegmatites of the O'Grady Batholith, N.W.T., Canada: A case study of the evolution of the elbaite subtype of rare-element granitic pegmatite. *Can. Mineral.*, vol. 41, p.117-137.
- Ertl, A.; Marschall, H.R.; Giester, G.; Henry, D.J.; Schertl, H.-P.; Ntaflos, T.; Luvizotto, G.L.; Nasdala, L. e Tillmanns, E., (2010). Metamorphic ultrahigh-pressure tourmaline: structure, chemistry, and correlation to P - T conditions. *Am. Mineral*. Vol. 95, p. 1-10.
- Feral, K., (2013). Magnetism in Gemstones. An effective tool for gem identification.
- Ferreira, M. D.; da Silva, V.; Lima, M. F.; Leal Gomes, C., (1999). Anatomia de algumas ocorrências de gemas e seu enquadramento em protocolos de ordenamento territorial – contributo para uma reflexão sobre o estatuto dos depósitos gemíferos portugueses. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe, Corunha*. Vol. 24, p. 31-44.
- Foster, G.L.; Pogge von Strandmann, P.A.E. e Rae, J.W.B., (2010). Boron and magnesium isotopic composition of seawater. *Geochem. Geophys. Geosys*. Vol. 11, Q08015.
- Fritsch, E. e Rossman, G.R., (1987). An update on color in gems. Part 1: Introduction and colors caused by dispersed metal ions. *Gems & Gemology*, vol. 23, n° 3, p. 126-139.
- Fritsch, E. e Rossman, G.R., (1988a). An update on color in gems. Part 3: colors caused by band gaps and physical phenomena. *Gems & Gemology*, vol. 24, n° 2, p. 81-102.
- Fritsch, E. e Rossman, G.R., (1988b). An update on color in gems. Part 2: Colors involving multiple atoms and color centers. *Gems & Gemology*, vol. 24, n°1, p. 3-15.

- Ginsburg, A.I., Timofeyev, I.N. e Feldman, L.G., (1979). Principle of geology of the granitic pegmatites. Nedra Moscow. p. 296.
- Guimarães, F. e Leal Gomes, C., (2014). Turmalinas de pegmatitos LCT do Minho. (Aguardando publicação)
- Henry, D. J.; Novák, M.; Hawthorne, F. C.; Ertl, A.; Dutrow, B. L.; Uher, P. e Pezzotta, F., (2011). Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals. *American Mineralogist*, vol. 96, p. 895-913.
- Henry, D.J. e Dutrow, B.L., (1996). Metamorphic tourmaline and its petrologic applications. In *Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (E.S. Grew & L.M. Anovitz, eds.). *Rev. Mineral.* Vol. 33, p. 503-557.
- Henry, D.J. e Guidotti, C.V., (1985). Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist.*, vol, 70, p.1-15.
- Henry, D.J., Kirkland, B.L. e Kirkland, D.W., (1999). Sector-zoned tourmaline from the cap rock of a salt dome. *Eur. J. Mineral.* Vol.11, p. 263-280.
- Hinsberg, V. J. van; Henry, D. J. e Marschall, H. R., (2011). Tourmaline: an ideal indicator of its host environment. *The Can. Mineralogist*, Vol. 49, p. 1-16.
- Holtz, F. e Johannes, W., (1991). Effect of tourmaline on melt fraction and composition of first melts in quartzofeldspathic gneiss. *Eur. J. Mineral.* Vol. 3, p. 527-536.
- Hughes, R.W., (2014). Pleochroism in Faceted Gems: An introduction. *Gems & Gemology*, Fall 2014, Vol. 50, nº3, p. 216-226.

- Jahns, R. H. e Wright, L. A., (1951). Gem- and Lithium – bearing pegmatites of the Pala district, San Diego Country, California. California Division of Mines, Special Report 7-A, San Francisco, p. 88.
- Janousek, V.; Farrow, C. M.; Erban, V. e Trubac, J., (2011). Brand new Geochemical Data Toolkit (GCDkit 3.0) - is it worth upgrading and browsing documentation? (Yes!). *Geologické vyzkumy na Morave a ve Slezsku*, vol. 18, p. 26-30.
- Jiang, S.Y., (1998). Stable and radiogenic isotope studies of tourmaline: an overview. *Journal of the Czech Geological Society*. Vol. 43/1, p. 75-90.
- Jiang, Shao-Yong e Palmer, M.R., (1998). Boron isotope systematics of tourmaline from granites and pegmatites: a synthesis. *Eur. J. Mineral.* 10, p. 1253-1265.
- Jolliff, B. L.; Papike, J. J. e Shearer, C. K., (1986). Tourmaline as a recorder of pegmatite evolution: Bob Ingersoll pegmatite, Black Hills, South Dakota. *American Mineralogist*, vol. 71, p. 472-500.
- Kasemann, S.; Erzinger J. e Franz, G., (2000). Boron cycling in the continental crust of the central Andes from the Paleozoic to Mesozoic, NW Argentina. *Contrib. Mineral. Petrol.* Vol. 140, p. 328-343.
- Kawakami, T., (2001). Boron depletion controlled by the breakdown of tourmaline in the migmatite zone of the Aoyama area, Ryoke metamorphic belt, southwestern Japan. *Can. Mineral.* Vol. 39, p. 1529-1546.
- Klemme, S.; Marschall, H.R.; Jacob, D.E.; Prowatke, S. e Ludwig, T., (2011). Trace- element partitioning and boron isotope fractionation between white mica and tourmaline. *Can. Mineral*, Vol. 49, p. 165-176.
- Krambrock, K.; Guedes, K.J.; Pinheiro, M.V.B.; Xavier, R.C.; Tavares, M.C.; Guimarães, G.M.; Fantini, C.; Pimenta, M.A. e Filho, L.A.D.M., (2009). Characterization of colored

tourmalines of uvite/dravite series from Brumado District, Bahia, Brasil. *Estudos Geológicos*, vol. 19 (2), p. 145-149.

Krambrock, K.; Pinheiro, M.V.B.; Medeiros, S.M.; Guedes, K.J.; Schweizer, S. e Spaeth, J.-M., (2002). Investigation of radiation-induced yellow color in tourmaline by magnetic resonance. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B191*. Elsevier, p. 241-245.

Landes, K. K., (1933). Origin and classification of pegmatites. *American Mineralogist*. Vol.18, n.2, p. 95-103.

Leal Gomes, C. e Dias, P., (2009). The gemmologic qualification of some varieties of pegmatite and hydrothermal minerals in Portugal. *Estudos Geológicos*, vol. 19, p. 156-161.

Leal Gomes, C. e Leterrier, J., (1995). Tipologia composicional e evolução geoquímica em sistemas pegmatóides graníticos- Tendências primárias do sistema de Arga – Minho – N de Portugal. *Memórias n° 4, Publicações do Museu Laboratório Mineralogia e Geologia, Universidade do Porto*, p.735-740.

Leal Gomes, C. e Lopes Nunes, J. E. (1990). As paragénese correspondentes à mineralização litífera do campo aplito-pegmatítico de Arga-Minho (Norte de Portugal). *Memórias e Notícias, Publicações do Museu Laboratório Mineralogia e Geologia, Universidade de Coimbra*, n° 109, p. 131-166.

Leal Gomes, C. e 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, Coimbra - Imprensa da Universidade*, II, p. 85-109.

Leal Gomes, C., (1986). Esboço de caracterização estrutural do campo filoniano de Arga (Minho). *Maleo, Bol. Infor. Soc. Geol. Portugal, Lisboa*, vol. 2 (13), p. 23-24.

- Leal Gomes, C., (1994). Estudo estrutural e paragenético de um sistema pegmatóide granítico - O campo filoniano de Arga - Minho (Portugal). Tese de Doutoramento; Braga: Universidade do Minho, p. 695
- Leal Gomes, C., (1995). Discriminação de recursos base associados à evolução granítica residual no campo filoniano de Arga – Minho – N de Portugal. Estudos, Notas e Trabalhos, I. G. M., t.37, p.59-86.
- Leal Gomes, C., (1999). Equilíbrio e Evolução dos Fosfatos do Pegmatito do Lourinhal – Campo Aplito-Pegmatítico da Serra de Arga (Minho, Norte de Portugal). Atas do II Congresso Ibérico de Geoquímica e XI Semana de Geoquímica, Lisboa, p. 87-90
- Leal Gomes, C., (1999b). Indicadores paragenéticos das mineralizações pegmatíticas na área da concessão Naipa- Zambézia- Moçambique. Actas II Congresso Ibérico de Geoquímica/ XI Semana de Geoquímica. Lisboa. p. 121-124.
- Leal Gomes, C., (2005). Recursos base de gemas do NW de Portugal. - Tema e sumário da lição de síntese para Provas de Agregação, incluída na disciplina Depósitos Minerais I (Licenciatura em Geologia – Ramo Recursos e Planeamento), Braga: Universidade do Minho, p. 65.
- Leal Gomes, C., (2005b). Contributo para a Sistemática dos Pegmatitos Graníticos referentes à Cintura Varisca Centro-Ibérica – Características a considerar e quadro tipológico. Geonovas nº19, p. 35-45.
- Leal Gomes, C., (2010a). Dispositivos indicadores de fraccionação oscilatória em sistemas pegmatíticos. “Ciências Geológicas – Ensino e Investigação e sua História”, Volume I, capítulo II – Petrologia e Geoquímica, p. 201-212.
- Leal Gomes, C., (2010b). A qualificação gemológica de algumas variedades de minerais pegmatíticos e hidrotermais em Portugal. Ciências Geológicas- Ensino e Investigação e sua História, volume I, capítulo I, Cristalografia e Mineralogia, p. 55-67.

- Leal Gomes, C., (2010c). As assinaturas LCT e NYF em aplito-pegmatitos Variscos de metais raros do NW de Portugal. e-Terra, Revista Electrónica de Ciências da Terra, VIII Congresso Nacional de Geologia. Vol. 20, nº 8, p.4.
- Leal Gomes, C.; Verduzco, G. e Dias, P. A., (2011). Vestígios de atividade fumaroliana litificados no nível com sulfuretos do jazigo da Cerdeirinha, Caminha, N Portugal. VIII Congresso Ibérico de Geoquímica- XVII Semana de Geoquímica, Castelo Branco, p.6.
- London, D., (1986). Formation of tourmaline-rich gem pockets in miarolitic pegmatites. *American Mineralogist*, vol.71, p. 396-405.
- Lotze, F. (1945). Zur Gliederung der Varisciden der Iberischen Meseta. *Geotektonische Forsch.*, vol. 6, p. 78-92.
- Lussier, A.J.; Hawthorne, F.C.; Michaelis, V.M.; Aguiar, P.M. e Kroeker, S., (2011). Elbaite-liddicoatite from Black Rapids glacier, Alaska. *Periodico di Mineralogia*, vol. 80, p. 57-73.
- Manning, E.G., (1973). Effect of second nearest-neighbor interaction on Mn³⁺ absorption in pink and black tourmaline. *Canadian Mineralogist*, Vol. 11, p. 971-977.
- Mário de Jesus, A., (1933). Pegmatitos mangano-litíferos da região de Mangualde. *Comun. Serv. Geol. de Port.*, XIX, p. 65-210.
- Marocchi, M.; Marschall, H.R.; Konzett, J.; Tropper, P.; Ludwig, T.; Mair, V. e Bargossi, G.M., (2011). Metasomatic tourmaline in hybrid contact-bands between gneiss and peridotite in the Ulten Zone of the Eastern Italian Alps: chemistry and boron isotopic composition. *Canadian Mineralogist*, 49, p. 245-261.
- Marschall H.R. e Ludwig, T., (2006). Re-examination of the boron isotopic composition of tourmaline from the Lavický granite, Czech Republic, by secondary ion mass spectrometry: back to normal. *Geochem. J.* 40, p. 631-638.

- Marschall, H.R.; Korsakov, A.V.; Luvizotto, G.L.; Nasdala, L. e Ludwig, T., (2009). On the occurrence and boron isotopic composition of tourmaline in (ultra)high-pressure metamorphic rocks. *J. Geol. Soc. London* 166, p. 811-823.
- Martin, R.F. e De Vito, C., (2005). The patterns of enrichment in felsic pegmatites ultimately depend on tectonic setting. *Can. Mineral.*, vol. 43, p. 2027-2048.
- Mattson, S.M. e Rossman, G.R., (1984). Ferric iron in tourmaline. *Physics and Chemistry of Minerals*, Vol. 11, p. 225-234.
- Merkel, P.B. e Breeding, C.M., (2009). Spectral differentiation between copper and iron colorants in gem tourmalines. *Gems and Gemology, Notes & News Techniques*, vol. 45, n° 2, p. 112-119.
- Moretti, G.S., (2010). A calculation of colours. Towards the automatic creation of graphical user interface colour schemes. Tese de doutoramento. Massey University, Palmerston North, p. 317.
- Nascimento, L. e Agostinho, L.C.L, (2010). Estudo das propriedades físicas e químicas das turmalinas elbaíte verde e dravita preta por espectroscopia fotoacústica. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, Vol. 22, n° 3/4, p. 71-75.
- Nassau, K., (1975). Gamma ray irradiation induced changes in the colours of tourmalines. *American Mineralogist*. Vol. 60, p.710-713.
- Nassau, K., (1978). The origins of colours in minerals. *American Mineralogist*. Vol. 63, p.219-229.
- Natkaniec-Nowak, L.; Dumańska-Stowik, M. e Ertl, A., (2009). “watermelon” tourmaline from the Paprok mine (Nuristan, Afghanistan). *N. Jb. Miner. Abh*, vol.186/2, p.185-193.

- Neiva, A. M. R. e Leal Gomes, C., (2010). Geoquímica das turmalinas do grupo pegmatítico granítico Li-Cs-Ta de Naipa, Alto Ligonha, Moçambique. *Revista electrónica de Ciências da Terra*, vol. 13, nº 4, p.1-4.
- Neiva, A. M. R. e Leal Gomes, C., (2011). Tourmaline-group minerals in the Naipa Li-Cs-Ta granitic pegmatite group, Mozambique: tracers of magmatic to postmagmatic evolution trends. *N. Jb. Miner. Abh*, 189, p.1-20.
- Neiva, A.M.R. e Farinha Ramos J.M., (2009). Petrogenetic links of granitic aplite-pegmatite sills from gonçalo with granites from guarda-belmonte area, central Portugal. *Estudos geológicos*, volume 19.
- Neiva, A.M.R.; Farinha Ramos, J.M.; Silva, P. B., (2011). Alguns aplito-pegmatitos graníticos com minerais de Li das regiões centro e norte de Portugal. *Valorização dos pegmatitos litíferos*, p. 30-33.
- Novák, M., (2000). Compositional pathways of tourmaline evolution during primary (magmatic) crystallization in complex (Li) pegmatites of the Moldanubicum, Czech Republic. *Memorie della Società Italiana di Scienze Naturali e del Museo Civico di Storia natural di Milano*, vol.30. p. 45-56.
- O'Donoghue, M., (2006). *Gems: Their Source, Descriptions and Identification*. 6ª Ed. Oxford: Elsevier Ltd.
- Ota, T.; Kobayashi, K.; Kunihiro, T. e Nakamura, E., (2008). Boron cycling by subducted lithosphere; insights from diamondiferous tourmaline from the Kokchetav ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, vol. 3, p. 531-541.
- Palmer, M.R. e Slack, J.F., (1989). Boron isotopic composition of tourmaline from massive sulfide deposits and tourmalinites. *Contrib. Mineral. Petrol.* Vol. 103, p. 434-451.

- Palmer, M.R. e Swihart, G.H., (1996). Boron isotope geochemistry: an overview. In *Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (E.S. Grew & L.M. Anovitz, eds.). *Rev. Mineral.* Vol. 33, p. 709-744.
- Pereira E. (Coord.) (1989). *Carta Geológica de Portugal (1:200 000), Folha 1, Minho*. Serv. Geol. de Portugal, Lisboa.
- Pereira, E., (Coord.) (1992). *Carta Geológica de Portugal (1:200 000). Notícia Explicativa da Folha 1 (Minho)*. Serv. Geol. de Portugal, Lisboa, pp. 9-22.
- Phillips, W. J., (1974). The dynamic emplacement of cone-sheets. *Tectonophysics*, vol. 24, p. 69-84.
- Phillips, W. J., (1972). Hydraulic fracturing and mineralization. *Q.J.G.S.*, London, vol. 128, p. 33-359.
- Presser de Souza, E., (2010). *Contribuição ao estudo da aplicação da digitalização tridimensional para o design e a lapidação de gemas*. Tese de mestrado. Universidade federal do Rio Grande do Sul. P. 110.
- Read, P.G., (2005). *Gemmology*. 3^o Edition. Oxford: Elsevier Ltd.
- Reinitz, I.M. e Rossman, G.R., (1988). Role of natural radiation in tourmaline coloration. *American Mineralogist*, Vol. 73, p. 822-825.
- Robbins, C.R. e Yoder, H.S., Jr., (1962). Stability relations of dravite, a tourmaline. *Carnegie Inst. Wash. Yearbook* 61, p. 106-108.
- Roda-Robles, E.; Pesquera, A.; Gil, P.P. e Torres-Ruiz, J., (2004). Tourmaline from the rare-element Pinilla pegmatite, (Central Iberian Zone, Zamora, Spain): chemical variation and implications for pegmatitic evolution. *Mineralogy and Petrology*, vol. 81, p.249-263.

- Roda-Robles, E.; Pesquera, A.; Gil-Crespo, P.; Vieira, R.; Lima, A.; Martins T., (2011). Pegmatites from the Central Iberian and Galizia-tras-os-montes zones (Iberian Massif) (Spain and Portugal): Characteristics and exploration significance for Li and other rare-elements. Valorização dos pegmatitos litiníferos, p. 74-75.
- Rossmann, G.R. e Mattson, S.M., (1986). Yellow, *Mineralogist*, Vol. 71, p. 599-602.
- Sahama, T. G.; von Knorring, O. e Tornroos, R., (1979). On tourmaline. *Lithos* 12, p. 109-114.
- Schmetzer, K. e Bank, H., (1979). East African tourmalines and their nomenclature. *Journal of Gemmology*, Vol. 16, p. 310-311.
- Schulman, J.H. e Compton, W.D., (1962). *Color Centers in Solids*. Pergamon Press, Oxford, p. 368
- Shigley, J.E.; Laurs, B.M.; Janse, A.J.A.B.; Elen, E. e Dirlam, D.M., (2010). Gem localities of the 2000s. *Gems & Gemology*, Fall 2010. Vol. 46, nº3, p. 188- 216.
- Sinclair, W. D. e Richardson, J. M., (1992). Quartz-tourmaline orbicules in the Seagull Batholith, Yukon Territory. *Can. Mineral.*, vol.30, p. 923-935.
- Smith, G., (1977). Low temperature optical studies of metal-metal charge transfer transitions in various minerals. *Canadian Mineralogist*, Vol. 10, p. 500-507.
- Soares, D.R.; Beurlen, H.; Barreto, S.B.; Silva, M.R.R. e Ferreira, A.C.M., (2008). Compositional variation of tourmaline-group minerals in the Borborema Pegmatitic Province, Northeastern Brazil. *The Canadian Mineralogist*, vol. 46, parte 5, p. 1097-1115.
- Solodov, N. A., (1962). Internal structure and geochemistry of rareelement granitic pegmatites. Moscow: Academy of Sciences of the USSR. p. 243.

- Spicer, E.M.; Stevens, G. e Buick, I.S., (2004). The low-pressure partial-melting behaviour of natural boron-bearing metapelites from the Mt. Stafford area, central Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.* 148, p. 160-179.
- Swihart, G.H. e Moore, P.B., (1989). A reconnaissance of the boron isotopic composition of tourmaline. *Geochim. Cosmochim. Acta* 53, p. 911-916.
- Teixeira, C. e Assunção, C. (1961). Carta Geológica de Portugal (1: 50 000). Notícia Explicativa da folha 1 - C (Caminha). *Serv. Geol. de Portugal*. Lisboa, p. 9-31.
- Teixeira, C. e Assunção, C. (1962). Carta Geológica de Portugal (1:50 000), Folha 1 – C (Caminha). *Serv. Geol. de Portugal*, Lisboa.
- Teixeira, C. et al. (1972). Carta Geológica de Portugal (1: 50000). Notícia explicativa da folha 5-A (Viana do Castelo). *Serv. Geol. de Portugal*, Lisboa, p. 16-32.
- Teixeira, C. et al. (1972). Carta Geológica de Portugal (1:50 000), Folha 5 – A (Viana do Castelo). *Serv. Geol. de Portugal*, Lisboa.
- Thomson, J.A. (2006). A rare garnet – tourmaline – sillimanite – biotite – ilmenite – quartz assemblage from the granulite-facies region of south-central Massachusetts. *Am. Mineral.* Vol. 91, p. 1730-1738.
- Tindle, A.G.; Breaks, F.W. e Selway, J. B., (2002). Tourmaline in petalite-subtype granitic pegmatites: evidence of fractionation and contamination from the Pakeagama Lake and Separation Lake areas of northwestern Ontario, Canada. – *Can. Mineral.* Vol.40, p. 753 – 788.
- Trumbull, R.B.; Slack, J.F.; Krienitz, M.-S.; Belkin, H.E. e Wiedenbeck, M., (2011). Fluid sources and metallogenesis in the Blackbird Co–Cu–Au–Bi–Y–REE district, Idaho, U.S.A.: insights from major-element and boron isotopic compositions of tourmaline. *Can. Mineral.*, vol. 49, p. 225-244.

- Vieira, R. A., (2010). Aplitopegmatitos com elementos raros da região entre Almendra (V. N. de foz Côa) e Barca d' Alva (Figueira de Castelo Rodrigo). Campo aplitopegmatito da Fregeneda-Almendra. Tese de doutoramento. Universidade do Porto, p. 246.
- Von Goerne, G.; Franz, G. e Wirth, R., (1999). Hydrothermal synthesis of large dravite crystals by the chamber method. *Eur. J. Mineral.*, Vol. 11, p. 1061-1078.
- Wilson, W. E., (2002). Cuprian elbaite from the Batalha Mine, Paraíba, Brazil. *Mineralogical Record*, vol.33, nº2, p. 127-137.
- Xavier, R.P.; Wiedenbeck, M.; Trumbull, R.B.; Deher, A.M.; Monteiro, L.V.S.; Rhede, D.; de Araújo, C.E.G. e Torresi, I., (2008). Tourmaline B-isotopes fingerprint marine evaporites as the source of high-salinity ore fluids in iron oxide copper–gold deposits, Carajás Mineral Province (Brazil). *Geology* 36, p. 743-746.