

**Caracterização
Geológico/Estrutural
da Pedreira
Quinta do Moinho**

**Canidelo
Vila Nova de Gaia**

**Eurico Pereira
Henrique Miranda
Alexandre Leite**

FEUP
Dep. Minas
2000

CARACTERIZAÇÃO GEOLOGICO/ESTRUTURAL DA PEDREIRA QUINTA DO MOINHO CANIDELO – VILA NOVA DE GAIA

Proposição do problema

1 – A pedra da Quinta do Moinho (ou pedra da Madalena, designação alternativa pela qual é mais conhecida), situa-se na freguesia de Canidelo / Vila Nova de Gaia.

Em actividade desde 1971, esta pedra tem sido explorada a céu-aberto (desmonte em bancadas), produzindo granito para diversas aplicações, nomeadamente balastro para a C.P., blocos para obras portuárias e de defesa costeira, bem como materiais de diversas granulometrias para inúmeros trabalhos de construção civil e obras públicas.

Recentemente (1996), tendo em conta que a corta se aproximava da cota mínima autorizada por lei, a SOLUSEL (Soc. Lusitana de Obras e Empreitadas, Lda), empresa detentora do alvará de licença de exploração, requereu e obteve das tutelas autorização para funcionar simultaneamente como pedra (em continuação da sua actividade tradicional) e como receptora de inertes de múltipla natureza resultantes quer da demolição de edificações industriais e blocos habitacionais, quer de escavações (terras e rochas) efectuadas com finalidades diversas.

2 – Sob a preocupação de controlar efeitos perversos eventualmente associáveis ao funcionamento da corta como local de aterro, entendeu a Empresa dever munir-se da máxima informação sobre aspectos geológicos, estruturais e hidrogeológicos respeitantes ao maciço em exploração. Para esse fim, contactou o Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Dep. Minas / FEUP) no sentido de este proceder ao levantamento exaustivo da rede de fracturas que afecta o maciço, visando a sua caracterização e a formulação de um parecer sobre a respectiva permeabilidade, no sentido específico da avaliação da possível vulnerabilidade à circulação de lixiviados oriundos dos materiais inertes acumulados na pedra.

Deve referir-se que a empresa exerce rigoroso controlo sobre a qualidade das cargas a depositar, tendo em vista a garantia de que as mesmas sejam exclusivamente compostas por inertes dos tipos genéricos já mencionados. Deste modo, assegura-se estrito cumprimento do normativo legal a que a Empresa está vinculada como condição para que a pedra possa funcionar como aterro e previne-se a eventualidade de deposição abusiva de materiais orgânicos ou outros que possam, por lixiviação, constituir-se em emissores de metais pesados ou de contaminantes químicos perigosos de qualquer outra índole.

3 – Para o Departamento de Dep. Minas / FEUP, a solicitação da SOLUSEL representou a oportunidade de proceder, acessória e complementarmente, a um outro estudo, de cariz não tão imediatista, mas de inegável valor científico: interpretação da rede de fracturas a levantar, procurando a definição da sua génese, a cronologia dos vários sistemas que a integram e, particularmente, a detecção de correlações entre as fracturas e a falha sísmicamente activa da “Madalena”.

GEOLOGIA

Introdução

A Pedreira da Quinta do Moinho, conhecida por Pedreira da Madalena, integra-se no maciço granítico, vulgarmente, designado maciço de Lavadores. Forma um corpo granitóide alongado segundo a direcção NW-SE e estende-se entre a Foz do Douro e as Termas de S. Jorge.

Este tipo de granitos instalam-se posteriormente ao desenvolvimento da 3ª fase de deformação Varisca (D₃), sendo por esse facto considerados tardi a pós-orogénicos. Normalmente, dão origem a maciços circunscritos, alongados na direcção NNE-SSW e, mais raramente, W-E, de harmonia com os principais sistemas de falhas que

condicionam a sua instalação. Encontram-se dispersos por vários pontos da Zona Centro-Ibérica (ZCI) até à fronteira com a Zona de Ossa-Morena (ZOM). No conjunto, são designados por granitos de tipo Gerês. Mercê da inexistente deformação dúctil, são muito utilizados como rocha ornamental e materiais de uso industrial.

O maciço em análise aproveita, para se instalar, a grande zona de fraqueza correspondente à sutura Cadomiana que, a sul do Porto, estabelece a divisória entre o Complexo xisto-grauváquico (ZCI) e o Precâmbrico da Formação de Lourosa (ZOM). No orógeno Varisco, esta sutura é retomada com movimento transcorrente dextro, materializando a Zona de Cisalhamento de Porto-Tomar (ZCPT). Entre S. Jorge e Perosinho, a faixa de cisalhamento coincide com o bordo ocidental do maciço; a norte desta última localidade, até à Foz do Douro, o maciço implanta-se sobre o acidente, bloqueando-o pelo menos até ao desenvolvimento das fases frágeis tardi-Variscas (D₄).

Enquanto estrutura dúctil, a ZCPT suportou um dos mais pronunciados movimentos transcorrentes registados no Varisco Ibérico, o que acarreta deformação extrema dos blocos envolventes. Dado, a idade do granito de Lavadores ser considerada do Pérmico e corresponder aos derradeiros episódios Variscos, o bloqueio da sutura induzido pela sua instalação é efémero, não impedindo a reactivação desta importante zona de fraqueza, nas fases frágeis tardi-Variscas, no decorrer do ciclo Alpino e nos tempos sub-actuais de que é testemunho o registo sísmico ao longo da falha de Porto-Tomar. Os diferentes sistemas de fracturas frágeis que afectam o granito, na área da Pedreira da Madalena, exaustivamente, levantadas na Carta Geológica e que adiante trataremos com detalhe, são o reflexo da reactivação da grande estrutura de falha desde os tempos tardi-Variscos até ao presente.

Enquadramento Regional

O Maciço de Lavadores, onde se encontra implantada a Pedreira da Madalena, forma um batólito granítico de secção elíptica alongada na direcção MW-SE, com cerca de 20 km de extensão por 4 km de largura máxima. No extremo sul, próximo de S. Jorge, a largura é inferior a 1 km.

A forma sub-elíptica que apresenta em planta deve-se à conjugação de fenómenos distensivos associados ao relaxamento das tensões Variscas na fase de reequilíbrio isostática do final do orógeno e, ainda, ao facto da intrusão ter aproveitado a grande zona de fraqueza que correspondeu à sutura Cadomiana. Com efeito, segundo esta zona foram acretados os blocos continentais equivalentes à ZCI e ZOM. A partir da colisão Cadomiana, no Neoproterozóico, passaram a integrar o Terreno Ibérico ou microplaca Ibérica.

No orógeno Varisco, a zona de fraqueza em análise é retomada como importante zona de cisalhamento intracontinental, submetida a um movimento transcorrente dextro de mais de 100 km (Ribeiro et al., 1980), persistente desde as fases precoces às tardias do orógeno, sendo uma das grandes estruturas responsáveis pela modelação do Arco Ibero-Armoricano.

É neste contexto que, posteriormente, ao desenvolvimento da última fase compressiva Varisca D₃, se implanta o Maciço de Lavadores, bloqueando temporariamente o movimento segundo a ZCPT. O maciço exhibe fácies litológicas variadas, não diferenciadas nas Cartas Geológicas editadas pelo IGM. Assim, na praia de Salgueiro, o granito mostra tons rosados, sendo francamente porfiróide com megacristais de microclina-pertite que podem atingir 8-10 cm segundo a maior dimensão; no extremo sul do maciço, o granito é acinzentado de grão médio e com esparsos megacristais de microclina; na área da pedreira da Madalena, domina granito cinzento de grão médio, porfiróide, em que os megacristais de microclina representam cerca de 20% do volume da rocha e não ultrapassam 3 cm segundo a maior dimensão.

Trata-se, pois, de um batólito zonado, do ponto de vista litológico e, provavelmente, composicional, cujas fácies não foram, até ao presente, devidamente diferenciadas. Os principais mecanismos apontados como responsáveis pelas variações interfácies são as pulsações tectonomagmáticas, fraccionamento do magma, assimilação de materiais crustais, evolução pós-magmática e, também, mecanismos ligados aos processos de ascenso e implantação em níveis altos da crosta. A caracterização petroquímica do maciço permitirá discriminar as diferentes hipóteses.

Caracterização petroquímica do Granito da Madalena

Localização da colheita de amostras

Foram recolhidas seis amostras aleatórias, dispersas pela área da pedreira para estudos petrográficos.

As duas amostras destinadas a análise química representam um valor médio de 30 kg por amostra, de gravilhas lavadas, de material muito fresco, retiradas de lotes distintos. Tornam-se representativas para a área da pedreira.

Petrografia

Estrutura:

Em observação macroscópica, trata-se de uma rocha granitóide, isotrópica, mesocrática, de granularidade média, com quartzo abundante, plagioclase bem desenvolvida e esparsos megacristais de feldspato potássico rosado que não ultrapassam 3 cm segundo a maior dimensão. Mostra tonalidade cinzenta rosada e teores muito baixos de alteração deutérica.

Textura:

Observado ao microscópio, o granitóide da Madalena revela textura hipautomórfica, inequigranular, porfiróide, com megacristais esparsos.

Os cristais de plagioclase dominam o arranjo textural e correspondem a duas gerações. Destacam-se cristais idiomórficos de plagioclase zonada com núcleos que atingem 38% An e dimensões centimétricas, sendo nitidamente o primeiro mineral a cristalizar. Estes fenocristais são instáveis e reagem com o meio para dar lugar a outra geração de plagioclase, xenomórfica, de pequena dimensão e composição dos domínios da oligoclase. As reacções da plagioclase com quartzo, em presença de abundante mirmequite, dão lugar à formação de um feldspato altamente pertítico com características ópticas de microclina-pertite. Assume, por vezes, dimensões megacristalinas e adquire ligeira rubefacção por impregnação de óxidos de ferro.

Na matriz, encontram-se esporadicamente pequenos cristais de ortose e albite, sendo este último um caso extremo de reacção da plagioclase com o meio.

Composição mineralógica

Entre os componentes essenciais, identificam-se:

- Quartzo xenomórfico, mostrando extinção ondulante, devida a deformação a frio;
- Plagioclase zonada com núcleo de andesina (38%An) e bordos de oligoclase (20% An); a plagioclase da segunda geração tem composição uniforme dos domínios da oligoclase e ocorre intimamente associado aos restantes constituintes; albite é um componente raro e encontra-se a bordejar a plagioclase cálcica;
- Feldspato potássico pode ser também de dois tipos muito distintos: um, muito raro, hipidiomórfico, tem características ópticas de ortose; outro, mais abundante, é nitidamente posterior, sendo dos últimos minerais a cristalizar, porquanto, inclui poecilíticamente todos os restantes minerais, forma os megacristais e tem composição de microclina pertítica, filiforme;
- Biotite verde, mais abundante que biotite castanha.

Componentes subordinados: magnetite, óxidos de ferro hidratados, apatite, zircão, alanite e rútilo.

Componentes secundários: clorite resultante da alteração de biotite e lamelas de moscovite e materiais filitosos resultantes da alteração da plagioclase.

Classificação: *Granodiorito biotítico*.

Petroquímica

As análises químicas de elementos maiores e menores (Quadro I e II), efectuadas no Laboratório do IGM por FRX representam, como se referiu, um valor médio de 30 kg por amostra, de gravilhas lavadas, de dois lotes distintos

Elementos	Amostra 1	Amostra 2
Si O ₂	67.39	67.48
Al ₂ O ₃	15.71	15.71
Fe total (óxidos)	3.12	3.08
Mn O	0.05	0.04
Ca O	2.41	2.41
Mg O	1.15	1.19
Ma ₂ O	4.14	4.01
K ₂ O	3.97	3.97
Ti O ₂	0.52	0.52
P ₂ O ₅	0.21	0.21
P. Rubro	0.86	1.14
Total	99.53	99.76

Quadro I - Análise química (elementos maiores) de rochas da Pedreira da Madalena.

Ref. ^a	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Ta	Sn	W	Th
Am. 1	128	641	13	185	20	876	15	5	38	13
Am. 2	126	601	11	182	19	829	15	4	36	13

Quadro II - Análise química (elementos menores) de rochas da Pedreira da Madalena.

A projecção dos valores dos Na₂ O+K₂ O vs SiO₂ no diagrama de Peacock (1931), Fig. A, mostra que o granito da Madalena tem acentuado carácter cálcico, de acordo com a abundância e composição da plagioclase dominante neste granitóide. Esta característica apontaria no sentido dos granitóides de Tipo M o que de certa forma é reforçado pela projecção das análises químicas do mesmo granito no diagrama de Maniar and Piccoli (1984), Fig. B, e no diagrama de Pearce (1984), Fig. C.

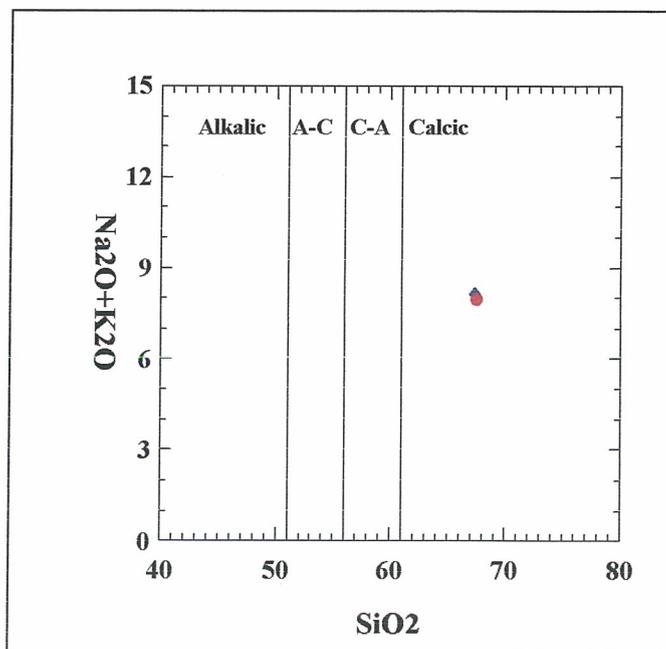


Fig. A - Projecção de amostras de granito da Pedreira da Madalena, no diagrama de Peacock (1931).

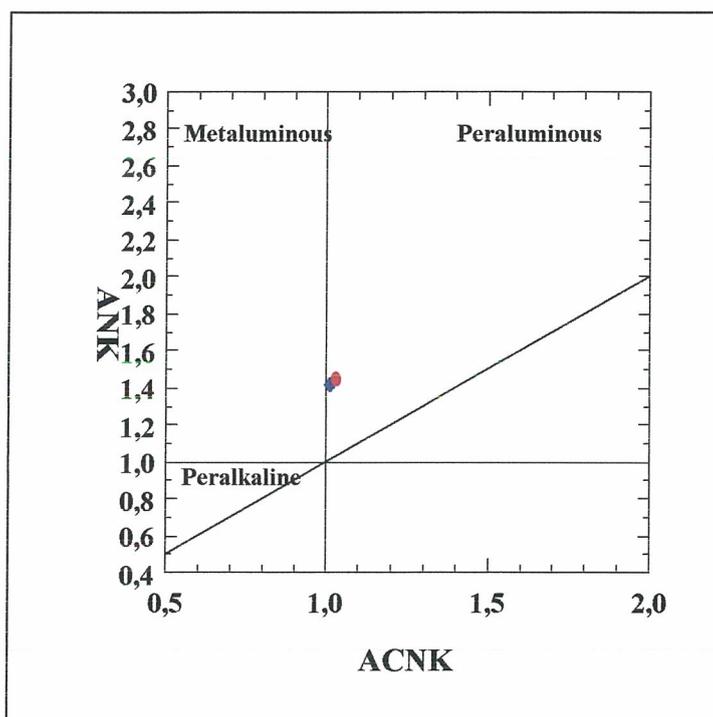


Fig. B - Projecção de amostras da Pedreira da Madalena no diagrama de Maniar and Piccoli (1984)

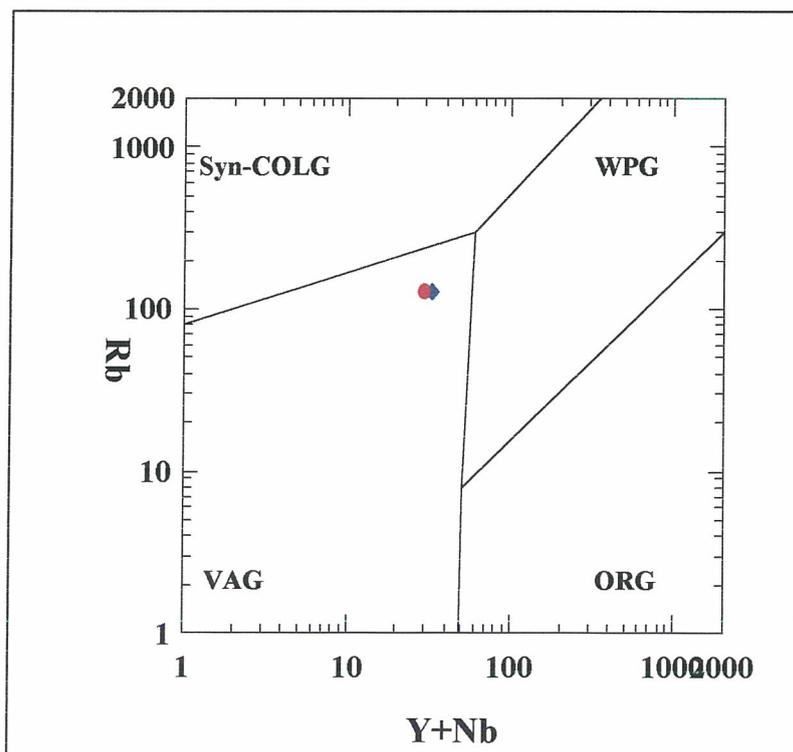


Fig. C - Projecção de amostras de granitos da Pedreira da Madalena no diagrama de Pearce (1984).

Com efeito, nos diagramas referidos, o granitóide da Madalena situa-se, respectivamente, na divisória do campo metaluminoso (típico dos granitóides Tipo M) e peraluminoso (típico dos granitóides colisionais) ou então no

domínio dos granitóides de arco magmático (típico dos granitóides Tipo M) e relativamente próximo do campo intraplaca (típico dos granitóides anorogénicos).

As incongruências registadas no quimismo dos granitóides da Madalena devem-se ao facto de provirem de um magma profundo, mantélico ou basicrustal que sofreu cristalização fraccionada e extracção de plagioclase cálcica e minerais ferromagnesianos com modificação da composição original, como aponta a plagioclase fortemente zonada. Este magma ao instalar-se em domínios da crosta superior, sofreu outros tipos de contaminações e reacções pós-magmáticas que não podemos discriminar por falta de dados químicos, como sejam terras raras e isótopos.

Os dados de terreno, mostram que se trata de um granitóide tardi a pós-orogénico, o que implicaria situá-lo no campo WPG do diagrama de Pearce (1984). Tal não acontece, mercê da fraccionação e contaminações sofridas pelo magma original ao implantar-se em domínios altos da crosta.

Encraves

Os encraves, sempre do tipo tonalítico biotítico são irrelevantes. Não se encontram referenciados na Carta por duas razões. Ora, porque as suas dimensões centimétricas, segundo o maior diâmetro, os torna inexpressivos à escala cartográfica, ora ainda, porque a sua compacidade, densidade e estado de recristalização lhes confere enorme resistência mecânica, não penalizando os materiais inertes e, pelo contrário, valoriza-os.

Campo Filoniano

O campo filoniano, praticamente, não tem expressão na área da pedreira em análise. Restringe-se ao preenchimento de fracturas abertas, com quartzo, sulfuretos, turmalina e epidoto. A espessura dos filonetes nunca ultrapassa a ordem de 3 cm, sendo normalmente inferior a 1 cm. Dada a estreita sугeição do campo filoniano à rede de fracturas, serão descritas na rubrica da tectónica por comodidade de interpretação cinemática, conjunta.

Tectónica

Elaborou-se uma Carta Geológica, à Escala 1:500, com objectivo de destrinçar eventuais litotipos e efectuar a projecção dos vários sistemas de fracturas e diaclases que afectam o granito. Na área de influência da pedreira, a litologia é homogénea, estando representada pelo litotipo antes caracterizado.

Sobre os sistemas de fracturação frágil que afectam o granito, analisam-se em primeira instância os sistemas de fracturação herdados dos episódios anteriores à instalação do granito, procedendo-se de seguida à destrinça das diferentes etapas de reactivação das estruturas, mediante o registo da fracturação e diaclasamento impressos no granito pelos episódios tectónicos sucedâneos da sua instalação.

Grandes sistemas de fracturas herdadas do orógeno Varisco

Baseados no conhecimento geológico regional, na envolvente do granito de Lavadores, particularmente, no sector mais a sul, região de S. João da Madeira, sobressaem claramente dois importantes sistemas de falhas, um N 50 W / cavalgante para SW e outro, N 50 E / subvertical com forte enchimento filoniano que chega a atingir dezenas de metros de espessura.

O primeiro está nitidamente inserido na faixa correspondente à ZCPT, com movimento transcorrente dextro e componente de cavalgamento para W. Corresponde aos grandes cisalhamentos activos da D₁ à D₃ hercínica. Nas fases colisionais precoces, actuam ao nível do soco, estruturam a grande arcatura da cadeia, produzem forte encurtamento crustal ao mesmo tempo que induzem o deslocamento dos mantos na superfície. Na D₃, fase pós-colisional, depois do movimento transversal de deslocação dos mantos ter cessado, a deformação intracontinental prossegue segundo cisalhamentos longitudinais paralelos aos bordos das placas continentais em confronto. Estes cisalhamentos, dúcteis enquanto perdura o metamorfismo regional, têm movimento transcorrente dextro, desenvolvem pares conjugados sinistros com orientação ENE-WSW, controlam os dobramentos D₃ e comandam a

instalação dos granitóides sin e tardi-tectónicos, relativamente a esta última fase. É lícito aqui perguntar como vão então afectar os granitóides da Série Pós-Tectónica, em que o granito do maciço de Lavadores se insere.

Tais cisalhamentos representam, pois, grandes zonas de fraqueza da cadeia, activos das fases precoces até às fases tardias, susceptíveis portanto, de reactivação nas fases frágeis posteriores ao metamorfismo hercínico e também nas fases compressivas da orogenia Alpina, adiante abordadas.

O segundo sistema de fracturas, N 50 E / subvertical, corta os granitóides instalados sin-D₃, sendo caracterizado por fendas muito abertas e forte enchimento de quartzo, aplos e pegmatitos. Corresponde aos últimos impulsos da colisão em que os reajustamentos intracontinentais transcorrentes segundo cisalhamentos paralelos à sutura eram atenuados, mas, prevaleciam as tensões de encurtamento crustal (achatamento) subperpendiculares, quer à sutura, quer aos grandes cisalhamentos de direcção NW-SE. Daí as extensas fendas de tracção N 50-60 E e forte enchimento filoniano. Materializam os últimos estádios compressivos de D₃ em que a componente de achatamento se sobrepõe à componente cisalhante, devido ao bloqueio dos movimentos intracontinentais induzidos pelo metamorfismo e abundância de granitóides instalados sob controlo desta fase de deformação.

Idade de instalação do Maciço de Lavadores

Os vários litótipos que formam o maciço ter-se-ão instalado por impulsos tectonomagmáticos subordinados ao relaxamento de tensões pós-D₃. Tem sido atribuída a estes granitóides, uma idade compreendida entre 296-290 Ma (DIAS et al., 1998) marcando o início do período Pérmico.

Este plutonismo granítico, de natureza subalcalina e origem profunda, mantélica ou basicrustal, tem características que o aproximam dos granitóides de Tipo A, isto é, anorogénicos. Com efeito, o controlo estrutural que é possível estabelecer com base nas deformações impressas no encaixante metassedimentar, revelam claramente que o maciço de Lavadores intruiu posteriormente ao máximo desenvolvimento da D₃ hercínica, tratando-se, pois, de uma intrusão tardi a pós-orogénica. Contrasta nitidamente com o magmatismo orogénico, largamente desenvolvido na cadeia Varisca entre 380-300 Ma, contemporâneo dos episódios compressivos do mesmo orógeno. Assim, esta última idade constitui um marco importante de mudança, quer no regime tectónico da crosta Varisca, quer quanto à natureza dos protólitos magmáticos.

Em muitos locais da ZCI, o plutonismo granítico subalcalino, relacionado com a distensão crustal tardi-Varisca, é nitidamente controlado pelo sistema de fracturas frágeis de direcção NNE-SSW correspondente à fase de deformação frágil D₄. No caso do maciço de Lavadores, porém, o controlo exercido pelo sistema de fracturas NNE é subordinado, sendo dominante o sistema NW-SE no controlo de implantação do maciço. Vejamos as implicações deste facto.

Rejogo das estruturas nos sucessivos episódios

Hierarquizadas por ordem de importância, registam-se as seguintes fendas e fracturas, com ou sem enchimento filoniano que, de forma generalizada, afectam o granito da pedreira em análise:- i) fendas de tracção, com ou sem preenchimento de quartzo negro, orientadas N (5-15°) E / subverticais; ii) fracturas com ou sem enchimento de quartzo, epidoto, turmalina e sulfuretos, orientadas N (50-60°) W / subverticais a inclinadas para NE; iii) fracturas fechadas com orientação N (50-70°) E / subverticais; iv) fendas e diaclases, também fechadas, formando sistemas de tipo *Riedel* com orientação, respectivamente, N (30-40°) E / subverticais e N (10-20°) W / subverticais; v) e fendas fechadas com zona de esmagamento e reduzido enchimento de quartzo e sulfuretos, orientadas segundo N (80-100°) E / verticais.

Debrucemo-nos sobre a interpretação cinemática destas fracturas abertas que às vezes albergam filonetes e, bem assim, sobre as restantes fendas e diaclases fechadas, onde os filonetes não tiveram ensejo de se instalar. Para tanto, socorremo-nos dos episódios compressivos, quer tardi-Variscos, quer pós-Variscos que reactivaram as estruturas impressas no soco pelas fases de deformação precoces.

Compressão de D_4 Varisca (NNE-SSW)

Uma vez cessada a actuação das fases compressivas colisionais responsáveis pelo espessamento da crosta, mercê das sucessivas imbricações a que esta foi submetida, a Cadeia Varisca tende a entrar em colapso, quer por falta de suporte tensional, quer devido à reequilíbrio isostática como resposta do manto à sobrelevação crustal. Tal situação gera um sistema de tensões sub-horizontais com distensão perpendicular ao eixo da cadeia em cada ponto e uma compressão conjugada, normal à distensão que, no caso vertente, fica posicionada próximo de N-S. Corresponde ao campo de tensões de D_4 Varisca, desenvolvida no Carbonífero final, início do Pérmico, em fase de forte decaimento do metamorfismo e, portanto, com características de actuação frágil.

O presente tipo de actuação frágil sobre os sistemas herdados N (50-60°) W / subvertical a inclinado para NE (Fig. 1) e N (50-70°) E / subvertical (Fig. 2), bem impressos no soco e anteriores à instalação do maciço de Lavadores, produz a reactivação dos mesmos sistemas que, actuados pelo novo campo de tensões, reagem de forma compatível, com movimentação, respectivamente, dextra e sinestra, passando a penetrativos frágeis no granito.

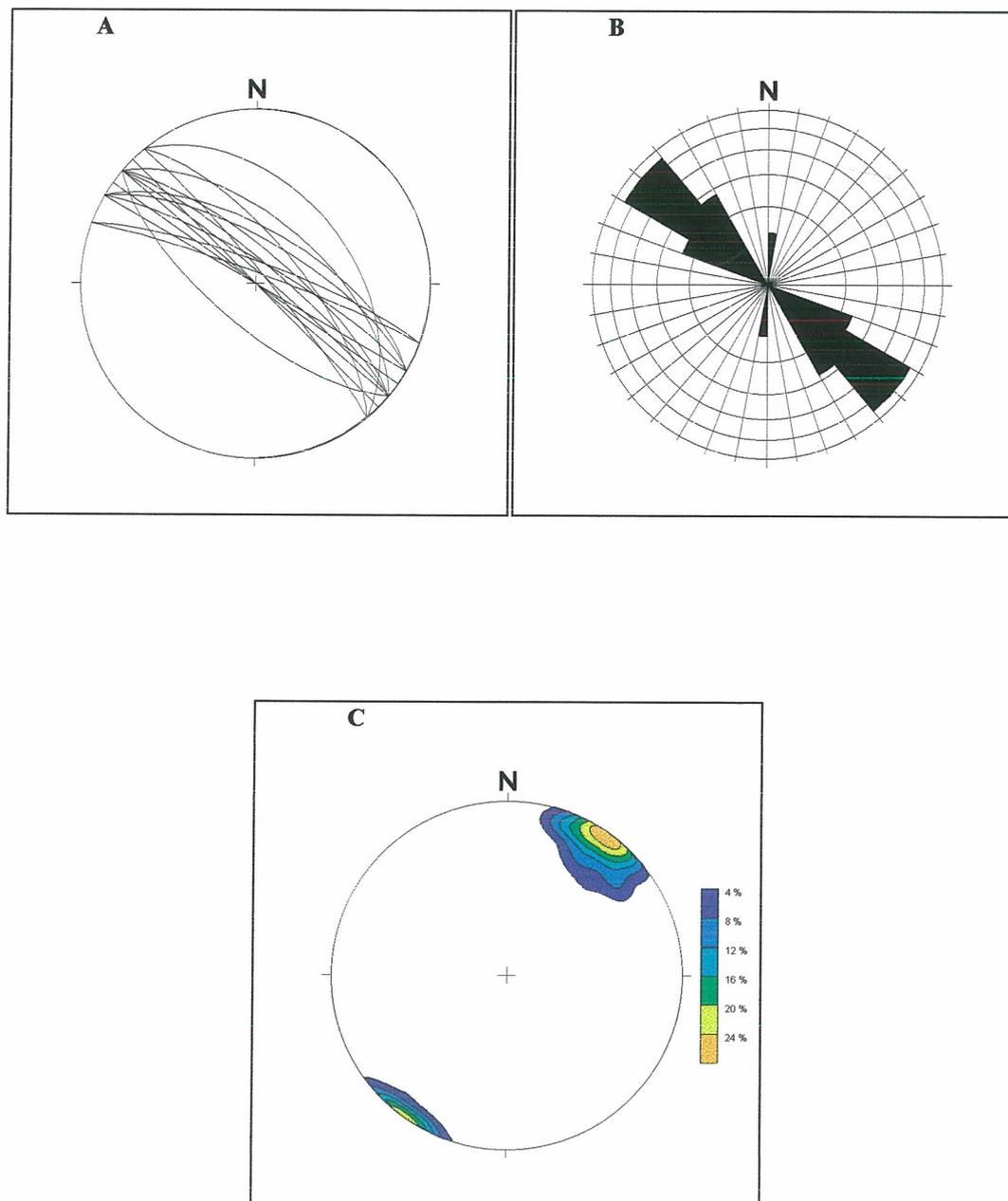


Fig. 1 - Fendas e diaclases paralelas à zona de cisalhamento de Porto-Tomar (ZCPT):
A - Planos das fendas e diaclases;
B - Médias de frequência das fendas e diaclases;
C - Diagrama de densidade de polos das fendas e diaclases.

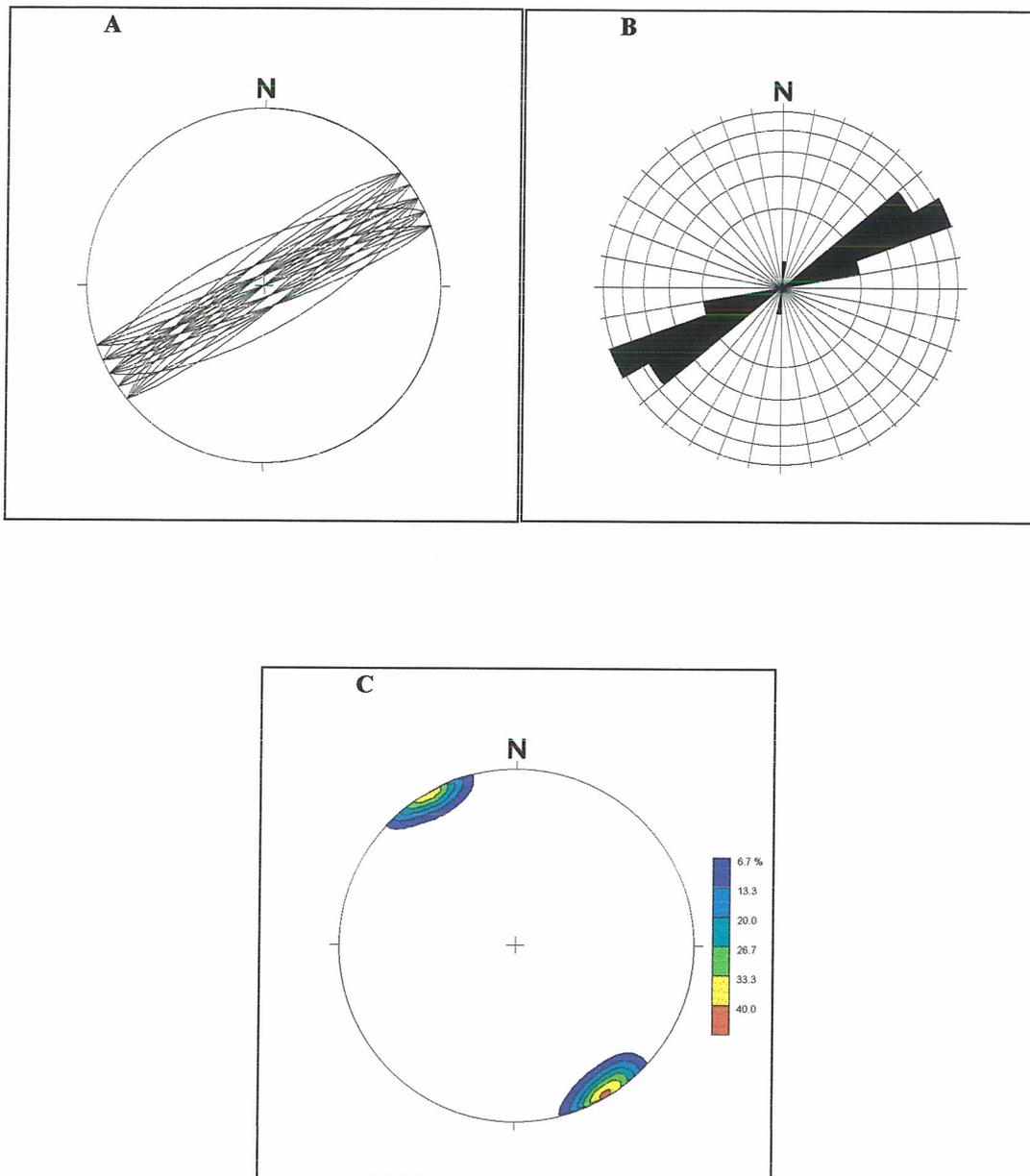


Fig. 2 - Fracturas e fendas resultantes da reactivação do sistema Varisco N 50-70° E / subvertical:
 A - Planos das fracturas e fendas;
 B - Médias de frequência;
 C- Diagrama de densidade de polos.

Todavia, dada a posição privilegiada da compressão máxima N-S, relativamente ao sistema paralelo à ZCPT, ou seja, ao sistema N (50-60°) W / subvertical a inclinado para NE, este é retomado com maior intensidade, com movimento dextrógiro, produzindo o seu sistema próprio, de fracturação frágil, em conformidade com o esquema, (Fig. 3)

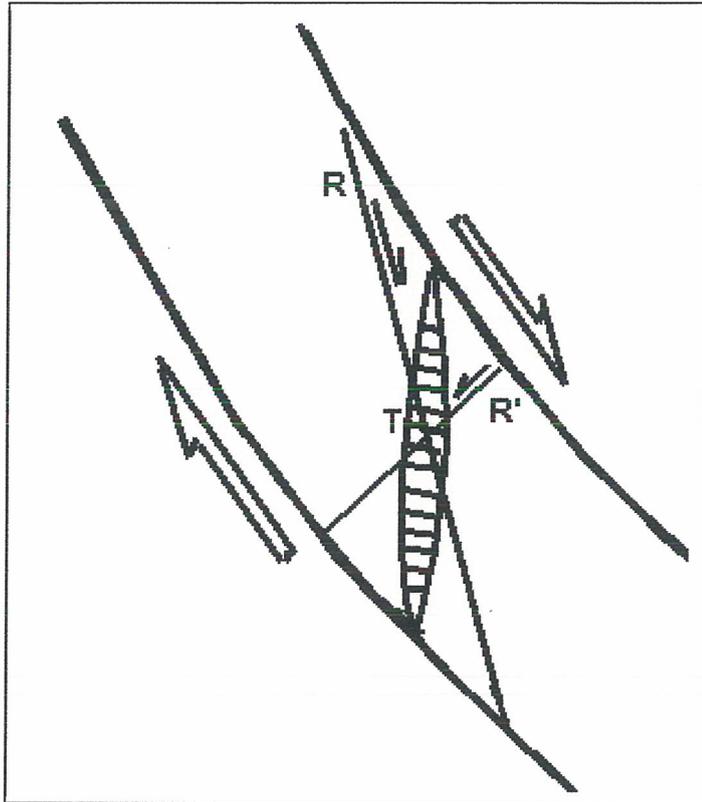


Fig. 3 - Sistemas de fracturas frágeis geradas pelo movimento transcorrente dextro, segundo a ZCP-T: Fendas de Tração (T); Fracturas Riedel (R) e Riedel conjugado (R').

A movimentação frágil tardi-Varisca segundo a ZCPT gera os seguintes sistemas: fendas de tração (T) N (5-15°) E / subverticais (Fig.4); fendas e diaclases, fechadas, formando sistemas de tipo *Riedel* (R) e *Riedel conjugado* (R') com orientação, respectivamente, N (10-20°) W / subverticais (Fig.5) e N (30-40°) E / subverticais (Fig.6).

Dada a natureza frágil, nesta fase, do sistema onde se concentra a maior quantidade de movimento, as fracturas secundárias, de tipo T, R/R' e também X e P, aqui não consideradas, fazem ângulos menores com o plano de movimento do que tratando-se de cisalhamentos dúcteis. Estes modelos inicialmente testados através de experimentação teórica (Tchalenko, 1970), têm sido confirmados na prática por numerosos trabalhos de terreno, entre outros (Gamond, 1987; Petit, 1987).

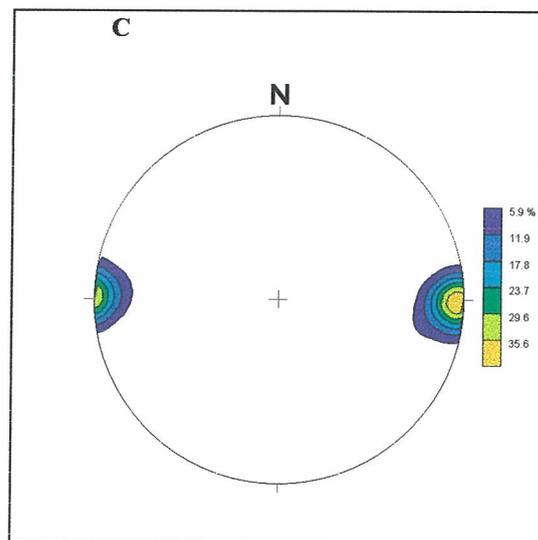
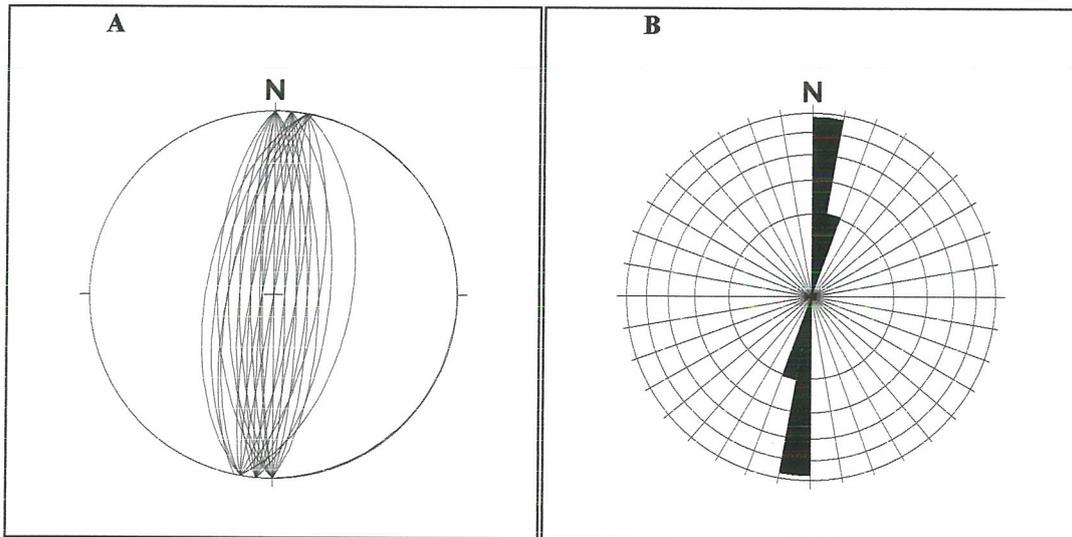


Fig. 4 - Fendas de Tracção (T):
 A - Planos das Fendas de tracção;
 B - Médias de frequência;
 C - Diagrama de densidade de polos.

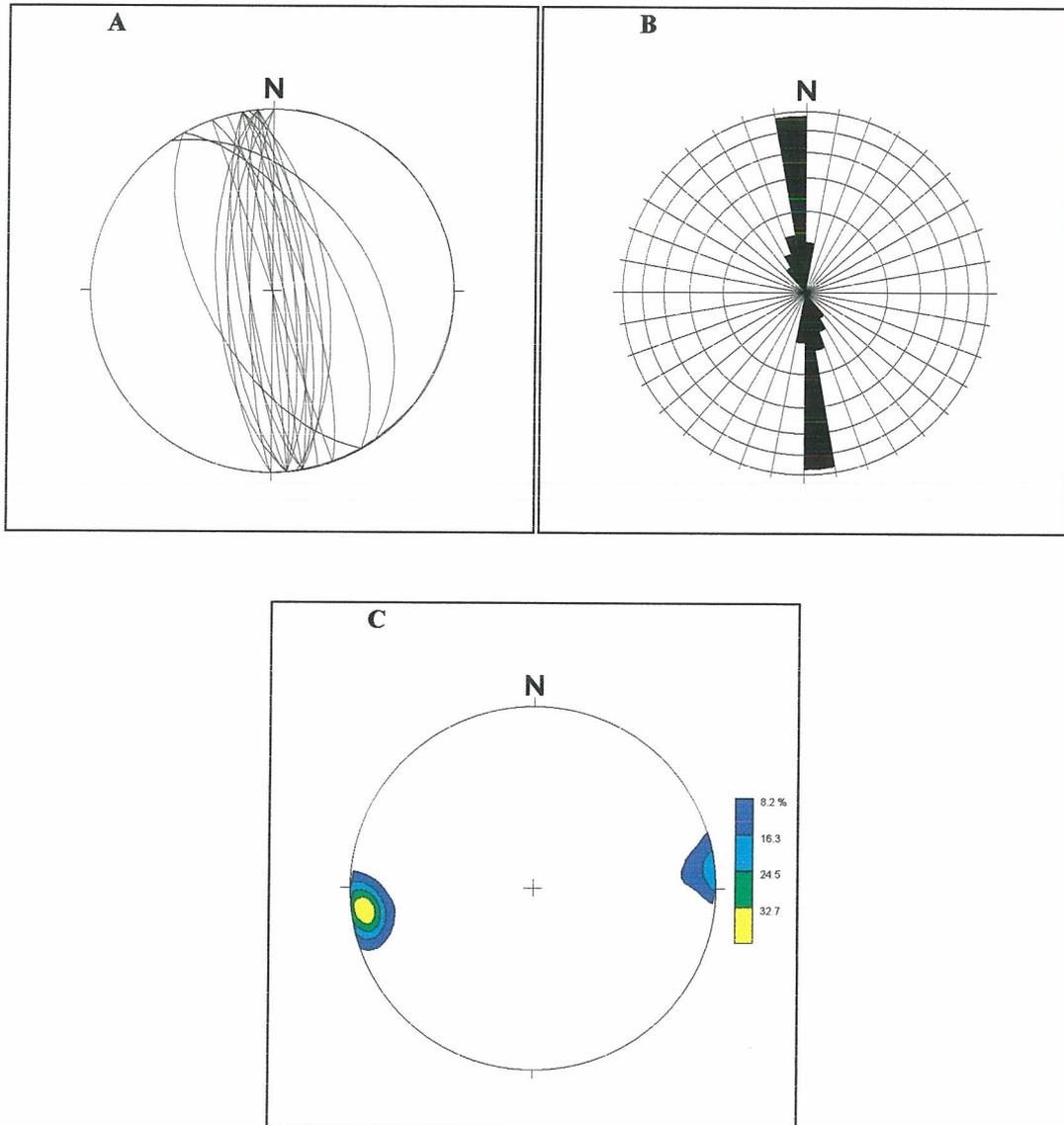


Fig. 5 - Fendas do sistema Riedel (R):
 A - Planos das fendas;
 B - Médias de frequência;
 C - Diagrama de densidade de polos

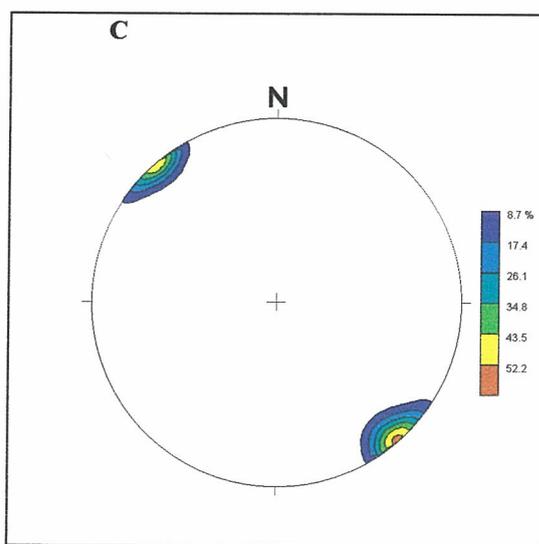
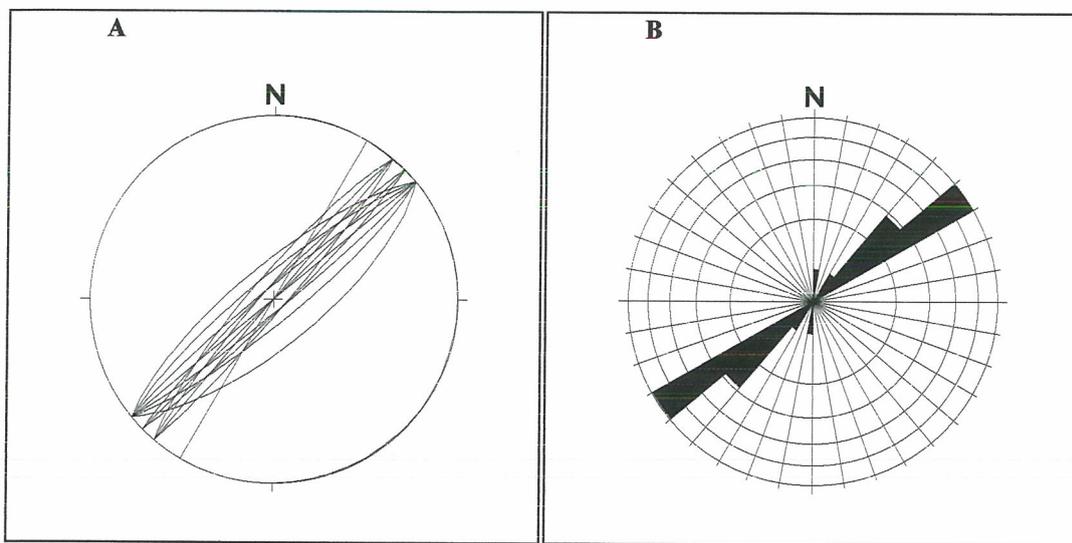


Fig. 6 - Fendas do sistema Riedel conjugado (R'):
 A - Planos das fendas;
 B - Médias de frequência;
 C - Diagrama de densidade de polos.

Pérmico inferior: sistema (W-E)

Em alguns pontos da cadeia Varisca e em especial ao longo da ZCPT, regista-se um movimento compressivo com tensão máxima próximo de W-E. Este campo de tensões é particularmente activo na região do Buçaco originando, ao longo da falha de Porto-Tomar, cavalgamento da Unidade Neoproterozóica designada Série Negra (Carvalhosa, 1965), sobre os sedimentos do Autuniano, correspondentes ao Pérmico continental do Buçaco (Domingos et al., 1983).

Na pedreira da Madalena, a actuação deste sistema compressivo não é muito evidente. Todavia, em algumas situações, detectam-se movimentos referíveis ao presente campo de tensões que podem traduzir: um ligeiro movimento cavalgante para leste segundo o sistema de fracturas N 50-60° W / subverticais, interpretado com base na atitude de algumas estrias no plano destas fracturas, com "pitch" próximo de 90° e subida dos blocos situados a W das fracturas; e pequenos desligamentos subhorizontais, segundo o sistema de fracturas N 85°W ± 15° / subverticais. Neste último caso, o registo dos desligamentos mostra movimento dextro nas fracturas com azimute < 90° e movimento sinestro nas fracturas com azimute > 90°, (Fig. 7)

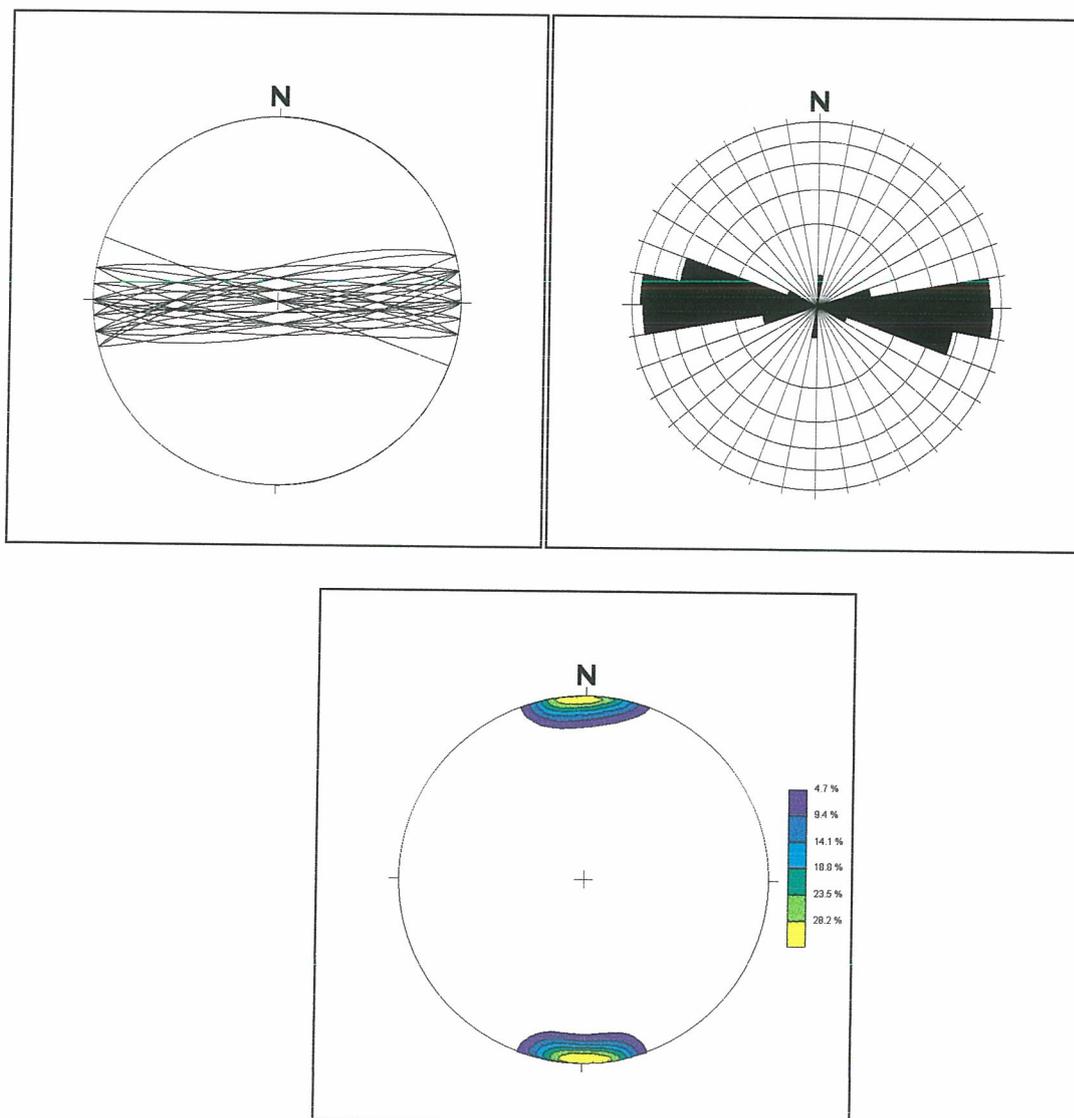


Fig. 7 - Sistema de fracturas N 85° ± 15° W:
A - Planos das fracturas;
B - Médias de frequência;
C - Diagrama de densidade de polos.

Alpino

Uma primeira análise da actuação das fases Alpinas sobre os sistemas herdados do orógeno Varisco leva à consideração de um movimento precoce e um movimento mais tardio em alguns dos sistemas de fracturas desenvolvidos anteriormente. A interpretação destes movimentos apoia-se no registo de estrias nos lisos de falha e em interpretações morfológicas regionais.

O movimento precoce teve um primeiro impulso, provavelmente no Paleogénico, sendo compatível com a compressão Pirenaica NNE-SSW. Actua com maior incidência sobre sistemas compatíveis com esta direcção, como é o caso das fendas **T** e **R/R'** antes analisadas. Reforça os movimentos definidos para as fracturas Riedel, torna as fendas **T** mais abertas, propícias ao alojamento de fluidos portadores de quartzo, turmalina e epidoto e produz brechificação do preenchimento filoniano anterior. Induz, além disso, algum grau de movimento dextro na falha equivalente à ZCPT.

O segundo e mais importante impulso Alpino tem início no Miocénico superior, originado pela compressão Bética direccionada segundo NNW-SSE. A actuação desta compressão sobre os sistemas de fracturas vigentes, repercute-se com maior intensidade segundo o sistema paralelo à ZCPT e sobre as fracturas de direcção NNE-SSW, por serem direcções compatíveis com a compressão Bética, passando a ser actuados como desligamentos transcorrentes, respectivamente, dextros e sinistrógiros. De notar que a grande zona de fraqueza coincidente com a ZCPT, após a instalação do maciço granítico de Lavadores, suportou, sucessivamente, reactivações frágeis com movimento transcorrente dextro.

Actual (compressão W-E)

Os movimentos tectónicos mais tardios observados na região a sul do Porto e que de algum modo afectam o maciço de Lavadores, reportam-se, essencialmente, ao movimento de idade do Quaternário observado na falha coincidente com a ZCPT, também designada falha da Madalena, que passou a ser activada como falha normal com abatimento do bloco oeste. A distensão segundo a falha da Madalena pode ser atribuída a várias causas, tais como o relaxamento das tensões Béticas, ou então, devido ao campo de tensões Quaternário, com tensão máxima W-E, relacionada com o início da subducção Atlântica (Ribeiro, 1988).

Nesta última situação, tem sido atribuída ao campo de tensões W-E a responsabilidade pelos movimentos verticais segundo os sistemas de falhas N.NE-S.SW, compatíveis com o soerguimento de algumas Serras portuguesas marginais às grandes estruturas de falha com aquela direcção, nomeadamente o conjunto de Nogueira, Bornes e Estrela, na dependência da falha de Portelo-Vilariça e, em menor grau, os sistemas montanhosos na dependência das falhas Verin-Réguia e Caminha-Aveiro.

A morfologia associada a este último sistema, à excepção do Monte Faro (Caminha), encontra-se muito degradada no Alto Minho e Douro Litoral, não sendo possível discriminar a existência de movimentos verticais e formação de "horsts" associados. Todavia na região da pedreira, a escarpa da Madalena é bem marcada na paisagem com um desnível da ordem de 40 metros. O abatimento do bloco situado a W da falha é bem notório, quer pelo forte encaixe da foz do rio Douro, quer ainda, pelo basculamento, no mesmo sentido, de depósitos Quaternários da zona vestibular do rio, na margem sul.

Falhas

As falhas atingem significado quando as fendas com ou sem enchimento filoniano, antes abordadas, têm expressão cartográfica. São disso exemplo as falhas com direcção N-S a NNE-SSW e algumas de rumo NE-SW a ENE-WSW. Em ambos os casos, resultam de reactivação frágil tardi-Varisca, Alpina e sub-actual de fracturas geradas nos vários episódios, acima enumerados e analisados do ponto de vista cinemático. Privilegiam-se apenas os sectores onde as fracturas merecem a qualificação presente:

Na área central da pedreira, desenvolve-se um corredor de fracturas paralelas de direcção N-S a NNE-SSW que, mercê do seu significado, condiciona o desmonte e desenvolvimento da exploração, subordinados a esta zona de fraqueza. A densidade da presente rede de fracturas é bastante elevada, a ponto de poder considerar-se, no conjunto, uma zona de falha ocupando a parte central da pedreira.

Cruza com outro sistema de fracturas de direcção NE-SW, com e sem enchimento filoniano e brechificação mais ou menos pronunciada. Todavia, o espaçamento das fracturas neste sistema é maior, não chegando a materializar zonas de falha.

Os corredores definidos não geram situações de forte esmagamento e alteração e, por esse facto, não constituem zonas de exclusão da exploração, na produção de inertes e gravilhas.

QUANTO À PERMEABILIDADE DOS TERRENOS

Da observação minuciosa do contorno da corta exigida pelo levantamento exaustivo do sistema de discontinuidades que afectam o maciço onde a Pedreira foi aberta, é possível extrair as seguintes conclusões no que respeita à permeabilidade do maciço:

São extremamente raras as fontes ao longo do contorno da corta e manifestam débitos insignificantes (mesmo durante épocas de pluviosidade intensa e persistente).

Apenas no canto Sudoeste da corta é visível afluência de água escorrendo em lâmina ao longo do hastial. Mas trata-se de água recirculada para a escavação a partir de uma pedreira desactivada situada a Sudoeste da corta, a qual serve de reservatório ($\approx 50000\text{m}^3$) da água bombeada do fundo e destinada a fins industriais (lavagem de inertes).

Abaixo dos 40 metros aproximadamente, as discontinuidades apresentam-se muito fechadas, não podendo por isso constituir-se em vias de afluxo de águas infiltradas à corta. Pela mesma razão de baixíssima permeabilidade, também essas discontinuidades não poderão ser vias de defluxo de água acumulada no fundo da corta (águas pluviais, na sua larguíssima maioria) e que tenderão a impregnar os resíduos que aí forem sendo acumulados.

Estas águas serão, por razões industriais já referidas, permanentemente bombeadas do fundo da corta, nomeadamente da zona mais baixa da praça da Pedreira.

A empresa tem prevista a elevação progressiva de poços manilhados, à medida que a deposição de resíduos for sendo realizada e que servirão para instalar bombas hidráulicas e respectivas condutas de elevação da água que impregnar o aterro. Quando finalizar o aterro total da corta, as águas captadas nos referidos poços servirão para diversos fins nomeadamente a rega de espaços verdes reconquistados pela deposição dos resíduos.

Posto o que antecede, não nos parece que a acumulação de água no fundo da corta não poderá encerrar qualquer periculosidade potencial para captações de águas para fins domésticos ou agrícolas que existam em torno da escavação.

Conclusão

O lineamento de Porto - Tomar corresponde a uma falha de grande significado, com uma história geológica complexa que se dilata no tempo desde o Neoproterozóico aos tempos sub-actuais.

Assim, com o final da orogenia Cadomiana, materializa a zona de sutura através da qual se produziu a amalgamação dos blocos continentais correspondentes à ZOM e ZCI.

Na orogenia Varisca, foi reactivada como zona de cisalhamento intracontinental, instalada no interior da microplaca Ibérica, tendo suportado movimento transcorrente dextro estimado em mais de 100 km (Ribeiro et al., 1980).

Com o relaxamento das tensões orogénicas, pós-D₃ Varisca, a cadeia entra em colapso gravítico, induzindo distensão normal ao eixo da cadeia que, no caso vertente, é sub-paralelo ao lineamento em análise. O presente regime distensivo facilita o ascenso e implantação, em níveis altos da crosta, do maciço granítico de Lavadores. Em simultâneo, a fase de deformação frágil, D₄ Varisca, com tensão máxima próximo de N-S, reactiva o lineamento com movimento transcorrente dextro, compatível com esta compressão, gerando um sistema próprio de fracturas frágeis T, R / R', que passam a afectar o granito de Lavadores (Fig. 3).

Na orogenia Alpina, sucede-se a retoma das fracturas pré e pós-instalação do granito de Lavadores. A compressão Pirenaica, NNE-SSW, torna mais abertas as fendas de tracção (T), de direcção N-S, e induz maior fragilidade nas fendas dos sistemas Riedel (R / R'), geradas na D₄ Varisca. A compressão Bética, NNW-SSE, mercê

da situação privilegiada relativamente às fendas de tracção (T), retoma-as com movimento frágil, transcorrente, sinistrogiro. Dada a convergência de factores, ora sumariados, o sistema de fendas N-S e o conjugado NW-SE (lineamento de Porto-Tomar) tornam-se os sistemas que admitem maior quantidade de movimento no decurso da orogenia Alpina.

Nestas circunstâncias, o sistema N-S, tratando-se de um sistema originalmente tractivo e posteriormente transcorrente, exhibe relativo esmagamento e arenização dos bordos das fracturas, é penetrativo à escala macroscópica e tem significado de falha regional na área de exploração, condicionando o desmonte e facilitando a circulação do fluxo hídrico.

Quanto ao lineamento, localmente designado por falha da Madalena, a sua maior incisão situa-se cerca de 250 m a W da pedreira. Pese embora, o significado regional desta estrutura de falha, tem reflexos secundários na área de exploração, porquanto, os sistemas frágeis, ligados à cinemática do lineamento nas fases Alpinas, são essencialmente fracturas e diaclases fechadas. No entanto, são elementos estruturais passíveis de canalizar o fluxo hídrico e concentrá-lo na estrutura maior de Porto-Tomar que, mercê da grande extensão geográfica e da intercepção de domínios profundas da crosta, constitui importante colector de recursos hídricos.

Bibliografia:

- CARVALHOSA, A. B. (1965) - Contribuição para o conhecimento geológico da região entre Portel e Ficalho (Alentejo). *Mem. Serv. Geol. Portugal* 11: 130 p.
- DIAS, G., LETERRIER, J., MENDES, A., SIMÕES, P. P. and BERTRAND, J. M., (1998) - U-Pb zircon and monazite geochronology of post-collisional Hercynian granitoids from the Central Iberian Zone (Northern Portugal). *Lithos* 45: 349-369.
- GAMOND, J.F., 1987 - Bridge structures as sense of displacement criteria in brittle fault rocks. *J. Struct. Geol* 9, (5/6): 609-620.
- MANIAR, P. D. and PICCOLI, P. M., 1989 - Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. of Am. Bull.*, 101: 635-643.
- PEACOCK, M. A., 1931 - Classification of igneous rocks. *Jour. Geology* 39: 54 - 67.
- PEARCE, J. A., HARRIS, N. B. W. and TINDLE, A. G. , 1984 - Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956-983.
- PETIT, J.P., 1987 - Criteria of the sense of movement on fault surfaces in brittle fault zones. *J. Struct. Geol.*, 9 (5/6), 597-608.
- RIBEIRO, A., 1988 - A tectónica Alpina em Portugal. *Geonovas* 10: 9-11, Lisboa.
- RIBEIRO, A., PEREIRA, E. e SEVERO, L., 1980 - Análise da deformação da zona de cisalhamento Porto-Tomar na transversal de Oliveira de Azeméis. *Com. Serv. Geol. de Portugal*, T 66: 3-9.
- TCHALENKO, J.S., 1970 - Similarities between shear zones of different magnitudes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81: 1625-1640.

Porto, FEUP – Maio de 2000

Eurico de Sousa Pereira
Prof. Associado

Henrique Sérgio Botelho de Miranda
Prof. Associado

Alexandre Júlio Machado Leite
Prof. Auxiliar