



Magmatismo Ordovícico e Varisco na Zona Centro Ibérica de Portugal: Evidências Isotópicas

Lower Ordovician and Variscan magmatism at the Central Iberian Zone of Portugal: Isotopic constraints

I.M.H.R. Antunes^{1*}, A.M.R. Neiva^{2*}, M.M.V.G. Silva^{3*}, F. Corfu⁴

¹ Instituto Politécnico de Castelo Branco, 6001-909 Castelo Branco, Portugal. imantunes@esa.ipcb.pt

^{2,3} Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, 3000-272 Coimbra, Portugal

* Centro de Geociências da Universidade de Coimbra

⁴ Departamento de Geologia, Universidade de Oslo, Noruega

Resumo

A deformação Varisca está na origem da maioria das rochas granitóides na Zona Centro Ibérica (ZCI). O magmatismo Ordovícico é raro na ZCI, tendo sido encontrados novos dados geocronológicos para rochas granitóides atribuindo-lhes uma implantação no Ordovícico Inferior. Na área de Oledo-Castelo Branco ocorrem dois plutões, contactando lateralmente de idades e características geoquímicas distintas. O plutão de Oledo é constituído por granodiorito biotítico, granodiorito biotítico≈moscovítico, granodiorito biotítico-moscovítico e o granito moscovítico-biotítico. Encraves tonalíticos e granodioríticos ocorrem nos dois primeiros granodioritos. Estas rochas têm uma idade de 479-480 Ma, do Ordovícico Inferior, obtida por U-Pb-Th em cristais de monazite (microsonda electrónica) e por U-Pb (ID-TIMS) em cristais de zircão e monazite. As relações estruturais, dados geoquímicos e isotópicos ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ϵNd_T e $\delta^{18}\text{O}$) obtidos para os três granodioritos e o granito, sugerem que se tratam de maciços graníticos com sincronismo de instalação, provenientes de fontes magmáticas distintas. O granodiorito biotítico e seus encraves são do tipo I, o granito é do tipo S e os outros granitóides são híbridos. No plutão de Castelo Branco, distinguem-se cinco granitóides, dispostos concêntricamente do núcleo para o bordo do plutão. As idades U-Pb-Th obtidas em monazite apresentam-se semelhantes entre si (297-303 Ma), enquanto que em cristais de zircão e monazite, por U-Pb foi obtida uma idade de implantação de $310 \pm 1\text{Ma}$, indicando instalação contemporânea. Os dados isotópicos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ϵNd_{310} e $\delta^{18}\text{O}$ destas pulsações magmáticas são característicos de granitos resultantes da anatexia crustal de rochas metassedimentares heterogêneas. O plutão de Castelo Branco apresenta um raro zonamento inverso.

Palavras chave: U-Pb-Th, U-Pb, $\delta^{18}\text{O}$, Rb-Sr, ϵNd_T

Abstract

At the Central Iberian Zone (CIZ) of the Iberian Massif, most of the granitic plutons are related to the last ductile deformation phase D3 of the Variscan orogeny. Ordovician magmatism is rare at Central Iberian Zone. Recent geochronological data indicate a Lower Ordovician emplacement ages for granitic rocks from Central Iberian Zone. At Oledo-Castelo Branco, there are two plutons in contact and showing different geochemical characteristics. The Oledo pluton consists of biotite granodiorite, biotite≈muscovite granodiorite, biotite-muscovite granodiorite and muscovite-biotite granite. The two first granodiorites contain microgranular enclaves. U-Pb-Th monazite ages (EPMA) and U-Pb ages (ID-TIMS) of zircon and monazite crystals indicate a Lower Ordovician age of 479-480 Ma for Oledo pluton. Structural relations, geochemical and isotopic data ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ϵNd_T and $\delta^{18}\text{O}$) of the three granodiorites and granite from Oledo pluton suggest that they are contemporaneous and associated with different magmatic sources. Microgranular enclaves and host biotite granodiorite are of I-type, granite is of S-type and the other granitic rocks are hybrid. Castelo Branco pluton contains five concentric granites from the rim to core of the pluton. U-Pb-Th (EPMA) monazite age is similar (297-303 Ma), while U-Pb (ID-TIMS) zircon and monazite age gives an implantation age of $310 \pm 1\text{Ma}$, indicating that they are contemporaneous granitic rocks. Isotopic magmatic values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ϵNd_{310} and $\delta^{18}\text{O}$ are characteristic of granites derived from crustal anatexis of heterogeneous metasedimentary rocks. Castelo Branco pluton is a rare reversely zoned pluton.

Keywords: U-Pb-Th, U-Pb, $\delta^{18}\text{O}$, Rb-Sr, ϵNd_T

Introdução

A região de Castelo Branco-Oledo está incluída na Zona Centro-Ibérica (ZCI) (Ferreira et al., 1987), no centro de Portugal. A maioria das rochas granitóides da ZCI são Variscas, estando associadas à fase de deformação D3 (e.g., Ferreira et al., 1987; Dias et al., 2002; Neiva e Gomes, 2001; Valle Aguado et al., 2005). O magmatismo Ordovícico na ZCI é pouco usual e recentemente têm sido encontrados novos resultados geocronológicos (e.g., Antunes, 2006; Neiva et al., 2009; Antunes et al., 2009).

As técnicas analíticas utilizadas na determinação da idade de implantação das rochas granitóides têm vindo a ser aperfeiçoadas ao longo do tempo, de modo a obter resultados mais precisos. O cálculo de idades em cristais de monazite, através da razão U-Pb-Th, obtida por microsonda electrónica, é uma técnica relativamente recente com particular importância na determinação da idade de episódios magmáticos (Montel et al., 1996). A menor precisão e sensibilidade que apresenta é considerada como a primeira e imediata informação relativa à idade da rocha. A datação por U-Pb em cristais de zircão e monazite por ID-TIMS (Isotope Dilution Thermal Ionization Mass Spectrometry) é mais exacta e precisa, sendo cada vez mais utilizada. Com esta técnica são obtidas três idades para cada uma das fracções de zircão e monazite analisadas, a partir do decaimento do U ($^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ e $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$). A determinação destas idades permite identificar importantes episódios geológicos, constituindo uma componente fundamental no estudo da evolução dos processos orogénicos e da crosta.

As razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ϵNd_T e $\delta^{18}\text{O}$ de um magma são características da fonte de onde foi extraído, transmitindo importantes indicações quanto à origem e condições de formação; pelo que constituem bons indicadores petrogenéticos. Estes dados isotópicos, conjuntamente com outras informações geoquímicas e petrológicas, fornecem importantes indicações na identificação e caracterização de fenómenos magmáticos.

O objectivo deste trabalho é apresentar os plutões de Oledo e de Castelo Branco, com idades distintas que contactam lateralmente. Para cada plutão serão apresentados e interpretados os resultados de geoquímica isotópica que serviram de apoio para a definição de modelos petrogenéticos e génese dos protólitos de origem. O plutão de Oledo contém encraves microgranulares que foram igualmente estudados e interpretados, de modo a estabelecer as relações petrogenéticas com o hospedeiro e o seu relevante contributo na génese do granitóides hospedeiros. O plutão de Castelo Branco é constituído por rochas granitóides peraluminosas, dispostas numa estrutura zonada concêntrica, com zonamento inverso.

Enquadramento geológico

Os plutões de Oledo e Castelo Branco intruíram o Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) de idade Câmbria, com alternância de metapelitos e metagrauvaques e intercalações de metaconglomerados e mármore associadas (Fig. 1). O plutão de Oledo é dominado pelo granodiorito de grão médio biotítico (GrdA), com variações locais de granulometria e de tonalidade e está deformado (Fig. 1). É rodeado parcialmente pelo granodiorito de grão médio, porfiróide, biotítico-moscovítico (GrdB), com o qual contacta bruscamente (Fig. 1). Neste granodiorito, os fenocristais de plagioclase e feldspato potássico, localmente orientados e com os bordos rodados, revelam deformação. O granodiorito de grão médio com biotite≈moscovite (GrdC) ocorre sob a forma de uma lenticula, intruindo, de modo brusco, o granodiorito biotítico (GrdA), revelando um menor grau de deformação (Fig. 1).

Os granodioritos GrdA e GrdC contêm numerosos encraves tonalíticos e granodioríticos, de morfologia e tamanhos variados, com forma arredondada a irregular, rectangulares ou fusiformes, de dimensão inferior a 1 m, com contactos nítidos e margens arrepiadas, mas outros lobados e difusos com o hospedeiro (Antunes, 2006; Antunes et al., 2009). O granito de grão grosseiro moscovítico-biotítico (GrD) é a rocha granítica mais abundante, contacta com o granodiorito GrdA através de um contacto brusco e bem definido, enquanto que o contacto raro com o granodiorito GrdB é brusco ou por falha e no bordo inferior está delimitado pelos depósitos arcósicos (Fig. 1). Este granito apresenta variações na sua granulometria, com predomínio das zonas de grão grosseiro, mas localmente passando a um grão médio a fino, e tem o menor grau de deformação. O plutão de Oledo é penetrado e rodeado parcialmente pelo plutão Varisco de Castelo Branco.

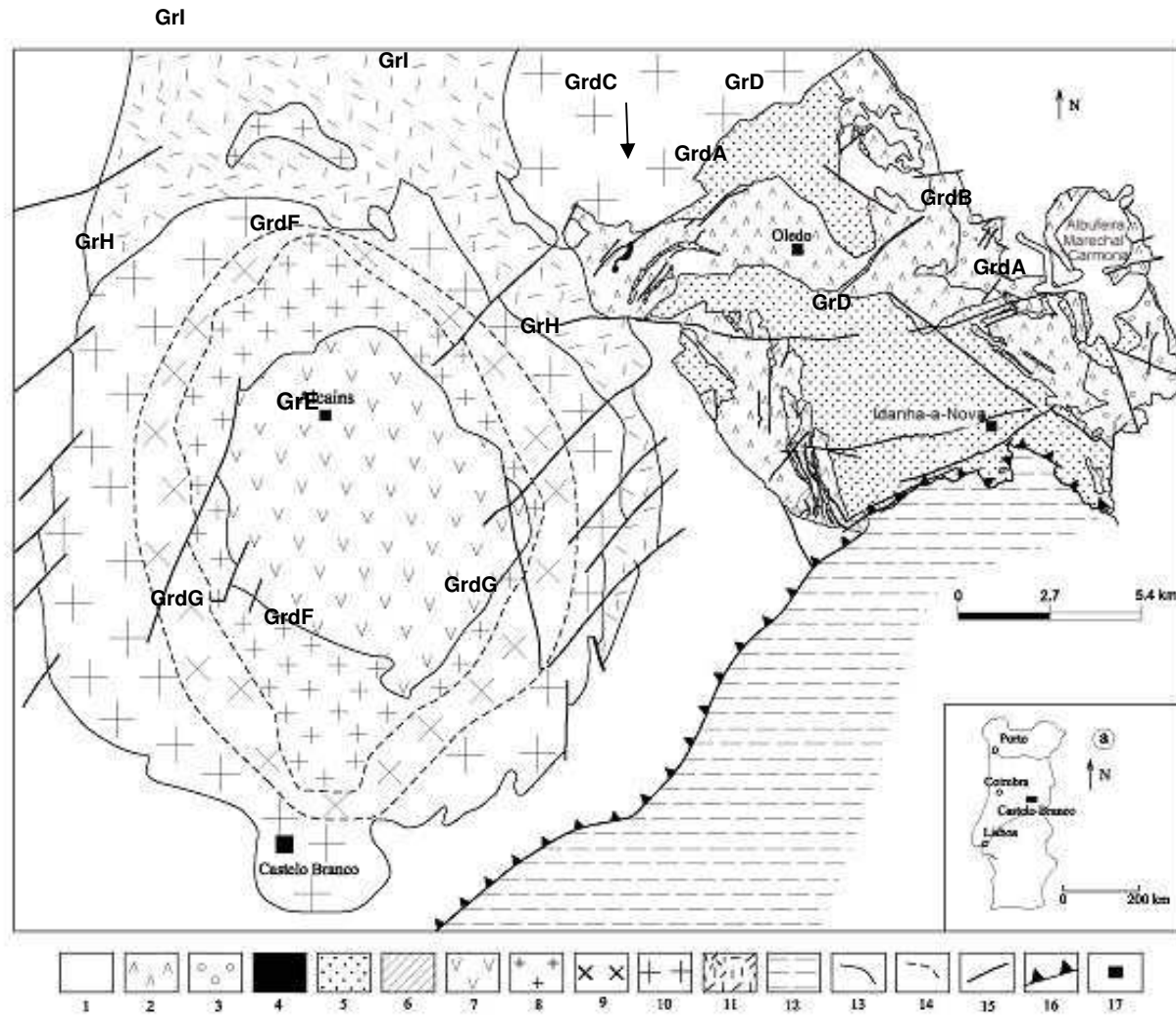


Fig. 1 – a) Localização geográfica da área de Oledo-Castelo Branco, b) carta geológica simplificada dos plutões de Oledo e de Castelo Branco (adaptada de Antunes, 2006). 1. Complexo Xisto-Grauváquico (CXG); 2. granodiorito biotítico (GrdA) 3. granodiorito biotítico-moscovítico (GrdB); 4. Granodiorito com biotite=moscovite (GrdC); 5. granito moscovítico-biotítico (GrD); 6. filões aplíticos e aplito-pegmatíticos; 7. granito moscovítico-biotítico (GrE); 8. granodiorito biotítico-moscovítico (GrdF); 9. granodiorito porfiróide biotítico-moscovítico (GrdG); 10. granito com biotite=moscovite (GrH); 11. granito moscovítico-biotítico (GrI); 12. arcoses da Beira Baixa; 13. limite geológico; 14. limite geológico provável; 15. falhas; 16. carreamento; 17. Povoações.

O plutão de Castelo Branco é constituído por cinco granitóides dispostos concentricamente, que aflora ao longo de uma área com cerca de 390 km², sem deformação evidente. O núcleo do plutão é ocupado pelo granito de grão médio a fino, moscovítico-biotítico (GrE), e está rodeado pelo granodiorito de grão médio a fino, levemente porfiróide, biotítico-muscovítico (GrdF). Este granodiorito passa gradualmente ao granodiorito de grão médio a grosseiro, porfiróide, biotítico-muscovítico (GrdG) e este passa para o granito de grão médio a grosseiro, porfiróide, com biotite=muscovite (GrH). O granito de grão grosseiro, muscovítico-biotítico (GrI), ocorre na bordadura N e NE do plutão, sendo as partes S e W ocupadas pelo granito GrH (Fig. 1). O contacto entre o granito GrE e o granodiorito GrdF é brusco, enquanto que a transição entre os granitos GrI e GrH é apenas identificada pontualmente, pois estão bastante alterados na zona de contacto (Antunes et al., 2008). A zona este e o extremo inferior da área é ocupada por conglomerados arcóscicos do Cabeço do Infante (Beira-Baixa) (Fig. 1).

Metodologia analítica

No plutão de Oledo e de Castelo Branco foram obtidos diferentes dados isotópicos com recurso a técnicas precisas. Os resultados obtidos permitirão indicar a idade de implantação de cada um dos plutões, bem como, a obtenção de informações dos protólitos de origem e relações petrogenéticas que justifiquem a distribuição espacial destas rochas granitóides.

Os cristais de monazite das rochas granitóides dos plutões de Oledo e de Castelo Branco e encaves microgranulares de Oledo foram analisados e determinadas as suas idades por microsonda electrónica. A idade de monazite é obtida através da razão U-Pb-Th, quantificada a partir dos teores de U, Pb e Th obtidos por microsonda electrónica. A idade obtida terá validade se, no momento de cristalização, o Pb for praticamente inexistente e não ocorreram perdas de Pb, Th e U. As quantidades de U-Pb-Th dos cristais de monazite das rochas granitóides de Oledo e de Castelo Branco e respectivas idades foram obtidas utilizando uma microsonda Cameca Sx100, no Laboratoire Magmas et Volcans da Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand (France). As condições analíticas incluíram um potencial de aceleração de 15 kV e uma corrente de emissão de 150 nA. Os padrões utilizados foram os seguintes: UO₂ (U M α), ThO₂ (Th M α), apatite (Ca K α , P K α), zircão (Si K α) e fosfatos polissintéticos (Y L α , La L α , Ce L α , Pr L α , Nd L α , Sm L α , Gd L α). As quantidades de U, Pb e Th obtidas para cada cristal são tratadas estatisticamente seguindo a metodologia de Montel et al. (1996) que permite obter a idade da população estudada e a validação dos resultados é obtida através da média do somatório dos desvios quadrados (MSWD).

Para o estudo geocronológico por U-Pb em cristais de zircão e monazite das rochas granitóides destes plutões foram desenvolvidos diversos procedimentos laboratoriais até à obtenção dos concentrados de zircão e monazite. As amostras foram sujeitas a processos de moagem, crivagem, separação magnética e separação através de líquidos densos sendo obtidas diversas populações de cristais de zircão e monazite. As razões isotópicas U-Pb de populações representativas de zircão e monazite previamente seleccionadas foram obtidas por espectrometria de massa de ionização termal, com um espectrómetro Finnigan Mat 62, no Department of Geosciences of Oslo University (Noruega), seguindo a metodologia de Krogh (1973), com as adaptações de Corfu (2004).

As análises isotópicas de Sr e Nd em amostras representativas seleccionadas das rochas granitóides dos plutões de Oledo e Castelo Branco foram obtidas por espectrometria de massa de ionização termal (TIMS), com um espectrómetro Finnigan Mat 262, após separação por cromatografia, com colunas de resinas extractivas de troca iónica, no Centro de Instrumentación Científica da Universidad de Granada (Spain). Para os valores de normalização foram utilizadas as razões $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr} = 0.1194$ e $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ e os valores do padrão branco foram de 0.6 e 0.09 ng para o Sr e Nd, respectivamente. Os valores obtidos para os padrões durante as medidas isotópicas são $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710252 \pm 0.000021$ (2σ) para NBS 987 e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511844 \pm 0.000010$ (2σ) para La Jolla. As razões isotópicas $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ e $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ foram determinadas por ICP-MS utilizando a metodologia de Montero e Bea (1998), com precisão melhor do que $\pm 1.2\%$ e $\pm 0.9\%$ (2σ), respectivamente.

Os resultados isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ das amostras seleccionadas dos plutões de Oledo e de Castelo Branco foram obtidos no Department of Earth Sciences of Western Ontario University (Canadá), utilizando a linha de extracção convencional e trifluoreto de cloro como reagente.

Esta metodologia tem uma precisão de $\pm 0.2 \%$ e como padrões foram utilizados o quartzo e CO_2 de laboratório.

1) Plutão de Oledo

Os resultados obtidos, por microsonda electrónica, em cristais de monazites de amostras representativas das rochas granitóides e encraves microgranulares do plutão de Oledo (Fig. 2a) e respectivas idades resultantes das razões de U-Th-Pb são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Idades U-Pb-Th obtidas por microsonda electrónica, para as monazites das rochas granitóides do plutão de Oledo

	Idade (Ma)	MSWD	N
Encraves tonalíticos no GrdA	473 \pm 8 Ma	3.6	24
Encraves granodioríticos no GrdA	470 \pm 7 Ma	0.4	22
GrdA	482 \pm 7 Ma	2.8	23
GrdB	482 \pm 6 Ma	1.5	26
Encraves tonalíticos no GrdC	468 \pm 7 Ma	2.6	14
Encraves granodioríticos no GrdC	474 \pm 21 Ma	10.4	6
GrdC	473 \pm 6 Ma	22.0	17
GrD	479 \pm 6 Ma	1.7	23

GrdA - granodiorito biotítico; GrdB - granodiorito biotítico-moscovítico; GrdC - granodiorito com biotite+muscovite; GrD - granito moscovítico-biotítico. N - número de análises.

Os granodioritos GrdA e GrdC e o granito GrD apresentam uma idade de implantação entre 479-480 Ma, obtida em zircão e monazite por ID-TIMS (Fig. 2b, c, d), sugerindo uma cristalização rápida para as várias fases deste plutão (Antunes, 2006; Antunes et al., 2009). Portanto, considerando os erros, as idades obtidas para monazite por microsonda electrónica aproximam-se das obtidas por ID-TIMS para zircão e monazite. Estes valores de idades são semelhantes aos obtidos em outras rochas granitóides da ZCI (e.g., Valverde-Vaquero e Dunning, 2000; Neiva et al., 2009)

As razões isotópicas iniciais de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e ϵNd_T foram calculadas, com base em 480 Ma, para os encraves microgranulares, granodiorito GrdA hospedeiro e granodiorito GrdB e de 479 Ma para os encraves microgranulares, granodiorito GrdC hospedeiro e granito GrD. Os encraves microgranulares apresentam as composições isotópicas mais primitivas com ϵNd_T variando desde +3.5 a +2.3, mas que não se correlacionam com os valores de $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.704 a 0.709) (Fig. 3). Os valores de ϵNd_T obtidos para os granodioritos e granitos são inferiores aos dos encraves microgranulares, variando entre + 1.5 em GrdA a - 0.5 em GrdB, + 0.5 para GrdC e entre - 1.5 a - 2.0 em GrD. Os menores valores de $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ foram obtidos em GrdA e GrdB, cerca de 0.705, sendo mais elevados em GrdC (0.709) e em GrD (0.710 - 0.718).

Os valores mais baixos de isotópos de oxigénio, $\delta^{18}\text{O}$, ocorrem nos encraves tonalíticos de GrdA ($\delta^{18}\text{O}=6.0\text{-}7.3\%$) e aumentam progressivamente para os encraves granodioríticos ($\delta^{18}\text{O}=7.0\text{-}7.8\%$), GrdA hospedeiro ($\delta^{18}\text{O}=7.9\text{-}8.9\%$), GrdB ($\delta^{18}\text{O}=9.9\text{-}10.2\%$), encraves tonalíticos de GrdC ($\delta^{18}\text{O}=8.5\%$), encraves granodioríticos ($\delta^{18}\text{O}=8.4\text{-}9.9\%$), GrdC hospedeiro ($\delta^{18}\text{O}=10.1\text{-}10.2\%$) e GrD ($\delta^{18}\text{O}=12.9\text{-}13.3\%$) (Antunes, 2006; Antunes et al., 2009).

As razões isotópicas dos encraves microgranulares e granodiorito GrdA hospedeiro ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ϵNd_T e $\delta^{18}\text{O}$) são características de granitos do tipo I. Estas rochas estarão relacionadas por um processo de cristalização fraccionada (Antunes et al., 2009). Contudo, as variações isotópicas encontradas para os encraves microgranulares e GrdA hospedeiro (Fig. 3 e $\delta^{18}\text{O}$) poderão estar associadas à deformação que apresentam (Antunes et al., 2009). Para o granodiorito GrdB, a razão isotópica $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{480}=0.7057\pm 0.0020$ sugere tratar-se de uma rocha do tipo I, enquanto que o valor de $\epsilon\text{Nd}_{480}=-0.45$ (Fig. 3) é característico de uma rocha de origem crustal e os de $\delta^{18}\text{O}$ (9.91 - 10.21‰) situam-se entre os característicos para granitos do tipo I e S. O

granodiorito GrdB será uma rocha híbrida resultante da mistura de magmas com contribuições metassedimentar e mantélica (Antunes et al., 2009).

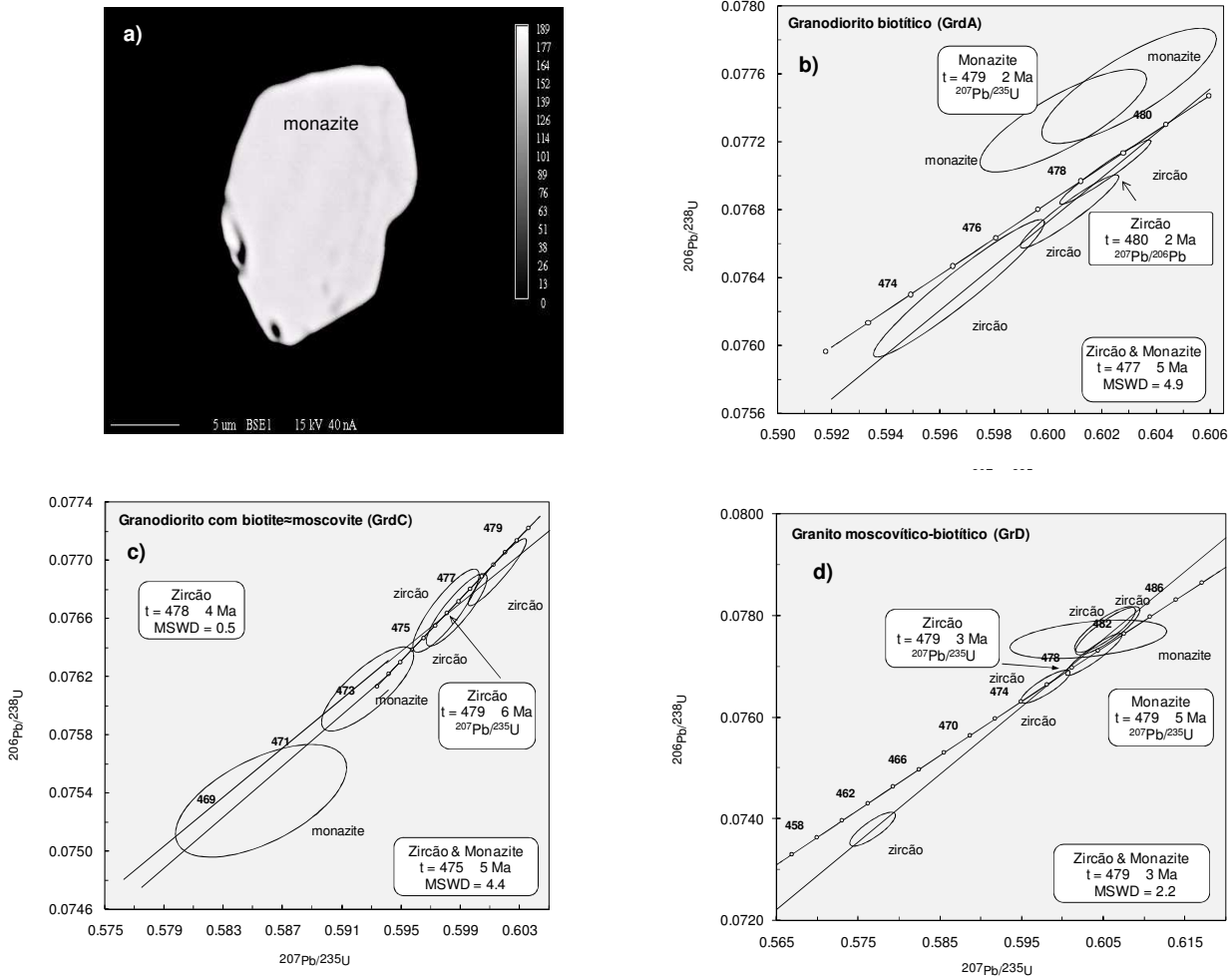


Fig. 2 – a) Cristal de monazite das rochas granitóides do plutão de Oledo, Diagramas concordância para as fracções de zircão e monazite do plutão de Oledo: b) granodiorito GrdA; c) granodiorito GrdC; d) granito GrD.

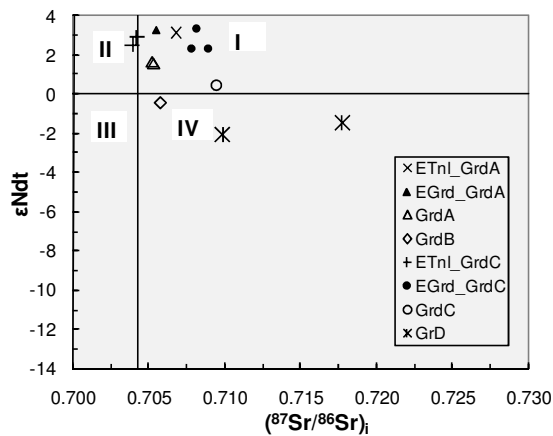


Fig. 3 – Projecção de $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ versus ϵNd_T para as rochas granitóides do plutão de Oledo. Encraves no granodiorito biotítico GrdA: tonalíticos (Etnl_GrdA), granodioríticos (EGrd_GrdA); encraves no granodiorito com biotite=moscovite GrdC: tonalíticos (Etnl_GrdC), granodioríticos (EGrd_GrdC).

Os valores médios de $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{479}$, ϵNd_{479} e $\delta^{18}\text{O}$ para os encraves tonalíticos ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7042$; $\epsilon\text{Nd}_{479}=2.90$; $\delta^{18}\text{O}=8.50\text{‰}$), encraves granodioríticos ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7039$ - 0.7088 ; $\epsilon\text{Nd}_{479}=2.31$ - 3.36 ; $\delta^{18}\text{O}=9.11\text{‰}$) e granodiorito GrdC hospedeiro ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7094$; $\epsilon\text{Nd}_{479}=0.46$; $\delta^{18}\text{O}=10.1$ - 10.2‰) sugerem uma mistura de magmas com contribuições mantélica e crustal para estas rochas. A modelização de elementos maiores e menores confirma que o granodiorito GrdC é uma rocha crustal contaminada recebendo contribuição mantélica e os encraves granodioríticos são também rochas híbridas, enquanto que os encraves tonalíticos correspondem a uma pulsação magmática distinta (Antunes, 2006; Antunes et al., 2009). O granito GrD é um granito do tipo S, correspondente à última pulsação magmática independente e com razões isotópicas mais evoluídas ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{479}=0.7143\pm 0.0018$; $\epsilon\text{Nd}_{479}=-1.73$; $\delta^{18}\text{O}=12.95$ - 13.29‰).

2) Plutão de Castelo Branco

As monazites dos granitos GrE e GrI e dos granodioritos GrdF, GrdG e GrdH indicam uma idade de implantação para estas rochas compreendida entre 301 - 303 Ma, obtida através da razão U-Pb-Th, por microsonda electrónica (Fig. 4a; Tabela 2). A idade U-Pb-Th obtida para as monazites do granito GrH tende a ser mais recente, sendo de 297 ± 3 Ma (Tabela 2). Contudo, pode referir-se que a idade obtida para as cinco rochas granitoides é semelhante entre si e inclui-se no intervalo de variação do erro analítico (Tabela 2).

Tabela 2 - Idades U-Pb-Th obtidas por microsonda electrónica, para as monazites das rochas granitoides do plutão de Castelo Branco

	Idade (Ma)	MSWD	N
GrE	303 ± 3 Ma	9	31
GrdF	301 ± 4 Ma	2	38
GrdG	301 ± 4 Ma	3	32
GrH	297 ± 3 Ma	35	45
GrI	301 ± 3 Ma	14	49

GrE - granito moscovítico-biotítico; GrdF - granodiorito porfiróide biotítico-moscovítico; GrdG - granodiorito porfiróide biotítico-moscovítico; GrH - granito com biotite≈moscovite; GrI - granito moscovítico-biotítico. N - número de análises.

Nos granitos GrH e GrI obtiveram-se os erros (MSWD) mais elevados devido ao número considerável de análises e à dispersão que apresentam. Estas variações podem ser justificadas tanto pelas incertezas desta metodologia, bem como pela possível ocorrência de fenómenos geológicos responsáveis pela presença de algum Pb inicial ou a processos de alteração.

Para a datação de cristais de zircão e monazite por U-Pb (ID-TIMS) das rochas granitoides do plutão de Castelo Branco, foi seleccionada uma amostra representativa dos granito GrE, granodiorito GrdF e granito GrI. Para os granodioritos GrdG e GrdH não foram determinadas estas razões isotópicas, pois as relações de campo que apresentam e as suas características geoquímicas sugerem que estão relacionados, por um processo de cristalização fraccionada, com o granodiorito GrdF (Antunes et al., 2008). A projecção das análises de zircão do granito GrE, no diagrama $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ mostra que das três fracções de zircão analisadas, duas são discordantes (Fig. 4b). O alinhamento das fracções de zircão define uma discórdia inversa, atribuindo uma idade mínima de implantação de 309.9 ± 1.1 Ma, com um valor MSWD = 1.11 (Fig. 4b). Esta discórdia inversa pode ser interpretada como o resultado da existência de algum Pb herdado, relacionado com um excesso de ^{230}Th inicial (Schärer, 1984; Kalt et al., 2000), pela possível presença de núcleos herdados ou pela adição de distúrbios isotópicos no sistema (Corfu, 2004). O cristal de zircão mais concordante apresenta uma idade $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, de 309.9 ± 1 Ma, com uma discordância de 1.1%. Os dois cristais de monazite são inversamente discordantes, o que pode ser atribuído ao desequilíbrio associado aos fenómenos geológicos Paleozóicos, pelo que a idade das monazites a considerar deve ser a obtida através

da razão $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (309.5 ± 0.9 Ma), uma vez que esta não é afectada (Fig. 4b). A associação das fracções zircão + monazite define um fraco alinhamento (MSWD = 11.0), para uma idade de 310 ± 1 Ma, sendo semelhante à obtida pela curva da concórdia para o zircão e a idade média resultante da projecção destes dois minerais é igual a 310 ± 1 Ma (Fig. 5b).

Os dados isotópicos para os cristais de zircão do granodiorito GrdF projectam-se próximo da concórdia (Fig. 4c), mas um dos cristais de zircão afasta-se da curva devido à presença de núcleos restíticos e alguma perda de Pb, pelo que deve ser considerada a idade de 310.1 ± 0.8 Ma obtida na fracção de zircão mais concordante (Fig. 4c). A projecção da fracção de monazite situa-se ligeiramente acima da concórdia e dá uma idade de 310.6 ± 1.5 Ma, obtida através da razão $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$. Deste modo, para o granodiorito GrdF, a idade mais correcta a considerar será a média das idades obtidas para o zircão e a monazite, igual a 310 ± 1 Ma (Fig. 4c).

No granito GrI, as quatro fracções de zircão analisadas projectam-se próximo da curva da concórdia sendo três concordantes e uma delas discordante (Fig. 4d). A discórdia para os quatro pontos define uma intersecção inferior de 309.1 ± 0.6 Ma e uma idade de intersecção superior de 1000 Ma. A idade de 309.1 ± 0.6 Ma é semelhante à obtida para um dos cristais de monazite. Os zircões concordantes indicam uma idade de 309.7 ± 0.4 Ma. Os cristais de monazite, por sua vez, tendem a afastar-se da curva da concórdia, projectando-se acima desta numa posição discordante. Para o cristal de monazite mais concordante foi obtida uma idade $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ de 309.7 ± 0.4 Ma, idêntica à obtida pelos três zircões concordantes (Fig. 4d). As idades U-Pb-Th das monazites são um pouco inferiores às idades U-Pb das monazites e zircões (Tabela 2; Fig. 4b, c, d). Considerando o conjunto dos resultados obtidos através da metodologia U-Pb em cristais de zircão e monazite do plutão de Castelo Branco, e tendo em consideração as incertezas associadas aos valores das idades, é possível definir a idade de 310 Ma como a de implantação destas rochas granitóides, e afirmar que se tratam de maciços graníticos com sincronismo de instalação.

Considerando a idade média de U-Pb obtida por U-Pb em cristais de zircão e monazite (310 Ma), foram calculados os valores médios das razões isotópicas $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{310}$ e ϵNd_{310} (Fig. 5). Estas razões isotópicas e os valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ (GrE=13.53‰; GrdF=12.27‰; GrdG=12.50‰; GrH=12.75‰; GrI=12.91‰) são característicos de granitos resultantes da anatexia crustal de rochas metassedimentares.

A modelização de elementos maiores e menores das rochas comprovam que o granodiorito GrdG e o granito GrH resultam do magma granodiorítico GrdF por cristalização fraccionada de plagioclase, quartzo, biotite e ilmenite (Antunes et al., 2008).

As três rochas graníticas GrE, GrdF e GrI apresentam distintos valores de $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{310}$, ϵNd_{310} (Fig. 5) e $\delta^{18}\text{O}$, correspondentes a três pulsações magmáticas distintas, face a heterogeneidade da rocha regional pelítica regional do Paleozóico Inferior. As variações em $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{310}$ e ϵNd_{310} na sequência de diferenciação magmática GrdF, GrdG e GrH não são muito grandes (Fig. 5). Contudo, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ aumentam de 12.27 ‰ no granodiorito GrdF para 12.75 ‰ no granito GrH, o que é devido ao processo de cristalização fraccionada.

O granito moscovítico-biotítico GrE, o mais antigo, intruiu no núcleo do plutão, sendo seguido por uma pulsação do magma granodiorítico GrdF, o qual se diferenciou e originou o granodiorito biotítico-moscovítico GrdG e o granito com biotite=moscovite GrH para o exterior. O granito moscovítico-biotítico GrI que ocorre na parte mais externa do plutão (Fig. 1), resultou de uma outra pulsação magmática distinta. O plutão de Castelo Branco é inversamente zonado, o que é raro, possuindo um bordo mais félsico e um núcleo mais máfico (e.g., Allen, 1992; Barbey et al., 2001; Antunes et al., 2008).

Conclusões

1. O plutão de Oledo é constituído por rochas granitóides com encaves microgranulares tonalíticos e granodioríticos associados, deformados, contactando na extremidade oeste com o plutão de Castelo Branco.

2. Os dados estruturais, a geoquímica dos granitóides e a idade de 479 – 480 Ma obtida por U-Pb (ID-TIMS) em zircões e monazites das rochas granitóides do plutão de Oledo indicam que há pulsações magmáticas independentes com sincronismo de instalação, de idade Ordovícica inferior. As idades obtidas em monazites pelo método U-Th-Pb (microsonda electrónica) são idênticas.

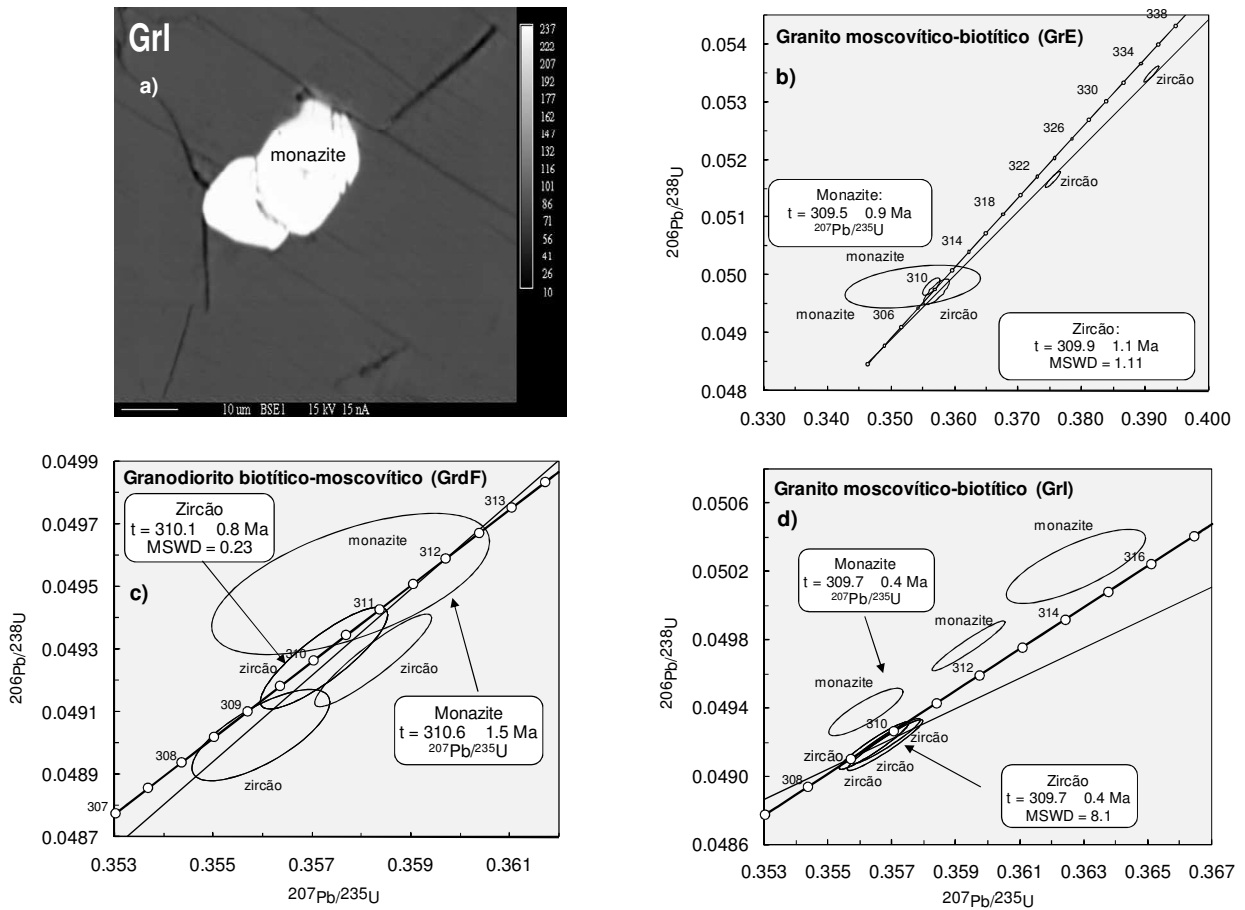


Fig. 4 – a) Cristais de monazite das rochas granitóides do plutão de Castelo Branco; Diagramas concórdia para as fracções de zircão e monazite do plutão de Castelo Branco: b) granito GrE; c) granodiorito GrdF; d) granito GrI.

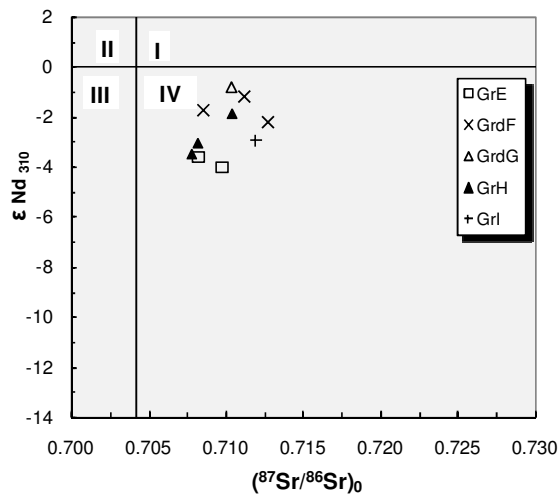


Fig. 5 – Projecção de $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{310}$ versus ϵNd_{310} para as rochas granitóides do plutão de Castelo Branco.

3. Os resultados isotópicos obtidos para os encraves microgranulares e granodiorito biotítico hospedeiro sugerem que se tratam de granitos do tipo I e as variações irregulares encontradas estão directamente associadas com a deformação que apresentam. Para o granodiorito

biotítico-moscovítico, indicam corresponder a uma rocha híbrida. Os enclaves tonalíticos que ocorrem no granodiorito biotítico≈moscovítico apresentam uma assinatura mantélica, enquanto que os enclaves granodioríticos e o granodiorito biotítico≈moscovítico hospedeiro correspondem a rochas crustais com contaminação mantélica. O granito moscovítico-biotítico é o mais evoluído e é do tipo S.

4. As cinco rochas graníticas do plutão de Castelo Branco correspondem a três pulsações magmáticas contemporâneas com 310 ± 1 Ma, idade U-Pb (ID-TIMS) obtida para zircão e monazite. As datações obtidas através da razão U-Pb-Th (microsonda electrónica) em monazites são ligeiramente inferiores, mas com resultados coerentes e consistentes.

5. Os resultados isotópicos indicam que se tratam de granitos do tipo S, resultantes da fusão parcial de materiais metassedimentares heterogéneos. O granodiorito biotítico-moscovítico (GrdG) e o granito de duas micas (GrH) resultaram do magma granodiorítico biotítico (GrdF) por um processo de cristalização fraccionada de plagioclase, quartzo, biotite e ilmenite.

6. O plutão de Castelo Branco apresenta um raro zonamento inverso, sendo o primeiro conhecido em Portugal.

Referências

- Allen, C.M., 1992. A nested diapir model for the reversely zoned Turtle Pluton, southeastern California. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences* 83, 179-190.
- Antunes, I.M.H.R., 2006. Mineralogia, petrologia e geoquímica de rochas granitóides da área de Castelo Branco-Idanha-a-Nova. Tese de doutoramento em Geologia, especialidade em mineralogia, petrologia e geoquímica (não publicado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 453 pp.
- Antunes, I.M.H.R., Neiva, A.M.R., Silva, M.M.V.G., Corfu, F., 2008. Geochemical and isotopic data on the granitic-granodioritic, concentrically zoned Castelo Branco pluton (central Portugal). *Lithos* 103, 445-465.
- Antunes, I.M.H.R., Neiva, A.M.R., Silva, M.M.V.G., Corfu, F., 2009. The genesis of I- type and S-type granitoid rocks of the Early Ordovician Oledo pluton, Central Iberian Zone (central Portugal). *Lithos* 111, 168-185.
- Barbey, P., Nachit, H., Pons, J., 2001. Magma-host interactions during differentiation and emplacement of a shallow-level, zoned granitic pluton (Tarçovate pluton, Morocco): implications for magma emplacement. *Lithos* 58, 125-143.
- Corfu, F., 2004. U-Pb geochronology of the Lekres group: an exotic Early Caledonian metasedimentary assemblage stranded on Lofoten basement, northern Norway. *J. Geol. Soc. London* 161, 619-627.
- Dias, G., Simões, P.P., Ferreira, N., Leterrier, J., 2002. Mantle and Crustal Sources in the Genesis of Late-Hercynian Granitoids (NW Portugal): Geochemical and Sr-Nd Isotopic Constraints. *Gondwana Research* 5(2), 287-305.
- Ferreira, N., Iglésias, M., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A., Ribeiro, M.L., 1987. Granitóides da zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: F. Bea, A. Carmina, J.C. Gonzalo, M.L. Plaza, J.M.L. Rodrigues (Eds.), *Geologia de los granitóides y rocas asociadas del Macizo Hespérico*. Libro Homenaje a L.C.G. Figueirola. Editorial Rueda, Madrid. 37-53.
- Kalt, T.A., Corfu, F., Wijbrans, J.R., 2000. Time calibration of a P-T path from a Variscan high-temperature low-pressure metamorphic complex (Bayerische Wald, Germany) and the detection of inherited monazite. *Contrib. Mineral. Petrol.* 138, 143-163.
- Krogh, T.E., 1973. A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination. *Geochim. Cosmochim. Acta* 37, 485- 494.
- Montel, J.M., Foret, S., Veschambre, M., Nicollet, C., Provost, A., 1996. Electron microprobe dating of monazite. *Chem. Geol.* 131, 37 - 53.
- Montero, P., Bea, F., 1998. Accurate determination of $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ and $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ by inductively coupled plasma mass spectrometry in isotope geoscience: an alternative to isotope dilution analysis. *Anal. Chim. Acta* 358, 227 - 233.
- Neiva, A.M.R., Williams, I.S., Ramos, J.M.F., Gomes, M.E.P., Silva, M.M.V.G., Antunes, I.M.H.R., 2009. Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of Early Ordovician granodiorite and Variscan two-mica granites from Gouveia area, central Portugal. *Lithos* 111, 186-202.
- Neiva, A.M.R., Gomes, M.E.P., 2001. Diferentes tipos de granitos e seus processos petrogenéticos: granitos hercínicos portugueses. *Memórias da Academia das Ciências de Lisboa* XXXIX, 53-95.
- Schärer, U., 1984. The effect of initial ^{230}Th disequilibrium on young U-Pb ages: the Makalu case, Himalaya. *Earth Planet. Sci. Lett.* 67, 191-204.
- Valle Aguado, B., Azevedo, M.R., Schaltegger, U., Martínez Catallán, J.R., Nolan, J., 2005. U-Pb zircon and monazite geochronology of Variscan magmatism related to syn-convergence extension in Central Northern Portugal. *Lithos* 82, 169-184.
- Valverde Vaquero, P., Dunning GR. 2000. New U-Pb ages for Early Ordovician magmatism in Central Spain. *Jour. Geol. Soc. London* 157, 15-26.