

U–Pb zircon and monazite geochronology of the Hercynian two-mica granite composite pluton of Cabeceiras de Basto (Northern Portugal)

Géochronologie U–Pb sur zircon et monazite du massif composite de granite à deux micas hercynien de Cabeceiras de Basto (Nord-Portugal)

Angela ALMEIDA¹, Jacques LETERRIER², Fernando NORONHA¹ et Jean-Michel BERTRAND³

¹ Centro de Geologia da Universidade do Porto, Praça Gomes Teixeira, 4050 Porto, Portugal

² Centre de recherches pétrographiques et géochimiques, B.P. 20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy cedex, France

³ Laboratoire de géodynamique des Chaînes alpines, université de Savoie, Campus scientifique, 73376 Le-Bourget-du-Lac cedex, France

ABSTRACT

The zircon and monazite U–Pb minimum age of the Hercynian peraluminous two-mica composite granite pluton of Cabeceiras de Basto (Northern Portugal) is 311 ± 1 Ma (2σ). This age, well constrained by a concordant monazite of 311 ± 4 Ma (2σ), is in good agreement with the age suggested for the synkinematic, syn-D3, Iberian granites of the Hercynian orogeny (315–305; Pinto et al., 1987). The $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ and ϵ_{Nd} isotopic ratios, calculated for 311 Ma, suggest that the three granite units which constitute the massif may derive from an heterogeneous crustal source dated (upper intercept of the discordia) around 1 200 Ma. © Académie des sciences / Elsevier, Paris.

Keywords: U–Pb geochronology, Zircon, Monazite, Mica peraluminous granites, Hercynian, North Portugal

RÉSUMÉ

L'âge minimum U–Pb sur zircon et monazite du massif composite hercynien peralumineux à deux micas de Cabeceiras de Basto (Nord-Portugal) est de 311 ± 1 Ma (2σ). Cet âge, parfaitement contrôlé par une monazite concordante à 311 ± 4 Ma (2σ), est en très bon accord avec l'âge suggéré pour les granites ibériques syntectoniques, syn-D3, de l'orogénèse hercynienne (315–305 Ma ; Pinto et al., 1987). Les rapports $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ et ϵ_{Nd} , calculés à 311 Ma, montrent que les trois unités granitiques constituant le massif dérivent d'une source crustale hétérogène dont l'âge (défini par l'intercept supérieur de la discordia) serait proche de 1 200 Ma. © Académie des sciences / Elsevier, Paris.

Mots clés : Géochronologie U–Pb, Zircon, Monazite, Granites peralumineux à deux micas, Hercynien, Nord Portugal

Version abrégée (voir p. 783)

Note présentée par Jean Dercourt.

Note remise le 13 octobre 1997, acceptée après révision le 30 mars 1998.

1. Introduction

The syn-orogenic granitoids of the Iberian Hercynian fold belt can be subdivided into three groups according to their relationship with the D3 tectonic phase, intra-Westphalian in age (Capdevila et al., 1973; Noronha, 1983; Priem and den Tex, 1984; Ferreira et al., 1987; Pinto et al., 1987): (1) pre-tectonic granodiorites (380–345 Ma); (2) syn- to late-tectonic calc-alkaline and peraluminous granitoids (330–305 Ma); (3) and post-tectonic granites (290–280 Ma). The events related to the D3 tectonic phase were marked by folding and shearing which controlled the granite emplacement (Noronha et al., 1981). Crustal thickening induced by these tectonic events associated with the influence of the underlying mantle have led to the generation of various anatectic crustal and hybrid granites (Ortega and Ibarguchi, 1990). The main purpose of the present study is to date precisely the syn-tectonic Cabeceiras de Basto granite massif and thus the D3 tectonic phase.

2. Geological setting

The Cabeceiras de Basto granitic massif is located close to the boundary between Minho and Trás-os-Montes provinces at about 70 km to the northeast of Oporto. Its emplacement occurred in the 'Central Iberian' geotectonic zone close to the contact with the 'Middle Galicia-Trás-os-Montes' domain (Julivert et al., 1974). The massif presents a NW–SE elongated shape parallel to the regional structure (figure 1). It intrudes Lower Silurian metasediments (mostly schists with subordinate quartzite and metavolcanic rocks) which were affected by three major Hercynian folding phases (Ramos et al., 1981; Noronha, 1982; 1983). Ferreira et al. (1987) have demonstrated that the pluton occupies the core of a N130°E antiform formed during the D3 Hercynian phase (Noronha et al., 1981) which corresponds to an age of 316–305 Ma (Harland et al., 1989). Thus, according to their geological and tectonic setting, the granites that constitute the complex belong to the group of syn-tectonic, syn-D3, granites proposed by

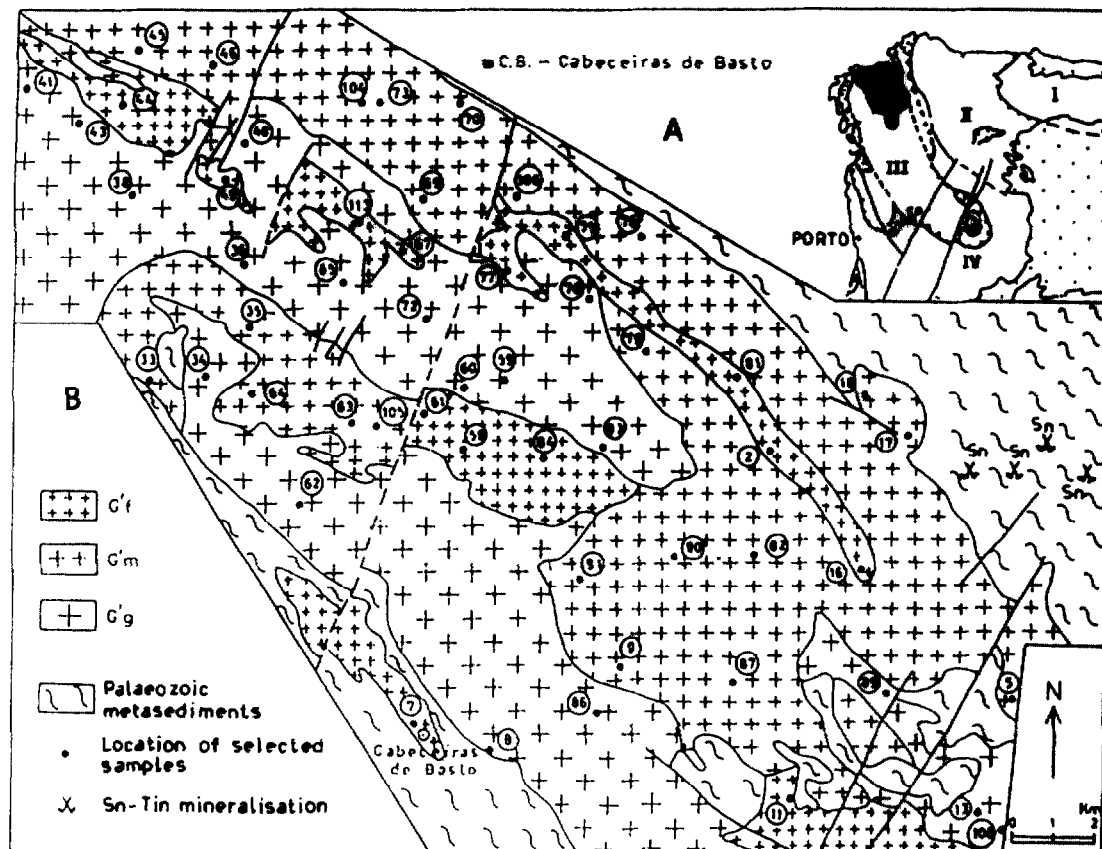


Figure 1. A. Geological framework of the North Iberian Hercynian belt (according to Julivert et al., 1974). I. Cantabrian Zone. II. West Asturian Leonese Zone. III. Middle Galicia, Trás-os-Montes Zone. IV. Central Iberian Zone. B. Simplified geological map of the Cabeceiras de Basto two-mica granite massif. G'f: fine-grained granites; G'm: medium-grained granites; G'g: coarse-grained granites. Location of the studied samples.

Esquisse géologique de la ceinture hercynienne nord-ibérique (selon Julivert et al., 1974). I. Zone cantabrique. II. Zone ouest-asturienne Léonienne. III. Zone de Galice moyenne, Trás-os-Montes. IV. Zone centro-ibérique. B. Carte géologique simplifiée du massif de granite à deux micas de Cabeceiras de Basto. G'f: granites à grain fin; G'm: granites à grain moyen; G'g: granites à gros grain. Localisation des échantillons étudiés.

Ferreira et al. (1987). Subsequently, the granitic complex was affected by late- to post-magmatic shear zones associated with significant hydrothermal alteration of the granites.

3. Petrography and geochemistry

The Cabeceiras pluton is composed of three main petrographic types of two-mica granites: fine-grained granites, G'f (grain size: 0.5–1 mm); a medium-grained homogeneous granite, G'm (grain size: 2–4 mm), and a coarse-grained locally porphyritic granite, G'g (grain size: 5–7 mm). Field observations show that the G'm and G'g granite series cross-cut the G'f type. However, no clear chronology can be defined for the emplacement of G'm and G'g as the contacts between these units are always transitional (Almeida, 1994; Almeida et al., 1995).

The three granite series present a hypidiomorphic granular texture and a similar mineral association of quartz, plagioclase (An1–An6), perthitic K-feldspar (orthoclase to microcline as anhedral crystals to euhedral megacrysts), biotite and muscovite. Apatite, monazite, zircon, ilmenite, rutile, rare sillimanite and tourmaline occur as accessory minerals. Most of the studied samples exhibit, to various extents, the effects of late- to post-magmatic hydrothermal processes involving essentially sericitization of plagioclase and/or muscovitization of biotite and albittization of K-feldspars. The geochemistry of the three granite types indicates an almost identical composition of peraluminous granites ($1.2 < A/KCN < 1.4$). However, they can be slightly distinguished according to the progressive decrease of the K/Na ratios from G'f (1.9–2.2) to G'm (1.4–1.6) to G'g (1.3–1.5), and the ranges of their REE (G'f: 71–284 ppm; G'm: 43–92 ppm; G'g: 39–126 ppm) and Zr (G'f: 74–195 ppm; G'm: 49–94 ppm; G'g: 46–88 ppm) contents (Almeida, 1994; Almeida et al., 1995).

4. U–Pb geochronology and Sr–Nd isotope geochemistry

U–Pb isotopic dating was carried out on three multigrain zircon fractions and one fraction of monazite from a sample of the fine-grained granite (6C 84). Five major steps were involved during the separation of the fractions: crushing of the sample, sieving to obtain zircon and monazite grains with sizes corresponding to the fraction between 0.032 and 0.090 mm, the use of heavy liquids, followed by electromagnetic separator (Frantz) and a final hand picking under the binocular. Three zircon fractions (< 1 mg and non-magnetic at 0° and 3.5 A) were selected according to their morphology and high degree of limpidity (lack of inclusions and of metamictisation). They consist of pale-pink elongated prisms and short grains. A preliminary typological study (Almeida, 1994) according to Pupin's method (1980) has allowed the identification of dominant L and S types in which the relative growth of the

prism {110} and pyramid {101} suggests crystallization conditions in accordance with those characteristic of the peraluminous granites (Pupin, 1980). SEM imagery show a very strong magmatic zoning overgrowing a well-contrasted core (figure 2). The monazite fraction is characterized by hypidiomorphic yellowish limpid grains whose SEM imagery shows a weak and nebulitic zonation (figure 2).

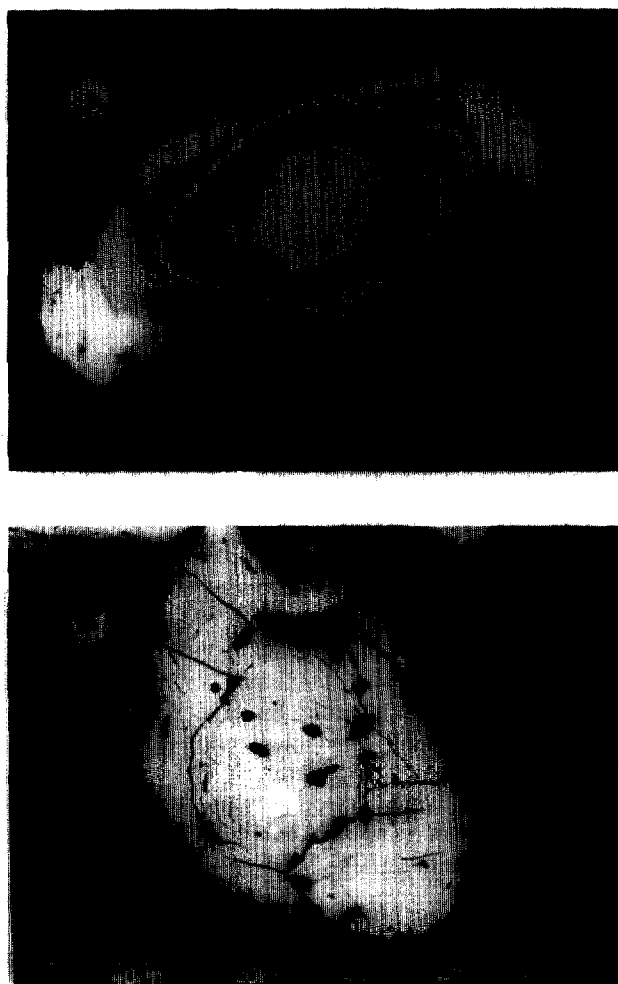


Figure 2. SEM imagery of Cabeceiras de Basto zircon and monazite (backscattered mode): a) short prismatic zircon with inherited core and complex magmatic zonation; b) rounded monazite with weak and nebulitic zonation.

Images MEB (électrons rétrodiffusés) de zircon et monazite du massif de granite à deux micas de Cabeceiras de Basto : a) zircon prismatique trapu à cœur relique hérité et fort zoning magmatique complexe ; b) monazite arrondie à zonation magmatique faible et nébulitique.

The zircon fractions were submitted to air-abrasion (Krogh, 1982) to eliminate the external zones of the crystals where Pb loss may have been present. Chemical preparation includes: HNO₃ 3N warm washing of the zircon and monazite fractions; HF digestion at 240 °C and HCl 3N dissolution of the fluorides at 180 °C in Teflon

Table I. U–Pb data on zircon and monazite for the two-micas granite from Cabeceiras de Basto. Abbreviations: mz. = monazite, zr. = zircon, euh. = euhedral, ndl. = needle, lpr. = long prismatic, spr. = short prismatic, abr. = abraded. Isotopic ratios are corrected for fractionation, blanks and initial common lead composition (Stacey and Kramers, 1975). Errors on isotopic ratios and ages are at 2 σ level.

Données isotopiques U–Pb sur zircon et monazite pour le granite à deux micas de Cabeceiras de Basto. Abréviations : mz. = monazite, zr. = zircon, euh. = automorphe, ndl. = aiguille, lpr. = prisme long, spr. = prisme court, abr. = abrasé. Les marges d'erreur tiennent compte du fractionnement de masse, des blancs et de la composition du plomb commun initial (Stacey et Kramers, 1975). Les erreurs sur les rapports isotopiques et les âges sont à 2 σ .

Sample (weight, mg)	Description	Concentrations		Isotopic ratios				Apparent ages		
		Pb*	U	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$
		(ppm)	(ppm)		(2 σ , %)	(2 σ , %)	(2 σ , %)	(Ma)	(Ma)	(Ma)
6C 84 1 (0.02)	mz. euh.	305.1	1 104.9	2 373	0.049421 (1.18)	0.358820 (1.44)	0.052658 (0.26)	311 $\pm$ 4	311 $\pm$ 4	314 $\pm$ 6
6C 84 2 (0.31)	zr. ndl.	49.8	692.8	1 563	0.069791 (0.38)	0.608908 (0.49)	0.063278 (0.13)	435 $\pm$ 2	483 $\pm$ 2	717 $\pm$ 5
6C 84 3 (0.29)	zr. lpr. abr.	42.8	690.8	1 124	0.059315 (0.44)	0.480020 (0.58)	0.058694 (0.15)	372 $\pm$ 2	398 $\pm$ 2	556 $\pm$ 4
6C 84 4 (0.07)	zr. spr. abr.	57.3	534.8	223	0.066563 (0.33)	0.569715 (0.97)	0.062076 (0.69)	415 $\pm$ 1	458 $\pm$ 4	676 $\pm$ 15

bomb (Parrish, 1987); separation of Pb and U by elution on anionic resin of two aliquots (one with addition of a mixed ^{208}Pb – ^{235}U spike) following Krogh (1973). Common lead blanks ranged between 30 and 80 pg during this study. Mass spectrometry was performed on a Finnigan Mat 262 for Pb and on a Cameca TSN 206 for U. The measured atomic ratios were corrected for blank, initial common lead compositions (Stacey and Kramers, 1975) and mass-fractionation (using NBS 983 standard). The analytical data and calculated ages with 2 σ errors are presented in table I.

Six samples were selected for Sr and three for Nd isotopic compositions. As a large fraction of REE is hosted by refractory accessory minerals in granitoid rocks, a Li-metaborate fluxing method was used instead of acid dissolution (Boher et al., 1992). The Rb–Sr and Sm–Nd separation techniques have been previously reported by

Michard et al. (1985). Element concentrations were determined using the isotope dilution method and isotopic ratios were measured using a Finnigan MAT 262 mass spectrometer. Chemistry blanks are of about 1.2 ng Sr and 2 ng Nd. The isotopic ratios were normalized to $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ and $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ respectively. Analytical data with 2 σ errors on isotopic ratios are presented in table II.

5. Discussion and conclusion

In the concordia diagram the analytical point of the monazite is almost concordant yielding equivalent $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ and $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ages of 311 $\pm$ 4 Ma (figure 3). The three zircon fractions are poorly aligned (MSWD = 9.9) and define a reverse discordia with a lower intercept at

Table II. Sr–Nd data for the three granite units from Cabeceiras de Basto massif. ϵ_{Nd} calculated using $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$ and $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ as CHUR parameters (Jacobsen and Wasserbourg, 1984). Errors on isotopic ratios are at 2 σ level.

Données isotopiques Sr–Nd pour les trois unités granitiques du massif de Cabeceiras de Basto. ϵ_{Nd} calculé en utilisant $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512638$ et $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,1967$ comme paramètres CHUR (Jacobsen et Wasserbourg, 1984). Les erreurs sur les rapports isotopiques sont à 2 σ .

Samples	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	ϵ_{Nd}
	(ppm)	(ppm)		(2 σ)	(ppm)	(ppm)		(2 σ)	(311 Ma)	(311 Ma)
G'f										
84	393	46.8	24.35	0.818929(29)	9.04	49.6	0.1103	0.512019(15)	0.7112	–8.66
113	389	44.1	25.58	0.823291(17)					0.7101	
G'm										
79	305	70.4	12.57	0.770855(17)					0.7152	
104	453	29.9	43.96	0.908799(30)	2.21	8.18	0.1636	0.512028(19)	0.7142	–10.60
G'g										
41	448	16.3	79.58	1.069947(21)					0.7177	
65	689	24.6	81.26	1.080161(41)	1.93	6.78	0.1724	0.511749(28)	0.7205	–16.40

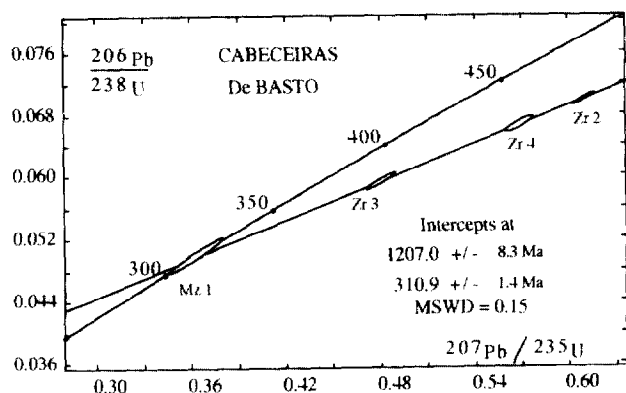


Figure 3. Concordia diagram: zircons and monazite from Cabeceiras de Basto two-mica granite massif.

Diagramme Concordia : zircons et monazite du massif de granite à deux micas de Cabeceiras de Basto.

311 ± 2 Ma and an upper intercept at 1 208 ± 9 Ma. According to the concordance between the monazite and the zircon lower intercept ages, all the analytical points define a very good discordia (MSWD = 0.15) with a lower intercept at 311 ± 1 Ma. This age is interpreted as the minimum emplacement age of the Cabeceiras massif and is in good agreement with the Westphalian age (305–316 Ma), previously suggested according to its geological and tectonic

setting (Noronha et al., 1981; Harland et al., 1989) as well as with Rb–Sr ages obtained in equivalent plutons, e.g. Arga (305 ± 6 Ma) and S. Pedro do Sul (315 ± 3 Ma) (Pinto et al., 1987).

The reverse discordia defined by the three U–Pb zircon analyses reveals the presence of an inherited Pb component of Proterozoic age (upper intercept at 1 207 ± 8 Ma), which is confirmed by the SEM observation of well-contrasted cores, reflecting several generations of zircon growth.

Calculated at 311 Ma, the $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ and ϵ_{Nd} ratios (table II) indicate that the three granite series of the Cabeceiras massif, despite some variations, are grouped in different ranges (respectively 0.7101–0.7112 and –8.7 for G'f, 0.7142–0.7152 and –10.6 for G'm, and 0.7177–0.7205 and –16.4 for G'g). These different ranges together with the high values of $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ and the very low negative values of ϵ_{Nd} suggest that the massif is formed by the association of three independent granite series, derived from the partial melting of a heterogeneous continental crust characterized by an important metasedimentary component. According to a recent Sr–Nd isotope study on the metasediments in the Northern Portuguese Central Iberian Zone (Beetsma, 1995), the crustal source of the Cabeceiras de Basto massif may be Late Proterozoic metasediments.

VERSION ABRÉGÉE

Introduction

Les granitoïdes syn-orogéniques de la ceinture hercynienne ibérique peuvent être classés en trois groupes par rapport à la phase de déformation D3 d'âge intra-westphalien, sur la base de leurs caractères structuraux et de datations en Rb–Sr sur roche totale (Capdevila et al., 1973; Noronha, 1983; Priem et den Tex, 1984; Ferreira et al., 1987; Pinto et al., 1987): (1) granodiorites pré-tectoniques (380–345 Ma); (2) granitoïdes calco-alcalins et peralumineux syn- à tardi-tectoniques (330–305 Ma); (3) granites post-tectoniques (290–280 Ma). La tectonique D3 est marquée par des plissements et cisaillements qui ont contrôlé la mise en place de nombreux complexes granitoïdes (Noronha et al., 1981; Ortega et Ibarguchi, 1990). L'objectif principal de cette étude est de dater précisément le massif granitique syn-tectonique de Cabeceiras de Basto, donc la phase tectonique D3.

Géologie et géochimie

Le complexe granitique de Cabeceiras de Basto, situé à environ 70 km au nord-est de Porto, s'est mis en place dans la zone tectonique centro-ibérique (Julivert et al., 1974) (figure 1). Les terrains encaissants sont des métasédiments d'âge silurien affectés par trois importantes phases de déformation hercyn-

niennes (Ramos et al., 1981; Noronha, 1982, 1983). Il présente une forme allongée, occupant le noyau d'un antiforme de direction N130°E (Ferreira et al., 1987), synchrone de la phase de déformation hercynienne D3 (Noronha et al., 1981) datée entre 316 et 305 Ma (Harland et al., 1989). Il est constitué de l'association de trois unités granitiques distinguées sur la base de leur granulométrie: granite à grain fin, G'f (0,5–1 mm), granite à grain moyen, G'm (2–4 mm) et granite à gros grain, G'g (5–7 mm), localement porphyroïde (Almeida, 1994; Almeida et al., 1995). La chronologie relative de la mise en place des trois granites est difficile à établir sur le terrain à cause des contacts généralement flous entre eux. Les trois unités présentent une même texture hypidiomorphe granulaire et une association minéralogique semblable, comprenant: quartz, plagioclase (An1–An6), feldspath potassique perthitique, biotite et muscovite, avec apatite, monazite, zircon, ilménite, rutile et, rarement, sillimanite et tourmaline comme minéraux accessoires. Les trois unités granitiques, chimiquement très proches, présentent un fort caractère peralumineux ($1,2 < A/KCN < 1,4$). Ils se discriminent toutefois par une croissance de Na par rapport à K de G'f à G'g (décroissance du rapport feldspath K/plagioclase) et leurs gammes de teneurs en TR (G'f: 71–284 ppm; G'm: 43–92 ppm; G'g: 39–126 ppm) et Zr (G'f: 74–195 ppm; G'm: 49–94 ppm; G'g: 46–88 ppm) (Almeida, 1994; Almeida et al., 1995).

Géochronologie U–Pb et géochimie isotopique Sr–Nd

Trois fractions de zircons, et une de monazite, ont été séparées à partir d'un échantillon de granite à grain fin (6C 84). Les cristaux de zircon (non magnétiques à 0° et 3,5 A), limpides et de teinte rose pâle, ont une morphologie en prismes allongés à très trapus. Une étude typologique préliminaire (Almeida, 1994), selon la méthode de Pupin (1980), a permis de mettre en évidence la prédominance des types L et S, qui suggèrent des conditions de cristallisation comparables à celles des granites alumineux. Au MEB (en mode électrons rétrodiffusés), ils montrent une forte zonation magmatique avec des cœurs parfois bien individualisés (figure 2a). La monazite est en petits cristaux subautomorphes de couleur jaunâtre. Au MEB, ils montrent une faible zonation nébulitique (figure 2b).

Les fractions de zircon ont été abrasées à l'air (Krogh, 1982), afin d'éliminer les zones externes, susceptibles d'avoir subi une perte en Pb. La préparation chimique des zircons et de la monazite comporte : lavage à l'HNO₃ 3 N, digestion en bombe Teflon (HF concentré) à 240 °C (Parrish, 1987), reprise à l'HCl 3 N en bombe à 180 °C, élution sur résine de deux aliquotes (une avec addition de spike double ²⁰⁸Pb–²³⁵U) (Krogh, 1973). Les blancs de Pb ont varié durant cette étude de 30 à 80 pg. L'analyse isotopique a été réalisée sur un spectromètre de masse Finnigan MAT 262. Les rapports isotopiques ont été corrigés pour les blancs de Pb, le plomb commun initial (Stacey and Kramers, 1975) et le fractionnement de masse (tableau I). Les incertitudes sur les rapports isotopiques et les âges calculés sont données à 2 σ .

Six échantillons ont été sélectionnés pour l'analyse isotopique Rb–Sr et trois pour Sm–Nd. Les méthodes de mise en solution des échantillons et de séparation chimique des éléments se sont inspirées des techniques développées par Michard et al. (1985) et Boher et al. (1992). Les rapports isotopiques ont été mesurés sur un spectromètre de masse Finnigan MAT 262. Les blancs de chimie sont de 1,2 ng pour Sr et de 2 ng pour Nd. Les

rapports isotopiques ont été respectivement normalisés à ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0,1194 et ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0,7219. Les données avec les erreurs sur les rapports, à 2 σ , sont présentées dans le tableau II.

Discussion et conclusions

Dans le diagramme concordia, le point représentatif de la monazite est quasiment concordant avec des âges ²⁰⁶Pb/²³⁸U et ²⁰⁷Pb/²³⁵U, équivalents à 311 ± 4 Ma (figure 3). Les trois fractions de zircon et celle de la monazite s'alignent le long d'une bonne discordia inverse (MSWD = 0,15), avec un intercept inférieur à 311 ± 1 Ma et un intercept supérieur à 1 207 ± 8 Ma. L'âge obtenu à 311 ± 1 Ma, interprété comme l'âge minimum de la mise en place du complexe, est en parfait accord avec l'âge Westphalien précédemment suggéré sur la base des études structurales et des datations en Rb–Sr obtenues sur des massifs équivalents, e.g., Arga (305 ± 6 Ma) et S. Pedro do Sul (315 ± 3 Ma) (Pinto et al., 1987). La discordia inverse indique l'existence, dans les cristaux de zircon, d'une composante héritée, ce qui est en accord avec l'observation au MEB de cœurs bien individualisés. L'intercept supérieur à 1 207 ± 8 Ma peut s'interpréter comme l'âge minimum du protolithe source des granites.

Les rapports isotopiques initiaux (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i et ϵ_{Nd} ont été calculés à 311 Ma (tableau II). Malgré une certaine variabilité au sein de chaque faciès, les trois unités granitiques présentent des gammes de Sr_i très élevées, et des valeurs de ϵ_{Nd} fortement négatives, nettement distinctes. Il est ainsi possible de conclure que le complexe est composé de trois séries granitiques indépendantes issues, par fusion partielle, d'une croûte continentale hétérogène comportant une importante composante métasédimentaire. Sur la base d'une étude Sr–Nd récente sur les séries métasédimentaires anté-hercyniennes du Nord-Portugal (Beetsma, 1995), la source des granites du massif de Cabeceiras pourrait être les métasédiments protérozoïques.

Acknowledgements. This study was supported by a grant from the Portuguese–French Agreement (INIC/French Embassy/CNRS). The authors wish to thank the anonymous reviewer for its valuable comments on the first version of the manuscript.

REFERENCES

- Almeida A. 1994. Geoquímica, petrogenese e potencialidades metalogénicas dos granitos peraluminosos de duas micas do complexo de Cabeceiras de Basto. *Thesis*, University of Porto, 305 p.
- Almeida A., Noronha F. and Leterrier J. 1995. Estudo geoquímico do complexo granítico de Cabeceiras de Basto: implicações petrogenéticas e metalogénicas, in: Borges F.S. and Marques M. (Coords.), *IV Congresso Nacional de Geologia, Resumos alargados*, Mem. Mus. Labor. Miner. Geol. Fac. Ciênc. Univ. Porto, 4, 687–691.
- Beetsma J.J. 1995. The Late Proterozoic/Paleozoic and Hercynian crustal evolution of the Iberian massif, N. Portugal, as traced by geochemistry and Sr–Nd–Pb isotope systematics of pre-Hercynian terrigenous sediments and Hercynian granitoids, *Thesis*, University of Amsterdam, 223 p.
- Boher M., Abouchami W., Michard A., Albarède F. and Arndt N.T. 1992. Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga, *J. Geophys. Res.*, 97, 345–369.
- Capdevila R., Corretge L.G. and Floor P. 1973. Les granitoïdes varisques de la Meseta Ibérique, *Bull. Soc. géol. France*, XV, 209–228.
- Ferreira N., Iglésias M., Noronha F., Pereira E., Ribeiro A. and Ribeiro M.L. 1987. Granitoïdes da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico, in: Bea F. et al. (Eds), *Geología de los Granitoides y Rocas Asociadas del Macizo Hesperico*, Editorial Rueda, Madrid, 37–51.
- Harland W.B., Armstrong R.L., Craig L.E., Smith A.G. and Smith D.G. 1989. *A Geologic Time Scale*, 128–130.
- Julivert M., Fontbote J., Ribeiro A. and Conde L. 1974. *Mapa tectónico de la Peninsula Iberica y Baleares. Escala 1:1 000 000. Memoria explicativa*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- 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.
- Krogh T.E. 1982. Improved accuracy of U–Pb zircon ages by creation of more concordant systems using an air abrasion technique, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 637–649.

- Michard A., Gurriet P., Soudant M. and Albarède F. 1985. Nd isotopes in French Phanerozoic shales: external vs internal aspects of crustal evolution, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 601–610
- Noronha F. 1982. Rochas graníticas do triângulo Gerês-Barroso-Cabreira. Suas relações com mineralizações em Sn e W-Mo, *Publicações do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências do Porto*, 93, 5–39
- Noronha F. 1983. Estudo metalogénico da área tungstífera da Borralha, *Thesis*, University of Porto, 413 p.
- Noronha F., Ramos J.M.F., Rebelo J.A. and Ribeiro M.L. 1981. Essai de corrélation des phases de déformation hercynienne dans le nord-ouest péninsulaire, *Leidse Geologische Meded.*, 52, 87–91
- Ortega L.A. and Ibarra J.I.G. 1990. The genesis of Late Hercynian granitoids (Northwestern Spain). Inferences from REE studies, *J. Geology*, 98, 189–212
- Parrish R.R. 1987. An improved micro-capsule for zircon dissolution in U-Pb geochronology, *Chem. Geol. (Isotope Geoscience Section)*, 66, 99–102
- Pinto M.S., Casquet C., Ibarrola E., Corretgé L.G. and Ferreira M.P. 1987. Síntese geocronológica dos granitoides do Maciço Hespérico, in: Bea F. et al. (Eds.), *Geología de los Granitoides y Rocas Asociadas del Macizo Hesperico*, Editorial Rueda, Madrid, 69–86
- Priem H.N.A. and den Tex E. 1984. Tracing crustal evolution in the NW Iberian Peninsula through the Rb-Sr and U-Pb systematics of Palaeozoic granitoids: a review, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 35, 121–130
- Pupin J.-P. 1980. Zircon and granite petrology, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 73, 207–220
- Ramos J.M.F., Oliveira J.M.S. and Simões M. 1981. Prospeção geológica e geoquímica na área de Cabeceiras de Basto, *Memórias e Notícias, Publicações do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra*, 91–92, 89–111
- Stacey J.S. and Kramers J.D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 26, 207–221