

# O chumbo dos sistemas hidráulicos romanos no Ocidente Peninsular: proveniência e processos metalúrgicos

---

\*Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares, Departamento de Engenharia e Ciências Nucleares, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Susana Sousa Gomes\*  
susana.gomes@ctn.tecnico.ulisboa.pt

Maria Fátima Araújo\*  
faraujo@ctn.tecnico.ulisboa.pt

António M. Monge Soares\*  
amsoares@ctn.tecnico.ulisboa.pt

\*\*Museu Monográfico e Ruínas de Conimbriga

Virgílio Hipólito Correia\*\*  
virgiliocorreia@mmconimbriga.dgpc.pt

Os autores escrevem segundo o Acordo Ortográfico de 1945

**Resumo** Durante a Época Romana, o chumbo metálico foi amplamente utilizado na manufactura das canalizações em complexos sistemas hidráulicos para o abastecimento e a distribuição de água em termas públicas e edifícios domésticos. Consequentemente, o estudo das fontes de chumbo e dos processos metalúrgicos pode ser importante no estabelecimento de rotas comerciais ocorridas durante este período. Um método bastante utilizado, que combina as razões isotópicas do Pb com os teores dos elementos menores e vestigiais e os dados arqueológicos, tem vindo a proporcionar informação relevante no que se refere à origem das matérias-primas.

No presente trabalho foram estudadas 77 amostras constituídas por 44 fragmentos de canalizações de chumbo de *Conimbriga*, 21 de *Augusta Emerita*, seis de *Mirobriga*, e três amostras recolhidas em *Arucci/Turobriga*, uma em *Fuente Seca* e duas em *Cortalago*, sendo este último local de amostragem localizado nas proximidades da Faixa Piritosa Ibérica na província da *Baetica*. As amostras foram analisadas por espectrometria de massa (ICP-MS) de modo a determinar as razões isotópicas do Pb, bem como o teor dos elementos Ni, Cu, As, Ag, Sn, Sb e Bi.

A concentração de Sn sugere que a maioria das amostras foram manufacturadas com chumbo reciclado contendo solda de estanho. Além disso, o teor de Ag, por vezes acompanhado por concentrações de Cu e Ni, indica que o chumbo pode ter sido obtido por redução do litargírio ou por redução de galenas não argentíferas. O estudo comparativo com os dados publicados dos depósitos mineiros da Península Ibérica mostra uma elevada sobreposição entre a assinatura isotópica do Pb das diversas canalizações de chumbo estudadas e o chumbo metálico proveniente de ocorrências mineiras da Zona da Ossa Morena e da Serra Morena ou com uma mistura deste chumbo com o chumbo proveniente da Faixa Piritosa Ibérica.

**Abstract**

Lead metal was largely applied in the manufacture of water pipes used in complex hydraulic systems to supply and distribute water to public baths and private houses during Roman times. Therefore, research on lead sources and metallurgical techniques may provide significant information on trade routes during those times. A widely used method which combines Pb isotopes ratios with minor and trace elemental contents and archaeological data has been providing significant information on the raw material provenance.

In the present study 77 samples were analysed, composed by 44 fragments of lead water pipes from *Conimbriga*, 21 from *Augusta Emerita*, six from *Mirobriga*, three from *Arucci/Turobriga*, one from *Fuente Seca* and two from *Cortalago*, the last located in the vicinity of the Iberian Pyrite Belt in *Baetica* province. Analyses were performed by mass spectrometry (ICP-MS) to determine Pb isotopic ratios as well as some minor and trace elemental (Ni, Cu, As, Ag, Sn, Sb and Bi) contents. Sn concentrations suggest that most samples were manufactured with recycled lead containing tin solder. Besides, the Ag contents, sometimes combined with Cu and Ni concentrations, indicate that the lead was obtained by litharge reduction or smelting of non-argentiferous galena. Comparison with published data of Iberian Peninsula mineralogical deposits, displays significant correspondence between the Pb isotopic signature of several lead pipes and lead metal from *Ossa Morena* Zone and *Sierra Morena*, or a mixture of these with lead from the Iberian Pyrite Belt.

**1. Introdução**

A Romanização da Península Ibérica tem sido atribuída a motivos económicos e militares, que levaram ao aumento da procura de metais imprescindíveis para a cunhagem da moeda ou para a produção de materiais de construção, armas e objectos de luxo, ao mesmo tempo que originaram a identificação e exploração de novas ocorrências mineiras (Edmondson, 1989). A Península Ibérica tornou-se, assim, uma importante fonte de minérios, onde a Faixa Piritosa Ibérica se destaca como sendo uma das regiões mais metalogénicas do Mundo Antigo. As minas de Rio Tinto, situadas no distrito de Huelva (Sul de Espanha), na antiga província da *Baetica*, foram locais de grande actividade mineira durante o Império Romano, em particular no que se refere à obtenção de prata a partir de jarosites argentíferas. O processo de extracção deste metal era feito por copelação (metalurgia extractiva introduzida pelos Fenícios na Península Ibérica), inicialmente a partir de galenas argentíferas, as quais constituíam a principal fonte utilizada neste processo e que se tornou comum para a obtenção, quer da prata, quer do chumbo. Com a exploração das minas de Rio Tinto, os complexos mineiros polimetálicos da Faixa Piritosa Ibérica contendo prata passaram a constituir uma fonte privilegiada a ser utilizada na produção deste metal. Contudo, de uma forma geral é necessário adicionar chumbo às jarosites argentíferas para que

se possa proceder a operações de copelação, pelo que havia a necessidade da importação deste metal para a extracção do metal nobre (Craddock, 1995; Hunt Ortiz, 2003).

O chumbo, produzido em grandes quantidades, tornou-se de elevada importância económica em Época Romana, sendo objecto de aplicações muito diversificadas, desde a união de elementos arquitectónicos, à manufactura de sarcófagos, pequenos artefactos, como pesos e artigos de joalheria, e, mesmo, para fins militares, como na manufactura dos projecteis para funda. O chumbo, devido à sua elevada resistência à corrosão, maleabilidade e baixa temperatura de fusão, permitia adaptar-se a diferentes formas e suportar elevadas pressões, a que acrescia o baixo preço da matéria-prima (Cano Ortíz & Acero Pérez, 2004; Rodà de Llanza, 2007; Reis, De Man & Correia, 2011; Reis, 2014). A sua maior aplicação foi na produção de canalizações de chumbo para a condução e distribuição da água, permitindo edificar grandiosos sistemas hidráulicos, que incluíam aquedutos, termas e fontes, além de permitirem fornecer, a edifícios domésticos no interior dos centros urbanos, um bem imprescindível à vida humana. Esses sistemas hidráulicos constituem, assim, uma das mais maravilhosas demonstrações do domínio técnico romano.

A determinação das fontes de matérias-primas utilizadas na produção deste metal reveste-se, por conseguinte, da maior importância, permitindo identificar rotas comerciais utiliza-

Elementos químicos	Gama de concentração	Identificação	Referências
Sn	> 100 mg kg <sup>-1</sup> ≤ 100 mg kg <sup>-1</sup>	Chumbo com solda de Sn reciclado Chumbo não reciclado	Asderaki & Rehren, 2006
Ag & Bi	Ag = ]100 – 400[ mg kg <sup>-1</sup> Teor de Bi elevado	Chumbo obtido por redução de galenas empobrecidas em Ag	Gale, Stos-Gale & Davis, 1984; Craddock, Freestone, Hunt Ortiz, 1987; Craddock, 1995; Kullef & alii, 2006;
	Ag ≤ 100 mg kg <sup>-1</sup> Teor de Bi baixo	Chumbo obtido por redução do PbO	Montero-Ruiz & alii, 2008; Montero-Ruiz & alii, 2009
Cu & Ni	Concentrações de Cu e Ni elevadas	Chumbo obtido por redução do PbO, resultante de minérios de Pb/Ag (jarosites) associados a minérios de Cu	Kullef & alii, 2006

Quadro 1 – Elementos característicos indicativos da matéria-prima utilizada para a produção de chumbo.

das no mundo romano (Craddock, 1995). O estudo dos processos metalúrgicos utilizados nessa época, bem como a determinação da proveniência provável do chumbo utilizado nas canalizações, contribui para o conhecimento do património cultural legado por essa civilização, em território português. Este tipo de investigação de âmbito interdisciplinar, recorrendo à Arqueometria permite também acrescentar nova informação ao conhecimento arqueológico dos artefactos de chumbo no que respeita à sua tipologia, cronologia e contexto de utilização. Neste trabalho realizou-se a caracterização química elementar e determinaram-se as razões isotópicas do Pb de diversas canalizações de chumbo pertencentes ao Império Romano (datadas do século I ao século IV d.C.) provenientes de aquedutos, edifícios públicos e privados de diferentes sítios arqueológicos. Os resultados obtidos contribuíram para um melhor conhecimento da evolução tecnológica que a Romanização trouxe a esta região da Península Ibérica.

### 1.1. Composição elementar

As concentrações dos elementos menores e vestigiais presentes no chumbo metálico estão relacionadas com as matérias-primas utilizadas, isto é, se o chumbo metálico foi obtido por redução directa de minérios de chumbo (galenas), ou por redução do litargírio (PbO), o subproduto resultante da copelação da prata.

No caso da obtenção por redução do litargírio, de modo geral, o chumbo apresenta como elementos vestigiais cobre (Cu), arsénio (As), estanho (Sn), antimónio (Sb) e bismuto (Bi). No entanto, os teores destes elementos variam consoante a fase do processo em que o litargírio é produzido. Se se tiver formado logo no início da copelação é muito impuro e apresenta teores de As e Sb elevados; caso seja produzido no fim do processo é “relativamente puro”, com baixos teores de As e Sb, o que se torna mais evidente quando o chumbo assim obtido é comparado com o produzido directamente a partir de galenas. O Bi tende a ficar retido na prata, sendo transferido, apenas para o litargírio formado no final da copelação (L’Héritier & alii, 2015). O

Cu não é incorporado preferencialmente nos produtos de oxidação formados inicialmente, tendendo a manter uma concentração mais ou menos constante no litargírio ao longo de todo o processo (Stos-Gale & Gale, 1982). Com base em trabalhos publicados por vários autores, apresenta-se no Quadro 1, de forma sucinta, a informação fornecida pelos teores em elementos químicos nos artefactos de chumbo sobre a matéria-prima utilizada para a produção deste metal.

Contudo, em estudos de proveniência, baseados na caracterização elementar dos artefactos de chumbo, é difícil estabelecer uma relação directa entre o minério e o artefacto metálico, tal como acontece com os de cobre, uma vez que ocorrem fraccionamentos dos elementos vestigiais como consequência dos processos metalúrgicos de transformação do minério em metal, nomeadamente na redução do minério e subsequente purificação do metal (Brill & Wampler, 1967; Hauptmann, 2007). Para além disso, ocorrem variações mineralógicas e químicas dentro de uma mesma ocorrência mineira, designadamente entre a zona mais superficial e a mais profunda. O modo de superar estes problemas consiste na utilização da composição isotópica do Pb, uma vez que não ocorre qualquer fraccionamento isotópico durante os processos metalúrgicos, isto é, desde os processos de metalurgia extractiva (redução e/ou copelação) até à manufactura do artefacto.

## 1.2. Composição isotópica do chumbo

A assinatura isotópica do Pb dos artefactos, complementada com uma análise elementar dos mesmos, permite estabelecer estudos de proveniência fiáveis, indicando fontes geológicas prováveis da matéria-prima utilizada na manufactura desses artefactos.

O chumbo, no meio ambiente, existe sob a forma de quatro isótopos estáveis,  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}$ , em que os isótopos  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}$  são o produto final das séries de decaimento radioactivo do urânio ( $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$ ) e do tório ( $^{232}\text{Th}$ ), respectivamente, e por isso se designam por radiogénicos. O  $^{204}\text{Pb}$  é o único isótopo estável que não é produto de um decaimento e, conseqüentemente, a sua concentração no depósito mineral mantém-se constante ao longo do tempo.

A abundância relativa dos isótopos de Pb numa determinada massa mineral depende essencialmente da concentração relativa de Pb, Th e U nessa mesma massa aquando da sua formação, do período de semidesintegração ( $t_{1/2}$ ) dos isótopos de origem e do tempo que decorreu desde essa formação (Quadro 2).

O Pb pode existir num minério como sendo o elemento metálico principal, como por exemplo na galena ( $\text{PbS}$ ), ou como elemento menor ou vestigial em outros minerais. Apesar de o Pb poder existir com diversos teores num dado depósito mineral, as razões isotópicas do Pb são semelhantes para qualquer mineral desse depósito, desde que a formação de todos eles seja resultante do mesmo processo geológico e tenha a mesma idade. Diversos estudos (Rohl & Needham, 1998; Hauptmann, 2007; Stos-Gale & Gale, 2009) têm demonstrado que, independentemente do teor de Pb presente nos artefactos, a assinatura isotópica do Pb característica do minério donde foi obtido mantém-se constante, não ocorrendo qualquer fraccionamento isotópico nos diferentes processos metalúrgicos, isto é, a assinatura isotópica do metal é idêntica à do minério donde foi obtido.

No entanto, se durante o processo metalúrgico foram utilizadas matérias-primas contendo chumbo com origens diversas (como acontece na produção de ligas ou na reciclagem de sucata metálica) podem associar-se materiais com composições isotópicas distintas, o que inviabiliza a utilização das razões isotópicas do Pb na determinação da origem dos materiais

Série de decaimento	$t_{1/2}$ ( $\times 10^9$ anos)	$\lambda$ (anos $^{-1}$ )
$^{238}\text{U}$ $\rightarrow$ $^{206}\text{Pb}$	4,468	$1,552 \times 10^{-10}$
$^{235}\text{U}$ $\rightarrow$ $^{207}\text{Pb}$	0,704	$9,850 \times 10^{-10}$
$^{232}\text{Th}$ $\rightarrow$ $^{208}\text{Pb}$	14,01	$4,948 \times 10^{-10}$

Quadro 2 – Formação dos três isótopos estáveis do Pb, períodos de semidesintegração ( $t_{1/2}$ ) e constantes de decaimento ( $\lambda$ ).

utilizados. Um exemplo paradigmático deste facto acontece com o chumbo utilizado na altura da queda do Império Romano, uma vez que a reutilização/reciclagem de metal se expandiu em larga escala, isto é, todo o tipo de metal era saqueado e reutilizado, designadamente no que se refere às canalizações de chumbo (Pernicka, 2014).

A interpretação das assinaturas isotópicas, em estudos de proveniência em Arqueologia, faz-se normalmente através de uma representação gráfica bidimensional das razões isotópicas  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  versus  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  versus  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  dos materiais comparando-as com as assinaturas isotópicas dos prováveis depósitos minerais que estarão na sua origem (Stos-Gale & Gale, 2009).

## 2. Sítios arqueológicos

### 2.1. Conimbriga

O presente estudo foi desenvolvido tendo por base o sítio arqueológico de *Conimbriga*, onde se encontra conservado e bem documentado um complexo sistema de engenharia hidráulica, composto por canalizações de chumbo instaladas durante o Império Romano. *Conimbriga*, situada na área do Baixo Mondego, era uma cidade pertencente ao *conventus Scallabitanus* da província da *Lusitania* (Fig. 1), tendo-se tornado num centro urbano de grande importância económica, cujo período de maior prosperidade se deu entre os séculos I e IV d.C. Este sítio arqueológico distingue-se pela sua boa preservação e arquitectura doméstica, partilhando estas características com algumas urbes do Império como *Pompeii*, *Herculaneum* ou *Ostia*, na Península Itálica. As canalizações de chumbo foram descobertas, durante escavações arqueológicas, em diferentes edifícios públicos e privados, constituindo o maior espólio nacional de artefactos de chumbo, o qual se encontra preservado no Museu Monográfico e Ruínas de *Conimbriga* (Correia, 2013; Reis, 2014).



Fig. 1 – Localização geográfica dos sítios arqueológicos de Conimbriga, Augusta Emerita e Mirobriga - província da Lusitania, e de Arucci/Turobriga, Fuente Seca e Cortalago - província da Baetica (Adaptado de Gauß, 2016).

Conimbriga teve uma importante renovação urbanística no reinado de Augusto. Em virtude do crescimento populacional, a necessidade de captação de água de nascentes mais distantes da cidade tornou-se premente pelo que foi edificado um aqueduto que ligava a nascente de Alcabideque às primeiras termas da cidade, alimentando ao mesmo tempo fontes nas ruas e praças. Na Época Flaviana (77 d.C.), a cidade recebeu o estatuto municipal e passou a chamar-se *Flavia Conimbriga*, o que originou um grande programa de obras públicas, construindo-se novas termas que foram concluídas no reinado de Trajano. No Baixo-Império, Conimbriga foi cercada de muralhas, tal como aconteceu em outras cidades romanas do Ocidente. Em 464, os Suevos tomaram a cidade destruindo o poder político-administrativo, que se encontrava a cargo da família *Cantaber* (Alarcão, 1988; Reis, 2014).

## 2.2. Augusta Emerita

*Augusta Emerita* (Fig. 1), localizada nas margens do rio Guadiana, foi fundada em 25 a.C. como colónia capital da província da Lusitania (Nogales Basarrate & Álvarez Martínez, 2013). Agripa, familiar de Augusto e benfeitor dos emeritenses, desempenhou um papel primordial no processo da urbanização, implementando novos modelos arquitectónicos, sobretudo de engenharia hidráulica, tornando *Emerita* numa cidade modelo, à imagem de Roma, para

a província da Lusitania (Fabião, 2014; Álvarez Martínez, 2015). Para além da edificação de grandiosas obras públicas, como são os Aquedutos para o abastecimento de água à colónia, foram também edificadas termas públicas com canalizações de chumbo (Nogales Basarrate & Álvarez Martínez, 2014).

## 2.3. Mirobriga

*Mirobriga* (Fig. 1) localizava-se no *conventus pacensis* da província da Lusitania. Nesta urbe romana distingue-se o seu complexo termal, talvez o mais bem conservado em território peninsular, o qual compreende dois edifícios contíguos (dispostos em L), as Termas Este e as Termas Oeste, cujo sistema de abastecimento também era realizado por canalizações de chumbo (Barata, 1988; 2010; Reis, 2014).

## 2.4. Sítios da Baetica

Os sítios arqueológicos de *Arucci/Turobriga*, *Fuente Seca* e *Cortalago*, situados na antiga província da Baetica, no *conventus hispalensis*, encontram-se localizados geograficamente próximo ou mesmo integrados numa das maiores e mais ricas regiões mineiras da Europa, a Faixa Piritosa Ibérica (Fig. 1). *Arucci/Turobriga*, fundada por Augusto, sofreu ao longo do século I um rápido crescimento, com importantes remodelações urbanísticas. Na Época Flaviana foi construído um complexo termal cujo sistema de distribuição de água era feito, como habitualmente, através de canalizações de chumbo (Medina Rosales, 2009). Próximo de *Arucci/Turobriga* localiza-se o sítio arqueológico de *Fuente Seca*, na vizinhança do Chança, um dos afluentes do Guadiana. Em *Fuente Seca* foi encontrado um pequeno troço de um Aqueduto, do século I, no qual foi registada e posteriormente recolhida uma canalização em chumbo (Medina Rosales, 2015). *Cortalago*, por seu lado, localiza-se na região mineira de Rio Tinto, integrada na Faixa Piritosa Ibérica. Foi uma povoação mineiro-metalúrgica, onde a exploração de minérios e a produção metalúrgica teve lugar desde a Primeira Idade do Ferro (Período Orientalizante) (Rothenberg & Blanco-Freijeiro, 1981; Pérez Macías & Delgado Domínguez, 2007).

### 3. Materiais e métodos

#### 3.1. Coleções analisadas

As coleções de artefactos de chumbo seleccionadas para este estudo são constituídas por exemplares de canalizações de chumbo pertencentes aos espólios do Museu Monográfico e Ruínas de Conimbriga - *Conimbriga* (44); Consórcio e Museu de Mérida - *Augusta Emerita* (21); Museu de Santiago do Cacém - *Mirobriga* (seis); Câmara Municipal de Aroche - *Arucci/Turobriga* e Fuente Seca (quatro); e Museu Mineiro de Rio Tinto - Corta-lago (duas).

#### 3.2. Concentrações elementares e razões isotópicas do Pb

As amostras de chumbo recolhidas nas diferentes canalizações romanas foram submetidas a uma preparação analítica para determinar a sua composição elementar e razões isotópicas do Pb por espectrometria de massa de quadrupolo simples com ionização por plasma (ICP-QMS), utilizando um ELAN DRC-e, *Axial Field Technology*, da PerkinElmer Sciex. Numa primeira fase procedeu-se à remoção da camada de corrosão superficial nas amostras, de modo a evitar a contaminação por material exógeno. Em seguida, foram retiradas com uma broca HSS DIN 338, de 1 mm ou 1,5 mm de diâmetro, pequenas quantidades (~ 50 mg) de metal limpo. As amostras de chumbo metálico foram dissolvidas numa solução aquosa de HNO<sub>3</sub> 20% bidestilado e, posteriormente, diluídas de acordo com a determinação a realizar (Gomes & alii, 2018).

Na análise da composição elementar procedeu-se à determinação dos elementos menores e vestigiais níquel (Ni), cobre (Cu), arsénio (As), prata (Ag), estanho (Sn), antimónio (Sb), e bismuto (Bi). Para controlo de qualidade dos resultados recorreu-se ao uso do material de referência certificado BCR 288 (*Lead containing Added Impurities*) da *Community Bureau of Reference* e de soluções padrão de calibração multi-elementar 3 e 4 certificadas (PerkinElmer *Pure Plus Atomic Spectroscopy Standard*). Os limites de quantificação calculados foram os seguintes: Ni 6,28 mg/kg; Cu 4,38 mg/kg; As 4,75 mg/kg; Ag 2,53 mg/kg; Sn

2,69 mg/kg; Sb 4,40 mg/kg e Bi 4,62 mg/kg (Gomes & alii, 2018).

Na análise dos isótopos do Pb, as razões isotópicas a determinar:  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ , foram calibradas fazendo uso do material de referência certificado NIST 981 (*Common Lead Isotopic Standard*) do *National Institute of Standards and Technology*.

#### 3.3. Análise estatística multivariada

O conjunto de resultados obtidos para a composição elementar das canalizações de chumbo foi tratado por análise estatística multivariada com o *software* STATISTICA (v.12). A análise factorial, com base no método de extracção dos componentes principais, permite reduzir o número de variáveis iniciais para descrever os dados disponíveis e estudar a variabilidade de determinados elementos com um maior poder discriminativo, garantindo a perda mínima de informação. Além disso, permite identificar factores independentes que representam as variações das observações originais num espaço multidimensional (Massart & alii, 1988; Marques de Sá, Noronha & Ferreira da Silva, 2014). Através da análise factorial é possível comparar o padrão da composição elementar entre as amostras analisadas com o conjunto de dados obtidos. Os factores peso ou *loadings* representativos do peso relativo de cada elemento químico e os factores *scores* representativos dos elementos em cada amostra face às novas variáveis (factores comuns) foram determinados com o objectivo de identificar prováveis matérias-primas utilizadas na obtenção do metal para a produção das canalizações de chumbo. De modo a evidenciar a estrutura fundamental dos dados iniciais e interpretar o significado dos factores comuns fez-se a rotação ortogonal dos factores recorrendo ao método varimax. A análise de grupos, utilizando dendrogramas, foi igualmente utilizada de modo a encontrar conjuntos homogéneos de amostras com base na composição elementar. O método aplicado foi o de Ward, em que para o reagrupamento das amostras em função da distribuição do teor elementar foi utilizada a distância Euclideana.

Quadro 3 – Variação da concentração e valores médios em  $\text{mg kg}^{-1}$  ( $\pm$  desvio padrão) dos diferentes elementos identificados nas canalizações de chumbo dos sítios arqueológicos de *Conimbriga*, *Augusta Emerita*, *Mirobriga* e sítios da *Baetica* (Cu, Sn, Sb expressos em percentagem, excepto se mencionado, Ni, As, Ag, Bi em  $\text{mg kg}^{-1}$ , n.d. – não detectado).

	<i>Conimbriga</i>	<i>Augusta Emerita</i>	<i>Mirobriga</i>	Sítios da <i>Baetica</i>
Ni	< 6,28 – 200	n.d. – 332	n.d. – 18	n.d. – 56
	28 ( $\pm$ 49)	17 ( $\pm$ 52)	9 ( $\pm$ 6)	10 ( $\pm$ 21)
Cu	0,02 – 0,19	0,03 – 0,12	0,05 – 0,10	0,03 – 0,09
	792 ( $\pm$ 526)	624 ( $\pm$ 326)	617 ( $\pm$ 210)	464 ( $\pm$ 191)
As	n.d. – 903	n.d. – 615	48 – 80	n.d. – 740
	122 ( $\pm$ 148)	108 ( $\pm$ 122)	65 ( $\pm$ 14)	197 ( $\pm$ 308)
Ag	59 – 346	52 – 232	131 – 153	58 – 282
	156 ( $\pm$ 55)	147 ( $\pm$ 48)	143 ( $\pm$ 89)	156 ( $\pm$ 80)
Sn	< 2,69 $\text{mg kg}^{-1}$ – 0,89	8 $\text{mg kg}^{-1}$ – 0,71	0,01 – 0,54	3 $\text{mg kg}^{-1}$ – 0,77
	2612 ( $\pm$ 2334)	2966 ( $\pm$ 1916)	3266 ( $\pm$ 1865)	2434 ( $\pm$ 3216)
Sb	0,03 – 0,36	0,04 – 0,38	0,09 – 0,35	0,09 – 0,48
	1646 ( $\pm$ 735)	1559 ( $\pm$ 808)	1505 ( $\pm$ 998)	1968 ( $\pm$ 1624)
Bi	< 4,62 – 167	12 – 152	143 – 976	34 – 366
	51 ( $\pm$ 38)	63 ( $\pm$ 35)	345 ( $\pm$ 312)	262 ( $\pm$ 250)
Total de amostras	44	21	6	6

Quadro 4 – Intervalos de variação das razões isotópicas do Pb das canalizações de *Conimbriga*, *Augusta Emerita*, *Mirobriga* e sítios da *Baetica*.

	<i>Conimbriga</i>	<i>Augusta Emerita</i>	<i>Mirobriga</i>	<i>Baetica</i>
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18,075 – 18,368	18,140 – 18,293	18,219	18,170 – 18,277
$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	0,855 – 0,861	0,856 – 0,860	0,856	0,855 – 0,860
$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2,103 – 2,119	2,100 – 2,111	2,100	2,100 – 2,113

## 4. Resultados

### 4.1. Análise elementar

Os valores médios e os intervalos de variação dos teores dos elementos determinados nos conjuntos de amostras estudadas, para os vários sítios arqueológicos, estão apresentados no Quadro 3. Os valores determinados para cada amostra encontram-se em Gomes (2018). Embora todos os elementos (Ni, Cu, As, Ag, Sn, Sb e Bi) apresentem teores variáveis, destaca-se

uma maior variação nos teores de Sn que variam entre os valores, abaixo do limite de quantificação ( $< 2,69 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e 0,89%. Os elementos Cu, Ag e Sb foram quantificados em todas as amostras. Quanto aos restantes elementos, o Ni e o As não foram detectados em várias amostras, encontrando-se valores máximos, respectivamente  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $903 \text{ mg kg}^{-1}$ , nas Termas do Sul, em *Conimbriga*, e  $332 \text{ mg kg}^{-1}$  para o Ni, em *Augusta Emerita*. O teor de Bi encontra-se abaixo do limite de quantificação ( $< 4,62 \text{ mg kg}^{-1}$ ) em algumas amostras do Aqueduto, Termas do Sul e Casa dos Repuxos de *Conimbriga* e apresenta um valor máximo de  $976 \text{ mg kg}^{-1}$  para as Termas Este de *Mirobriga*.

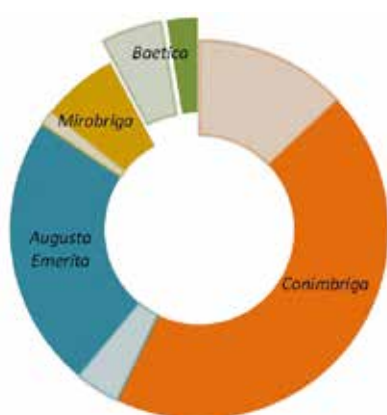
Uma vez que o processo de reciclagem do chumbo (contendo soldas de estanho) foi identificado na maior parte das amostras colhidas nas canalizações, a discussão dos resultados irá incidir preferencialmente nas amostras com teores de  $\text{Sn} \leq 100 \text{ mg kg}^{-1}$ , isto é, chumbo provavelmente não reciclado (ver Quadro 1), segundo o critério definido por Asderaki & Rehren (2006). Assim, no total foram analisadas 77 amostras, das quais foi possível diferenciar 18 amostras de chumbo provavelmente não reciclado, como ilustra a Fig. 2.

As 18 amostras de canalizações de chumbo provavelmente não reciclado são provenientes de *Conimbriga* (dez), *Augusta Emerita* (três), *Mirobriga* (uma), *Arucci/Turobriga* (três) e *Fonte Seca* (uma).

### 4.2. Análise dos isótopos do Pb

Os intervalos de variação das razões isotópicas do Pb são apresentados no Quadro 4. Os valores determinados para cada amostra ana-

Fig. 2 – Representação gráfica da distribuição dos teores de  $\text{Sn} \leq 100 \text{ mg kg}^{-1}$  (coloração clara) e  $\text{Sn} > 100 \text{ mg kg}^{-1}$  (coloração mais escura) determinados nas canalizações de chumbo provenientes de *Conimbriga*, *Augusta Emerita* e *Mirobriga* (*Lusitania*), e de *Arucci/Turobriga*, *Fonte Seca* e *Cortalago* (*Baetica*).



lisada encontram-se publicados em Gomes (2018).

Apresenta-se na Fig. 3 a distribuição das razões dos isótopos de Pb através de duas representações gráficas semelhantes à “reflexão em espelho”, exibindo dois eixos na vertical, com as razões isotópicas  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ , e um na horizontal, com a razão isotópica  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  (Stos-Gales & Gale, 2009).

### 5. Discussão dos resultados

No Quadro 5 apresentam-se as variações das gamas de concentração e os valores médios da composição elementar obtidos na análise destas canalizações de chumbo para cada um dos sítios arqueológicos.

A elevada variabilidade dos teores de Ni, Cu, As, Ag, Sb e Bi nas canalizações de chumbo dos sítios arqueológicos estudados apontam para o uso de chumbo obtido a partir de matérias-primas distintas. Acrescenta-se ainda que o teor de Ag determinado nas 18 amostras é indicador de que o chumbo manufacturado para as canalizações foi provavelmente obtido por redução do litargírio ou por redução de galenas não argentíferas (ver Quadro 1).

De modo a extrair informação mais relevante sobre a matéria-prima utilizada para a produção do chumbo, fez-se uma aproximação quimiométrica através da análise estatística multivariada. O tratamento estatístico foi realizado através da análise factorial e grupal referente à distribuição elementar considerando seis variáveis (os teores de Ag, As, Bi, Cu, Ni e Sb) e as 18 amostras de chumbo. A análise factorial gera três factores que reportam 90% da variân-

cia total dos resultados obtidos (Quadro 6). O Factor 1 (F1) está directamente relacionado com a distribuição dos teores Ag, As e Sb e é representado pelas amostras de chumbo que evidenciam concentrações mais elevadas destes elementos, sugerindo o uso de chumbo manufacturado a partir de minérios de galenas não argentíferas. O Factor 2 (F2) correlaciona-se com a distribuição dos teores Cu e Ni, e relaciona-se com as amostras de chumbo contendo concentrações elevadas de Cu e Ni. O F2 diferencia o uso de matéria-prima na produção de chumbo primário provavelmente proveniente de complexos polimetálicos, as jarosites argentíferas e plumbojarosites, uma vez que os minérios de galena, geralmente, não contêm Ni. O Factor 3 relaciona-se com o teor de Bi, associando teores elevados nas amostras, o que sugere o uso de matérias-primas enriquecidas em Bi, provavelmente um chumbo proveniente de galena. Assim, a projecção dos factores sco-

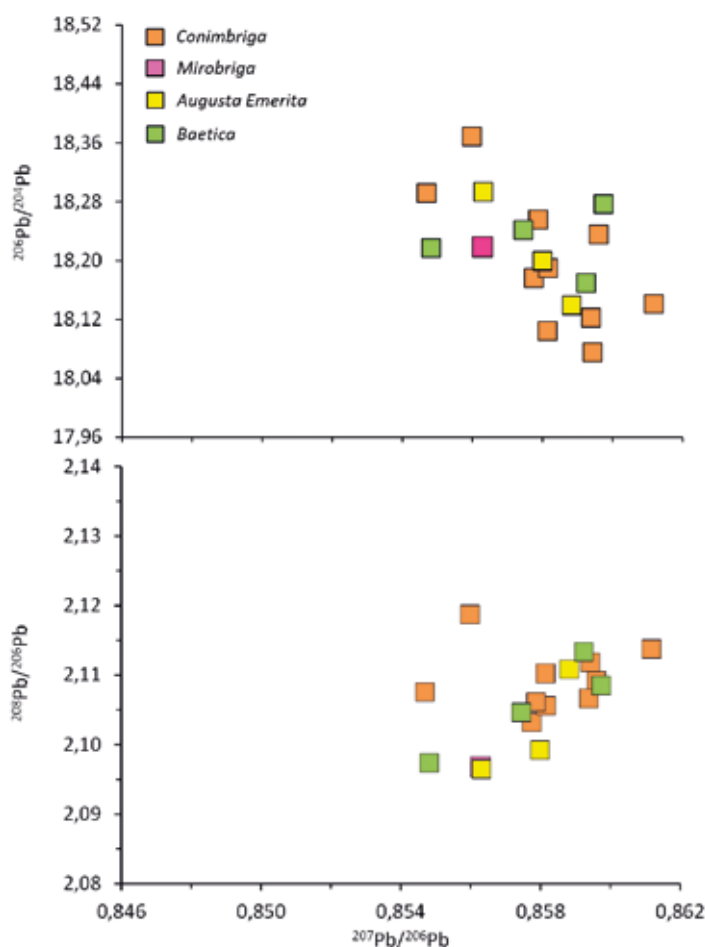


Fig. 3 – Representação gráfica da distribuição das razões isotópicas do Pb ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  versus  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) para as canalizações de chumbo de Conimbriga, Augusta Emerita, Mirobriga e sítios da Baetica.



Quadro 5 – Variação dos valores de concentração e valores médios em  $\text{mg kg}^{-1}$  ( $\pm$  desvio padrão) dos elementos analisados nas 18 canalizações de chumbo ( $\text{Sn} \leq 100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) dos sítios arqueológicos estudados.

	<i>Conimbriga</i>	<i>Augusta Emerita</i>	<i>Mirobriga</i>	<i>Baetica</i>
Ni	8 – 200	6,43 – 12	10	n.d. – 56
	45 ( $\pm$ 61)	8 ( $\pm$ 3)		15 ( $\pm$ 28)
Cu	200 – 1943	295 – 1098	1021	345 – 895
	906 ( $\pm$ 736)	732 ( $\pm$ 406)		513 ( $\pm$ 256)
As	n.d. – 903	n.d. – 489	50	n.d. – 740
	125 ( $\pm$ 276)	165 ( $\pm$ 280)		32 ( $\pm$ 374)
Ag	59 – 346	52 – 132	153	58 – 282
	133 ( $\pm$ 83)	101 ( $\pm$ 43)		180 ( $\pm$ 106)
Sb	464 – 3582	420 – 1605	3527	1295 – 4837
	1734 ( $\pm$ 946)	1182 ( $\pm$ 661)		2838 ( $\pm$ 1693)
Bi	n.d. – 45	12 – 21	976	34 – 127
	11 ( $\pm$ 15)	15 ( $\pm$ 5)		91 ( $\pm$ 40)
Total de amostras	10	3	1	4

res, F1 e F2, evidencia a existência de diferentes grupos de amostras (Fig. 4).

Das amostras provenientes do sítio arqueológico de *Conimbriga*, a das Termas do Sul encontra-se bem distinta das restantes amostras pelos teores elevados de Ni ( $200 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Cu ( $0,17\%$ ), As ( $903 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Ag ( $346 \text{ mg}$

da *Baetica*, pertencentes ao Espaço Termal de San Mamés (*Arucci/Turobriga*) distinguem-se pelos teores elevados de As ( $538 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $740 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Ag ( $253 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $282 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e Sb ( $0,36\%$  e  $0,48\%$ ) e baixos de Ni ( $< \text{L.D.}$ ) e Cu ( $395 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $418 \text{ mg kg}^{-1}$ ) sugerindo o uso de chumbo obtido por redução de galenas não argentíferas. As restantes amostras apresentam concentrações variadas de Ni ( $< \text{L.D.} - 56 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Cu ( $213 - 1098 \text{ mg kg}^{-1}$ ), As ( $< \text{L.D.} - 489 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Ag ( $52 - 168 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e Sb ( $420 \text{ mg kg}^{-1} - 0,35\%$ ), sugerindo um chumbo resultante da redução de galenas não argentíferas (Ag  $> 100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ou do litargírio (Ag  $\leq 100 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

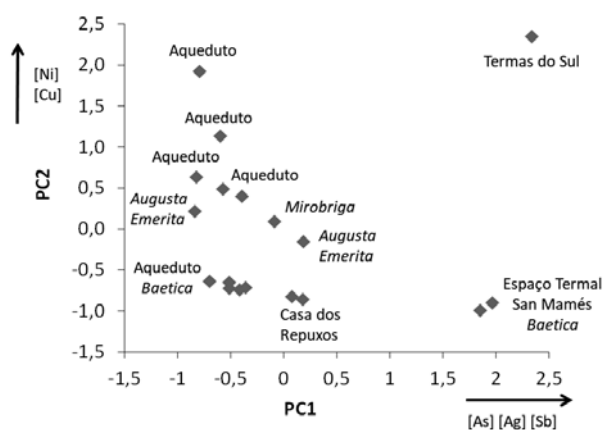
Por sua vez, a análise grupal permitiu identificar grupos de amostras com características semelhantes, a partir da matriz de dados das 18 canalizações de chumbo não reciclado, tendo em atenção as variáveis Ag, As, Bi, Cu, Ni e Sb, como se ilustra na Fig. 5.

O dendrograma diferencia dois grandes grupos (A e B) com base nos teores de As, Ag e Sb. O Grupo A é caracterizado pelas canalizações de chumbo provenientes dos sítios arqueológicos de *Arucci/Turobriga*, *Mirobriga* e *Conimbriga* (Termas do Sul) apresentando os teores mais elevados de Sb ( $0,35 - 0,48\%$ ) mas, também, de As e Ag. O Grupo B, que inclui as restantes amostras de *Conimbriga*, *Augusta*

Quadro 6 – Factores loadings extraídos da análise dos componentes principais aplicados aos teores de Ni, Cu, As, Ag, Sb e Bi nos 18 artefactos de chumbo estudados (rotação de factores: Varimax normalized, negrito: factores com valor  $> 0,7$ ).

Variável	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Ni	0,329	<b>0,873</b>	-0,175
Cu	-0,046	<b>0,958</b>	0,130
As	<b>0,910</b>	0,242	-0,099
Ag	<b>0,948</b>	0,073	0,008
Sb	<b>0,806</b>	-0,018	0,446
Bi	0,055	-0,002	<b>0,974</b>
Variância Explicada	46 %	26 %	18 %

Fig. 4 – Representação gráfica dos factores scores e loadings do Factor 1 versus Factor 2 para as canalizações de chumbo de *Conimbriga*, *Augusta Emerita*, *Mirobriga* e *Baetica*.



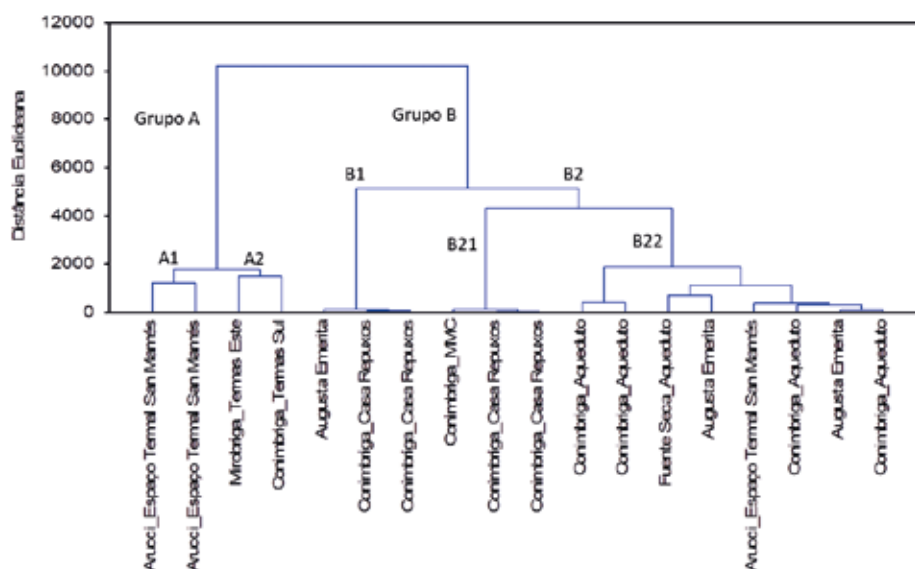


Fig. 5 – Dendrograma da análise hierárquica de grupos para as variáveis de Ag, As, Bi, Cu, Ni e Sb das 18 amostras de canalizações de chumbo romano, provavelmente não reciclado (Método de Ward).

*Emerita* e sítios da *Baetica*, apresenta os teores mais baixos de Sb ( $420 \text{ mg kg}^{-1}$  – 0,24%), As e Ag. Acrescenta-se ainda que o Grupo A diferencia-se em dois subgrupos com base nos teores de Cu (A1:  $395 - 418 \text{ mg kg}^{-1}$ ; A2:  $1021 - 1751 \text{ mg kg}^{-1}$ ), enquanto o Grupo B se subdivide com base nos teores de Sb (B1:  $420 - 527 \text{ mg kg}^{-1}$ ; B2:  $0,12 - 0,24\%$ ) e que, por sua vez, o subgrupo B2 também se divide com base nos teores de Cu (B21:  $257 - 268 \text{ mg kg}^{-1}$ ; e B22:  $0,08 - 0,19\%$ ).

Para uma interpretação adequada da assinatura isotópica do Pb nas canalizações de chumbo de *Conimbriga*, *Mirobriga*, *Augusta Emerita* e sítios da *Baetica* é importante conhecer a distribuição das razões isotópicas do Pb dos minérios que possam ter contribuído para a produção do chumbo metálico. Assim, foi construída uma base de dados de razões dos isótopos de Pb previamente publicadas (ver referências da base de dados em Gomes, 2018) para os depósitos minerais deste metal na Península Ibérica. Procedeu-se, então, a um estudo comparativo, tendo em vista estabelecer eventuais relações entre o chumbo das amostras analisadas e os depósitos explorados na Época Romana. Teve-se em conta que as minas de Cartagena-Mazarrón foram a principal fonte de minério de chumbo utilizado pelos Romanos durante a República, enquanto as minas da Serra Morena, onde se incluem as regiões mineiras de Los Pedroches, Vale de Alcludia, Linares-La Carolina e Azuaga-Fuente Obejuna e também outras minerações locali-

zadas na Zona de Ossa Morena, foram, por sua vez, a principal fonte de minério do chumbo nos dois primeiros séculos do Império Romano. Além disso, a exploração da maior e mais rica província metalogénica da Europa e do Mundo Antigo, a Faixa Piritosa Ibérica, caracterizada pela sua riqueza em depósitos de sulfuretos massivos polimetálicos, de que fazem parte as plumbojarosites e jarosites argentíferas, foi realizada em larga escala durante o Império para a extração da prata (Stos-Gale & alii, 1995; Marcoux, 1998; Trincherini & alii, 2001; Hunt Ortiz, 2003; Santos Zalduegui & alii, 2004; Tornos & Chiaradia, 2004; Villaseca, López García & Barbero, 2005).

Na Fig. 6, apresenta-se a distribuição das razões isotópicas de Pb determinadas para as canalizações de chumbo analisadas para este trabalho, bem como a assinatura isotópica dos minérios das regiões mineiras previamente referidas.

A distribuição das razões isotópicas do Pb para as canalizações de chumbo de *Conimbriga*, *Augusta Emerita*, *Mirobriga* e sítios da *Baetica* exibem um padrão isotópico semelhante à assinatura isotópica dos minérios provenientes da Zona da Ossa Morena e das minas da Serra Morena. Estas fontes de mineralização caracterizadas por galenas não argentíferas são, também, constituídas por sulfuretos massivos enriquecidos em calcopirite e minérios de chumbo contendo Ni, Cu, As, Ag, Sb e Bi como elementos vestigiais (Tornos & Chiaradia, 2004; Palero-Fernández & Martín-Izard, 2005). Esta simila-

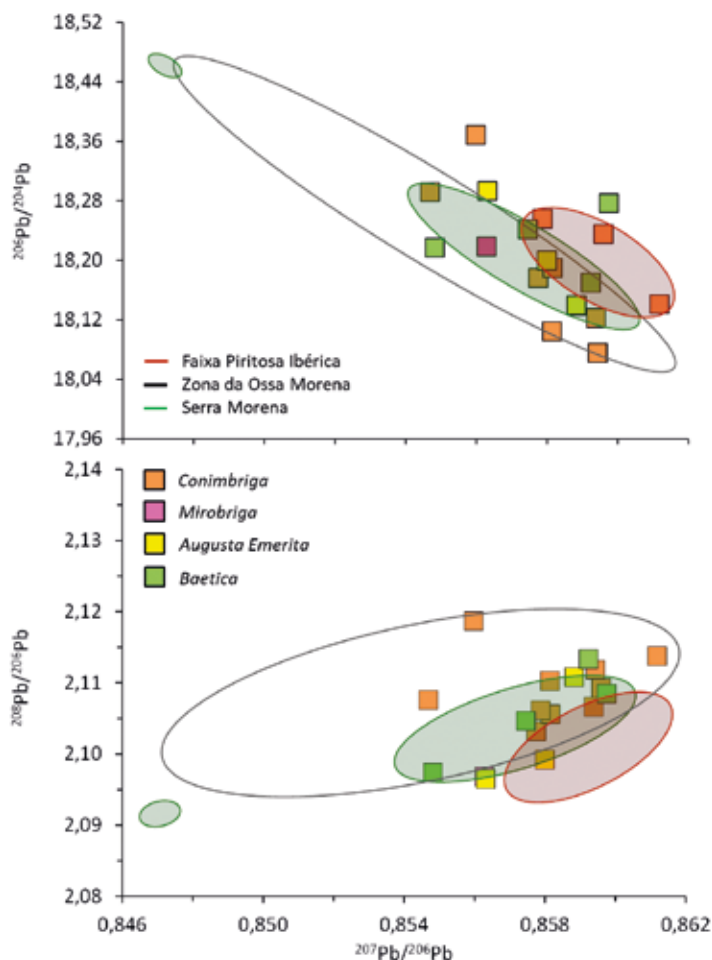


Fig. 6 – Comparação da distribuição das razões isotópicas do Pb ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  versus  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) determinadas para as canalizações dos sítios arqueológicos estudados da Lusitania e Baetica com as dos minérios provenientes das minas da Serra Morena, Zona da Ossa Morena e da Faixa Piritosa Ibérica.

ridade corrobora com a distribuição das amostras de características semelhantes nos Grupos A e B com base no teor de Ag, Sb e As (F1) e os subgrupos (A1, A2 e B21, B22) com base nos teores de Cu (F2). Acrescenta-se ainda que, quatro das amostras de chumbo provenientes de Conimbriga (Aquaduto), duas de Augusta Emerita e duas da Baetica (uma de Arucci/Turobriga e outra de Fonte Seca) apresentam uma assinatura isotópica do Pb provavelmente resultante de uma mistura de chumbo de matérias-primas provenientes de minérios da Faixa Piritosa Ibérica com os da Zona da Ossa Morena e Serra Morena. Esta mistura de matérias-primas deve-se, possivelmente, ao facto de que as jarosites argentíferas, típicas da Faixa Piritosa Ibérica, serem, geralmente, desprovidas de chumbo em quantidade suficiente para se poder proceder à copelação da prata, havendo a necessidade de adicionar grandes quantidades de chumbo para uma extracção eficiente deste metal nobre e da qual resulta

o litargírio (Hunt Ortiz, 2003). Este grupo de amostras coincide com o Grupo B22 (ver Fig. 5) sugerindo o uso de chumbo resultante da redução do litargírio ( $\text{Ag} \leq 100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) obtido, neste caso, a partir de minérios de jarosites argentíferas (teores de Cu elevados).

## 6. Considerações finais

Os resultados obtidos com a caracterização elementar e a determinação das razões isotópicas do Pb permitiram identificar as possíveis fontes de matéria-prima e, a partir daí, inferir rotas de circulação ocorridas durante o Império Romano, bem como processos metalúrgicos utilizados na produção do chumbo para a manufactura das canalizações de sistemas hidráulicos de edifícios públicos e privados de diferentes urbes da Lusitania e Baetica.

A análise estatística multivariada permitiu distinguir grupos relacionados com diferentes fontes de matérias-primas: amostras com teores elevados de As, Ag e Sb indicando o uso de galenas não argentíferas, às quais podem também estar associados minérios de cobre; amostras com teores baixos de As, Ag e Sb, sugerindo o uso de diferentes tipos de galenas ou de litargírio resultante de operações de copelação com base no aproveitamento de jarosites argentíferas, quando existem teores de Cu elevados.

A distribuição das razões isotópicas do Pb evidencia uma mistura de chumbos de origens distintas. Os valores obtidos para algumas amostras de Conimbriga (Aquaduto), Augusta Emerita, Fuente Seca e Arucci/Turobriga sugerem matérias-primas provenientes de depósitos mineiros da Serra Morena e/ou da Zona da Ossa Morena misturadas com minérios da Faixa Piritosa Ibérica. As restantes amostras indiciam o uso de chumbo obtido na redução de diversos tipos de galena, provavelmente provenientes da Serra Morena e Zona da Ossa Morena. Os dados obtidos neste estudo demonstram que a reciclagem do chumbo durante o Império Romano foi extremamente utilizada. Por outro lado, a redução de minérios de chumbo (galenas) e a redução do litargírio, resultante da copelação da prata proveniente da exploração das jazidas argentíferas da Faixa Piritosa Ibérica, foram processos comumente aplicados para a obtenção do chumbo metálico. Assim,

o chumbo utilizado na *Lusitania* e, também, na *Baetica* deverá ter tido a sua origem, não só na Faixa Piritosa Ibérica, mas também em duas outras grandes zonas geológicas, Zona de Ossa-Morena e Zona Centro Ibérica (Serra Morena), isto é, rotas comerciais com origem na *Tarraconensis* e na *Baetica* forneceriam o metal utilizado nos grandiosos sistemas hidráulicos romanos do Ocidente e Sul peninsulares.

### Agradecimentos

Este estudo integrou-se no plano de doutoramento de Susana Sousa Gomes subsidiado pela Fundação para a Ciência e para

a Tecnologia, SFRH/BD/88002/2012. Os autores do C<sup>2</sup>TN/IST agradecem o financiamento à FCT através do projecto UID/Multi/04349/2019 e RNEM – Portuguese Mass Spectrometry Network (LISBOA-01-0145-FEDER-402-022125). Os agradecimentos são também dirigidos a José Ruivo e Pedro Sales (Museu Monográfico de Coimbra) Luis Hidalgo (Consórcio de Mérida), Josefina Melina (Museu Nacional de Arte Romana de Mérida), Nieves Medina Rosales (Museu de Aroche) e Aquilino Delgado Domínguez (Museu de Rio Tinto) por terem dedicado parte do seu tempo disponibilizando os diversos artefactos de chumbo e apoiando na recolha de amostras.

### Bibliografia citada

ALARCÃO, Jorge de (1988) – *Roman Portugal. Fasc 2 Coimbra & Lisboa. 2*, Warminster: Aris & Phillips Ltd, pp. 89–142.

ÁLVAREZ MARTÍNEZ, José María (2015) – La ideología de Principado en la fundación de Augusta Emerita. In GARCÍA SÁNCHEZ, Jorge; MAÑAS ROMERO, Irene; SALCEDO GARCÉS, Fabiola, eds. – “*Navigare necesse est*”: estudios en homenaje a José María Luzón Nogué. Madrid: Universidad Complutense, pp. 50–63.

ASDERAKI, Eleni; REHREN, Thilo (2006) – The lead metal from two Hellenistic towns in east central Greece. In PÉREZ ARANTEGUI, Josefina, ed. – *34th International Symposium on Archaeometry, Zaragoza, 3–7 May 2004*. Zaragoza: Institución Fernando El Católico, pp. 131–136.

BARATA, Maria Filomena (1988) – Miróbriga: sua valorização e caracterização. *Anales de Arqueología Cordobesa*. 9, pp. 59–129.

BARATA, Maria Filomena (2010) – Caracterização geral de Mirobriga. In NOGALES BASARRATE, Trinidad, ed. – *Ciudad y foro en Lusitania Romana / Cidade e foro na Lusitânia Romana*. Mérida: Museo Nacional de Arte Romano, pp. 201–230.

BRILL, Robert H.; WAMPLER, Jesse Marion (1967) – Isotope studies of ancient lead. *American Journal of Archaeology*. 71, pp. 63–77.

CANO ORTIZ, Ana Isabel; ACERO PÉREZ, Jesús (2004) – Los usos del plomo en la ingeniería hidráulica romana. El caso de Augusta Emerita. *Memoria*. 7, pp. 381–396.

CRADDOCK, Paul T. (1995) – *Early metal mining and production*. Cambridge: Cambridge University Press.

CRADDOCK, Paul T.; FREESTONE, Ian C.; HUNT ORTIZ, Mark (1987) – Recovery of silver from speiss at Rio Tinto (SW Spain). *IAMS Newsletter*. 10–11, pp. 8–11.

CORREIA, Virgílio Hipólito (2013) – *A Arquitectura doméstica de Conimbriga e as estruturas económicas e sociais da cidade romana*. Coimbra, CEALUCP/DGPC/LAC.

EDMONDSON, Jonathan C. (1989) – Mining in the Later Roman Empire and beyond: continuity or disruption? *The Journal of Roman Studies*. 79, pp. 84–102.

FABIÃO, Carlos (2014) – La Lusitania: una provincia romana atlántica. In ÁLVAREZ MARTÍNEZ, José María; NOGALES BASARRATE, Trinidad; RODÀ DE LLANZA, Isabel, eds. – *Actas del XVIII Congreso Internacional de Arqueología Clásica. Vol 2*. Mérida: Museo Nacional de Arte Romano, pp. 1657–1664.

GALE, Noël H.; STOS-GALE, Zofia Anna; DAVIS, Jack L. (1984) – The provenance of lead used at Ayia Irini, Keos. *Hesperia*. 53:4, pp. 389–406.

GAUB, Roland (2016) – *Zambujal und die Anfänge der Metallurgie in der Estremadura (Portugal). Technologie der Kupfergewinnung, Herkunft des Metalls und soziokulturelle Bedeutung der Innovation*. Tübingen: Wasmuth.

GOMES, Susana Sousa (2018) – *O chumbo no Ocidente Peninsular em Época Romana: proveniência e técnicas metalúrgicas*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Doutor em Conservação e Restauro do

Património, especialidade em Ciências da Conservação. Faculdade de Ciências e Tecnologia: Universidade NOVA de Lisboa.

GOMES, Susana Sousa; ARAÚJO, Maria Fátima; SOARES, António M. Monge; PIMENTA, João; MENDES, Henrique (2018) – Lead provenance of Late Roman Republican artefacts from Monte dos Castelinhos archaeological site (Portugal): insights from elemental and isotopic characterization by ICP-MS. *Microchemical Journal*. 141, pp. 337–345.

HAUPTMANN, Andreas (2007) – *The archaeometallurgy of copper: evidence from Faynan, Jordan*. Heidelberg; Berlin: Springer.

HUNT ORTIZ, Mark A. (2003) – *Prehistoric mining in metallurgy in south west Iberian Peninsula*. In: BAR International Series 1188, Archaeopress, Oxford.

KULEFF, Ivelin; ILIEV, Ilian; PERNICKA, Ernst; GERGOVA, Diana (2006) – Chemical and lead isotope compositions of lead artefacts from ancient Thracia (Bulgaria). *Journal of Cultural Heritage*. 7, pp. 244–256.

L'HÉRITIER, Maxime; BARON, Sandrine; CASSAYRE, Laurent; TÉREYGEOL, Florian (2015) – Bismuth behaviour during ancient processes of silver-lead production. *Journal of Archaeological Science*. 57, pp. 56–68.

MARCOUX, Eric (1998) – Lead isotope systematics of the giant massive sulphide deposits in the Iberian Pyrite Belt. *Mineralium Deposita*. 33, pp. 45–58.

MARQUES DE SÁ, Carlos; NORONHA, Fernando; FERREIRA DA SILVA, Eduardo (2014) – Factor analysis characterization of minor element contents in sulfides from Pb-Zn-Cu-Ag hydrothermal vein deposits in Portugal. *Ore Geology Reviews*. 62, pp. 54–71.

MASSART, Desiré Luc; VANDEGINSTE, Bernard Gabriel Marie; DEMING, Stanley N.; MICHOTTE, Yvette; KAUFMAN, Leonard (1988) – *Chemometrics: a textbook*. Vol. 2. Amsterdam: Elsevier.

MEDINA ROSALES, Nieves (2009) – El espacio termal de la ciudad hispanorromana de Turobriga (Aroche, Huelva). In PÉREZ MACÍAS, Juan Aurelio; ROMERO BOMBA, Eduardo, eds. – *IV Encuentro de Arqueología del Suroeste Peninsular (Aracena, 2008)*. Huelva: Universidad, pp. 1011–1033.

MEDINA ROSALES, Nieves (2015) – *Fistulae aquariae de la Colección Arqueológica de Aroche (Huelva-España)*. In MEDINA ROSALES, Nieves, ed. – *VII Encuentro de Arqueología del Suroeste Peninsular: Aroche-Serpa, 29, 30 de noviembre, y de diciembre de 2013*. Aroche: Ayuntamiento, pp. 869–888.

MONTERO RUIZ, Ignacio; GENER, Marc; HUNT ORTIZ, Mark; RENZI, Martina; ROVIRA LLORENS, Salvador (2008) – Caracterización analítica de la producción metalúrgica protohistórica de plata en Cataluña. *Revista d'Arqueologia de Ponent*. 18, pp. 292–316.

MONTERO RUIZ, Ignacio; GENER, Marc; RENZI, Martina; CASTANYER MASOLIVER, Pere; SANTOS RETOLAZA, Marta; HUNT ORTIZ, Marcos; MATA PERELLÓ, Josep Maria; PONS BRUN, Enriqueta; ROVIRA LLORENS, Salvador; ROVIRA HORTALÁ, Carmen; SANTOS ZALDUEGUI, José Francisco (2009) – Lead and silver metallurgy in Emporion (L'Escala, Girona, Spain). In *Proceedings of the 2nd International Conference Archaeometallurgy in Europe*, Aquileia, 17–21 June 2007. Milano: Associazione Italiana di Metallurgia, pp. 423–434.

NOGALES BASARRATE, Trinidad; ÁLVAREZ MARTÍNEZ, José María (2013) – Augusta Emerita: reflexiones acerca de sus primeros tempos. In CID LÓPEZ, Rosa María, GARCÍA FERNÁNDEZ, Estela, eds. – *Debita verba: estudios en homenaje al profesor Julio Mangas Manjarrés*. Oviedo: Universidad, pp. 53–73.

NOGALES BASARRATE, Trinidad; ÁLVAREZ MARTÍNEZ, José María (2014) – Colonia Augusta Emerita. Creación de una ciudad en tempos de Augusto. *Studia Historica, Historia Antigua*. 32, pp. 209–247.

PALERO FERNÁNDEZ, Fernando J.; MARTÍN-IZARD, Agustín (2005) – Trace element contents in galena and sphalerite from ore deposits of the Alcuña Valley mineral field (Eastern Sierra Morena, Spain). *Journal of Geochemical Exploration*. 86, pp. 1–25.

PÉREZ MACÍAS, Juan Aurelio; DELGADO DOMÍNGUEZ, Aquilino (2007) – Tecnología metalúrgica en Riotinto y Suroeste Ibérico desde la Edad del Bronce hasta la Edad Media. In *Agricola. Colloque d'Annaberg-Buchholz (Allemagne, 21–23 juin 2007)*. Conseil Général du Val du Marne, pp. 281–308.

PERNICKA, Ernst (2014) – Provenance determination of archaeological metal objects. In ROBERTS, Benjamin W.; THORNTON, Christopher P., eds. – *Archaeometallurgy in global perspective*. New York, NY: Springer, pp. 239–268.

REIS, Maria Pilar (2014) – *De Lusitaniae urbium Balneis. Estudo sobre as termas e balneários das cidades da Lusitânia*. Vol. I. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Doutor na Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.

REIS, Maria Pilar; DE MAN, Adriaan; CORREIA, Virgílio Hipólito (2011) – Conimbriga. In REMOLÀ VALLVERDÚ, Josep A.; ACERO PÉREZ, Jesús, eds. – *La gestión de los residuos urbanos en Hispania*. Madrid: CSIC, pp. 181–202.

RODÀ DE LLANZA, Isabel (2007) – El metal y el agua. *Sautuola*. 13, pp. 301–319.

ROHL, Brenda; NEEDHAM, Stuart (1998) – *The circulation of metal in the British Bronze Age: the application of lead isotope analysis*. London: British Museum.

ROTHENBERG, Beno; BLANCO FREIJEIRO, Antonio (1981) – *Studies in ancient mining and metallurgy in south-west Spain: explorations and excavations in the province of Huelva*. London: Institute for Archaeo-Metallurgical Studies; Thames and Hudson.

SANTOS ZALDUEGUI, José F.; GARCÍA DE MADINABEITIA, Sonia; GIL IBARGUCHI, José I.; PALERO FERNÁNDEZ, Fernando J. (2004) – A lead isotope database: the Los Pedroches – Alcudia área (Spain); implications for archaeometallurgical connections across Southwestern and Southeastern Iberia. *Archaeometry*. 46:4, pp. 625–634.

STOS-GALE, Zofia Anna; GALE, Noël H. (1982) – The sources of Mycenaean silver and lead. *Journal of Field Archaeology*. 9, pp. 467–485.

STOS-GALE, Zofia Anna; GALE, Noël H. (2009) – Metal provenancing using isotopes and the Oxford archaeological lead isotope database (OXALID). *Archaeological Anthropological Science*. 1:3, pp. 195–213.

STOS-GALE, Zofia Anna; GALE, Noël H.; HOUGHTON, Judy; SPEAKMAN, Robert (1995) – Lead isotope data from the Isotracer Laboratory, Oxford: Archaeometry Data Base 1, ores from the Western Mediterranean. *Archaeometry*. 37:2, pp. 407–415.

TRINCHERINI, Pier Renato; BARBERO, Pietro; QUARATI, Piero; DOMERGUE, Claude; LONG, Lianghuo (2001) – Where do the lead ingots of the Saintes-Maries-de-la-Mer wreck come from? Archaeology compared with physics. *Archaeometry*. 43:3, pp. 393–406.

TORNOS, Fernando; CHIARADIA, Massimo (2004) – Plumbotectonic evolution of the Ossa Morena zone, Iberian Peninsula: tracing the influence of mantle-crust interaction in ore-forming processes. *Economic Geology*. 99, pp. 965–985.

VILLASECA GONZÁLEZ, Carlos; LÓPEZ GARCIA, José Ángel; BARBERO GONZÁLEZ, Luis (2005) – Estudio de la composición isotópica (Pb-S-O) de las mineralizaciones Pb-Zn de Mazarambroz (Banda Milonítica de Toledo). *Geogaceta*. 38, pp. 271–274.