



ARTICLE

Tons de fogo: estudo experimental sobre alterações térmico-induzidas em dentes humanos soltos

Márcia Gouveia^{a*}, Inês Oliveira-Santos^{b,c}, Ana Luísa Santos^{a,b}, David Gonçalves^{b,c,d}

^aDepartamento de Ciências da Vida, Universidade de Coimbra, Calçada Martim Freitas, 3000-456, Coimbra, Portugal.

^bCIAS - Centro de Investigação em Antropologia e Saúde, Departamento de Ciências da Vida, Universidade de Coimbra. Calçada Martim Freitas, 3000-456, Coimbra, Portugal.

^cCentro de Ecologia Funcional, Laboratório de Antropologia Forense, Departamento de Ciências da Vida, Universidade de Coimbra, Calçada Martim Freitas, 3000-456, Coimbra, Portugal.

^dLaboratório de Arqueociências, Direção Geral do Património Cultural e LARC/CIBIO/InBIO, Rua da Bica do Marquês 2, 1300-087 Lisboa, Portugal.

*Corresponding author: marciagou_20@hotmail.com

Artigo recebido a 14 de Abril de 2016 e aceite a 27 de Julho de 2016

RESUMO

Os bioantropólogos são frequentemente solicitados para analisar vestígios humanos queimados, recuperados tanto de contextos arqueológicos como forenses. Os dentes estão entre as peças esqueléticas que melhor resistem à fragmentação e podem, por isso, ser vitais para a compreensão do contexto e das condições da queima. O objetivo deste trabalho é documentar as alterações térmico-induzidas em dentes humanos experimentalmente expostos a diferentes temperaturas (400°C, 700°C e 900°C), nomeadamente as que se referem à cor, às fraturas e à massa. Entre os dentes cedidos por pacientes de clínicas dentárias após extração médica, foram selecionadas três subamostras de dentes permanentes: 10 incisivos centrais superiores, 10

primeiros molares superiores e 10 segundos pré-molares inferiores de indivíduos de sexo e idade conhecida. Os dentes foram limpos, pesados e queimados num forno elétrico Barracha K-3 trifásico 14A, recorrendo a incrementos de temperatura entre 3,3°C e 4,3°C por minuto. Assim, a temperatura máxima de queima das três subamostras foi obtida ao fim de 120, 210 e 240 minutos, respetivamente às três temperaturas investigadas. Verificou-se que as alterações da cor no cimento progrediram de um tom natural para preto-castanho escuro (400°C), cinza-azul claro (700° C) e para branco (900° C). Por sua vez, o esmalte mudou de um tom natural para bege (400°C), cinzento-claro (700°C) e para cinzento-escuro (900°C). O incremento da temperatura induzida levou, igualmente, ao aumento da densidade de fissuras e de perda de massa. A perda de massa ocorreu aparentemente até aos 700°C, temperatura a partir da qual se atenuou. Este estudo contribuiu para um melhor conhecimento das alterações que o calor provoca em dentes humanos soltos.

Palavras-chave: Antropologia Biológica; dentição permanente; mudanças térmico-induzidas; restos queimados; dentes extraídos.

ABSTRACT

Bioanthropologists are often required to examine burned human remains recovered from archaeological and forensic contexts. Thus, as teeth are often the skeletal parts that better resist to fragmentation, understanding their heat-induced changes is essential to infer about context and burning conditions. The aim of this work is to report heat-induced modifications, namely those related to colour, fractures and mass, in human teeth experimentally exposed to different temperatures (400°C, 700°C e 900°C) and attempt to better clarify these phenomena in dental tissues. From teeth donated by patients after medical extraction, three subsamples of permanent teeth were selected: 10 lower second pre-molars, 10 upper central incisors and 10 upper first molars – of individuals of known sex and age. The teeth were cleaned, weighted and experimentally burned in an electric muffled Barracha K-3 thriphasic 14A with temperature increments between 3.3° C and 4.3°C per minute. Maximum burning temperatures for the three samples were achieved after 120, 210 and 240 minutes, respectively. Cement colour alterations progressed from a natural-looking shade to black/dark-brown (400° C), light grey-brown (700° C) and white (900° C). In turn, the enamel colour changes progressed from a natural-looking shade to beige (400° C), light-grey (700° C) and dark-grey (900° C). Additionally, it was observed that temperature increments caused an increase in the number of fissures and in mass loss. In the latter, most of it seems to have happened at temperatures up to 700°C. Beyond this temperature, mass loss was mild. This investigation contributes to a better understanding of the effects of heat in human teeth.

Keywords: Biological Anthropology, permanent dentition, heat-induced changes, burned remains, extracted teeth.

Introdução

Vestígios humanos queimados são frequentemente recuperados de contextos arqueológicos e forenses ([Silva, 2007](#)), resultando respetivamente, de práticas funerárias baseadas na cremação ou em consequência de desastres naturais, acidentes ou crimes ([Sandholzer et al., 2014b](#)). Importa assim conhecer detalhadamente as alterações tafonómicas a que os dentes são sujeitos e que podem afetar o exame odontológico.

O objetivo deste trabalho é documentar as alterações térmico-induzidas que se manifestam ao nível da cor, das fraturas e da massa dos dentes humanos, contribuindo assim para uma melhor compreensão dos seus efeitos nos tecidos dentários. Os dentes em análise foram extraídos em clínicas dentárias, durante procedimentos médicos a pacientes de sexo e idade conhecidos. Posteriormente, os dentes foram expostos a diferentes temperaturas (400°C, 700°C e 900°C).

A temperatura elevada causa uma série de alterações nos tecidos duros, mas em contrapartida pode dar informações importantes sobre as circunstâncias da morte e da intensidade da combustão ([Sandholzer et al., 2014b](#); [Piga et al., 2009](#)). Por exemplo, as alterações macroscópicas induzidas pelo calor podem ajudar a inferir a temperatura máxima, a duração aproximada da queima e

o estado pré-queima dos restos humanos ([Piga et al., 2009](#); [Gonçalves et al., 2011](#); [Sandholzer et al., 2014b](#); [Vassalo et al., 2016](#)).

Os dentes representam uma componente muito importante de qualquer análise bioantropológica, não só pela sua resistência ([Andersen et al. 1995](#); [Kaushal et al., 2003](#); [2004](#); [Savio et al., 2006](#); [Fairgrieve, 2008](#); [Ferreira et al., 2008](#); [Rai et al., 2008](#); [Prabhu e Acharya, 2009](#); [Rani et al., 2009](#); [Ubelaker, 2009](#); [Karkhanis e Franklin, 2010](#); [Acharya et al., 2011](#); [Viciano et al., 2011](#); [Gocha e Schutkowski, 2013](#); [Shankar et al., 2013](#)), como pela capacidade de registar, durante a sua formação, e de forma permanente, os stresses físico-químicos sofridos pelo indivíduo ([Mayhall, 2000](#)). Além disso, proporcionam informações valiosas sobre a idade à morte ([Gustafson, 1950](#); [Smith, 1984](#); [Lamendin et al., 1992](#); [Cameriere et al., 2006](#); [Megyesi et al., 2006](#); [Dogaroiu et al., 2015](#); [Oliveira-Santos, 2015](#)), o sexo ([Garn et al., 1978](#); [Rösing, 1982](#); [Vodanovic et al., 2007](#); [Gonçalves et al., 2014](#); [Zorba et al., 2014](#); [Gouveia, 2015](#)) e a afinidade biológica dos indivíduos ([Yuen et al., 1996](#); [Hillson, 1998](#); [Mayhall, 2000](#); [Hillson, 2005](#); [Schoreder et al., 2012](#); [Wasterlain et al., 2016](#)).

O dente é constituído por uma coroa coberta por esmalte e uma raiz revestida por cimento ([Ten Cate, 1996](#); [Fairgrieve, 2008](#)). Estas duas áreas convergem na junção cimento-esmalte (JCE) ([Fairgrieve, 2008](#)). A superfície externa do esmalte é formada por uma camada fina, dita aprismática, e

homogénea, onde os cristais de hidroxiapatita são paralelos entre si ([Schmidt, 2008](#)). Na parte interna do dente, a maior porção da estrutura consiste na dentina que suporta o esmalte da coroa e o cimento da raiz ([Fairgrieve, 2008](#)). A coroa, quando sujeita a elevadas temperaturas, sofre fissuras devido ao aumento da pressão que a evaporação de água provoca entre o esmalte e a dentina ([Shipman et al., 1984](#); [Fairgrieve, 2008](#); [Schmidt, 2008](#); [Hill et al., 2011](#)). Por seu lado, a raiz contém menos água, não possui esmalte e está protegida pelos alvéolos dentários, por isso tende a fraturar-se menos ([Shipman et al., 1984](#); [Hill et al., 2011](#); [Fairgrieve, 2008](#); [Schmidt, 2008](#); [Zorba et al., 2014](#); [Sandholzer et al., 2014a](#)). Todavia, quando os dentes se encontram fora dos alvéolos, as condições de queima podem afetá-los de forma mais substancial resultando em fissuras igualmente características ([Schmidt \(2008\)](#); [Hill et al., 2011](#)). Ou seja, segundo [Schmidt \(2008\)](#), quando o esmalte é exposto ao calor intenso, a camada aprismática pode quebrar-se, expondo assim as camadas subjacentes (ver [Yamamoto et al., 1990](#) e [Muller et al., 1998](#) para mais detalhe). À medida que a temperatura e/ou a duração do fogo aumentam, essas camadas começam a degradar-se gradualmente até se tornarem amorfas ([Schmidt, 2008](#)). Posteriormente, a microestrutura do esmalte começa a rachar e as peças dentárias podem eventualmente soltar-se, mas o padrão geral da microestrutura permanece intacto ([Yamamoto et al., 1990](#)).

As alterações na cor, na densidade e forma das fissuras e na massa estão

intimamente relacionadas com a intensidade da queima ([Shipman et al., 1984](#); [DeHaan, 2008](#); [Fairgrieve, 2008](#); [Ubelaker, 2009](#); [Piga et al., 2009](#); [Bush e Bush, 2011](#); [Sandholzer et al., 2014b](#); [Gouveia, 2015](#)). O conhecimento mais pormenorizado destas alterações físico-químicas pode fornecer informações relevantes sobre as condições da queima ([Shipman et al., 1984](#); [Savio et al., 2006](#); [Ubelaker, 2009](#); [Karkhanis e Franklin, 2010](#); [Bush e Bush, 2011](#); [Sandholzer et al., 2014b](#); [Gouveia, 2015](#)).

Material e Métodos

Trinta dos 717 dentes permanentes de indivíduos adultos extraídos em consultórios odontológicos e doados à Universidade de Coimbra, após consentimento informado dos pacientes, foram usados nesta investigação (Ref. 108-CE-2014). De forma a documentar as alterações térmico-induzidas em função de três temperaturas diferentes (grupo 1 - 400° C; grupo 2 - 700° C; grupo 3 - 900° C), as peças dentárias foram divididas em três subamostras de incisivos centrais superiores (ICS), primeiros molares superiores (M1S) e segundos pré-molares inferiores (PM2I) ([Tabela 1](#)). Por condicionantes da amostra, não foi possível constituir grupos com o mesmo número de espécimes dentários. Os critérios de seleção dos dentes foram os seguintes: (1) não apresentarem altas taxas de variabilidade morfológica como é o caso de terceiros molares ([Fairgrieve, 2008](#); [Prabhu e Acharya, 2009](#); [Rani et al., 2009](#); [Gocha e Schutkowski, 2013](#)); (2) e terem, comparativamente com outros, menos

restauros, desgaste, cáries e/ou outras patologias. Além destas condicionantes, outros dentes da amostra foram

simultaneamente utilizados em outras investigações independentes desta e isso limitou o acesso a mais dentes.

Tabela 1 - Composição das três subamostras de incisivos centrais superiores, primeiros molares superiores e segundos pré-molares inferiores em função do sexo e da idade dos pacientes.

Tipo de dente	N	n Homens	n Mulheres	Idade (anos)
ICS	10	5	5	43-83
M1S	10	5	5	26-71
PM2I	10	5	5	15-91

Legenda: ICS = incisivos centrais superiores, M1S = primeiros molares superiores, PM2I = segundos pré-molares inferiores, N = tamanho da amostra total, n = número de mulheres ou homens.

O sexo e a idade de cada paciente foram documentados. Além disso, foram registadas a causa da extração dentária e eventuais patologias bucais associadas. Em laboratório, os dentes foram lavados cuidadosamente com água corrente e limpos com uma escova, de forma a eliminarem-se quaisquer vestígios de tecidos moles. Os depósitos de tártaro foram removidos, usando um raspador manual para não afetarem as pesagens.

As queimas foram realizadas numa mufla Barracha K-3 trifásica 14A. Os dentes de cada subamostra foram queimados ao mesmo tempo, de modo a garantir as mesmas condições de queima. Foram dispostos no

forno de forma registada, para não se perder a sua identificação. A temperatura máxima de queima do grupo 1 foi de 400°C, atingidos ao fim de 120 minutos. No grupo 2, a temperatura máxima de 700°C foi obtida ao fim de 210 minutos. No terceiro grupo, a temperatura máxima de 900°C foi atingida ao cabo de 240 minutos. Nestas queimas, o incremento da temperatura média foi de 4,4°C, 3,3°C e 4,3°C por minuto, respetivamente. A mufla foi então desligada e os dentes permaneceram no seu interior até atingirem a temperatura ambiente. Estas temperaturas e intervalos de tempo foram selecionados de modo a evitar a rutura das

coroas dentárias e para simular alguns cenários reais de exposição a elevadas temperaturas ([Shipman *et al.*, 1984](#); [Murray e Rose, 1993](#); [Thompson, 2005](#)). Posteriormente, procedeu-se à consolidação dos dentes com o acrílico PRIMAL SF-016 ER de forma a garantir a sua conservação e evitar danos adicionais, nomeadamente durante o manuseamento.

Avaliaram-se as alterações macroscópicas e as diferenças na massa em relação à duração e à temperatura do insulto térmico. Para esse efeito, uma descrição a olho nu das mudanças colorimétricas e da forma e orientação das fissuras, assim como um registo das pesagens de cada dente foram efetuados nas três subamostras de ICS, M1S e PM2I, antes e após a queima a 400°C, 700°C e 900°C, respetivamente.

Resultados

Alterações cromáticas térmico-induzidas

A alteração térmico-induzida na cor do cimento progrediu de um tom natural para predominantemente preto-castanho escuro (400°C), cinza-azul claro (700°C) e, finalmente, para branco (900°C) ([Figura 1](#)). Em relação ao esmalte, o tom progrediu de uma cor natural para bege (400°C), cinzento-claro (700°C) e, por último, para cinzento-escuro (900°C) ([Figura 1](#)). A raiz e coroa do mesmo dente apresentaram sempre colorações distintas.

É de salientar que, tanto no cimento como no esmalte, a sequência cromática evoluiu de forma semelhante nos dentes de cada subamostra.



Figura 1 - Alterações progressivas da cor induzidas pelo calor. Da esquerda para a direita: segundo pré-molar inferior direito não queimado; incisivo central superior direito queimado a 400°C; primeiro molar superior direito queimado a 700°C e segundo pré-molar inferior direito queimado a 900°C.

Alterações morfológicas térmico-induzidas

O esmalte permaneceu totalmente preservado e ligado à dentina no grupo

queimado a 400°C e parcialmente fragmentado e separado da dentina nos grupos 2 e 3 (Figura 2). No primeiro grupo, observaram-se pequenas fissuras longitudinais na coroa e na raiz (Figura 2Aa e 2Ab). No grupo 2, verificaram-se inúmeras fissuras longitudinais em toda a extensão dos dentes. No entanto, pequenas fissuras transversais foram encontradas na parte superior da JCE e da raiz (Figura 2Bc a 2Bf). Por fim, no grupo 3, os dentes tornaram-se mais frágeis e foram observadas inúmeras

fissuras longitudinais com predomínio de pequenas fissuras transversais em toda a extensão dos dentes (Figura 2Ch a 2Dm). Três dentes deste último grupo mostraram perda de integridade estrutural da coroa, devido ao grande encolhimento da raiz (JCE até ápex radicular). Apesar das fissuras e fragmentação resultantes das elevadas temperaturas, a morfologia geral do dente manteve-se relativamente bem preservada (Figura 2).

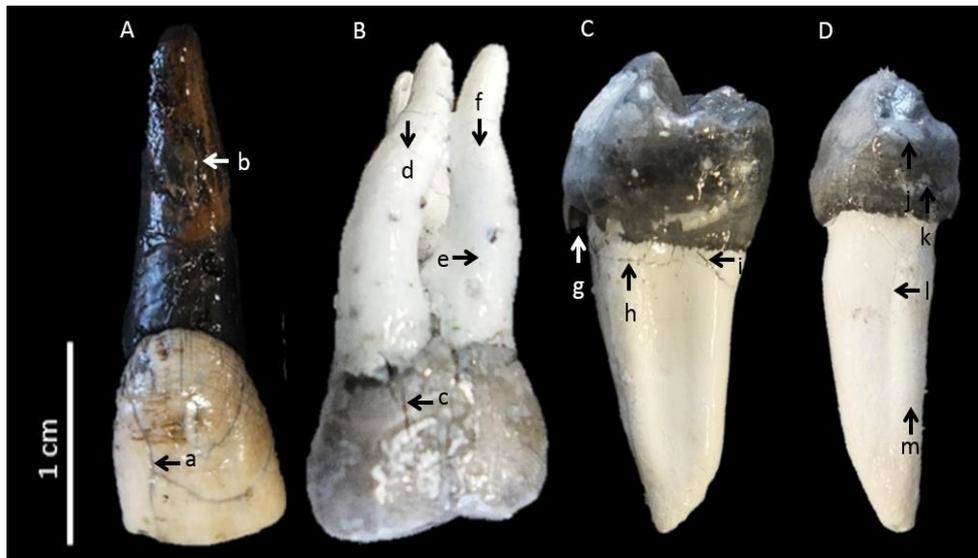


Figura 2 - Alterações progressivas da integridade estrutural induzidas pelo calor. (A) incisivo central superior direito queimado a 400°C, (B) primeiro molar superior direito queimado a 700°C, (C) segundo pré-molar inferior esquerdo queimado a 900°C e (D) segundo pré-molar inferior esquerdo queimado a 900°C. a, b: pequenas fissuras longitudinais presentes na região de coroa e raiz. c: fratura longitudinal. d, f: pequenas fissuras transversais. e: pequena fenda longitudinal. g: descolamento parcial do esmalte. h, i: fissuras longitudinais e transversais na região da JCE. j, k: fissuras longitudinais e transversais na região da coroa. l, m: fissuras longitudinais e transversais na região da raiz.

Variação térmico-induzida na massa dentária

A [Tabela 2](#) mostra a variação da massa dos dentes sujeitos a diferentes temperaturas. A redução foi, em média, superior nos grupos 2 e 3, sujeitos a temperaturas mais elevadas.

Porém, a diferença entre estes dois últimos grupos foi insignificante.

Tabela 2 - Variação média da massa em incisivos centrais superiores, primeiros molares superiores e segundos pré-molares inferiores sujeitos a três temperaturas diferentes (400°C, 700°C e 900°C, respetivamente).

	Temperatura		
	400°C (ICS)	700°C (M1S)	900°C (PM2I)
Massa pré-queima (g)	1,033	2,266	0,917
Massa pós-queima (g)	0,821	1,547	0,6475
Redução média (g)	0,21	0,72	0,27
Desvio Padrão da Redução média (g)	0,09	0,24	0,08
Redução média (%)	19,11	31,32	29,97

Legenda: ICS = incisivos centrais superiores, M1S = primeiros molares superiores, PM2I = segundos pré-molares inferiores.

Discussão

Num contexto de queima, os dentes são frequentemente as peças esqueléticas que melhor resistem às elevadas temperaturas ([Kaushal et al., 2003](#); [2004](#); [Savio et al., 2006](#); [Karkhanis e Franklin, 2010](#); [Acharya et al., 2011](#); [Viciano et al., 2011](#); [Gocha e Schutkowski, 2013](#)), pelo que constituem um alvo basilar das análises bioantropológicas. Assim, a compreensão das suas alterações térmico-induzidas é vital para uma análise

fiável das condições em que o processo de queima ocorreu.

Os estudos sobre o processos de queima de ossos humanos revelam que, uma vez expostos à ação do fogo, a elevada temperatura degrada, e eventualmente elimina, os componentes orgânicos, tais como o colagénio, as proteínas e os lípidos, preservando-se apenas a estrutura inorgânica (para mais informações, consultar [Silva, 2007](#); [Gonçalves, 2011](#)). Com os dentes, o processo não é muito diferente. Segundo

[Shipman e colaboradores \(1984\)](#), os ossos e dentes expostos a incrementos graduais de temperatura atravessam diversos estádios, nomeadamente desidratação, oxidação, redução, inversão, decomposição e fusão. A desidratação ocorre em temperaturas na ordem dos 105°C a 600°C, fruto da quebra de ligações de hidróxido nos cristais de hidroxiapatita e da remoção das moléculas de água ([Shipman *et al.*, 1984](#); [Ellingham *et al.*, 2015](#)). Entre os 360°C e os 525°C, ocorre a decomposição do componente orgânico ([Shipman *et al.*, 1984](#)). Por volta dos 600°C a 700°C, o osso é reduzido à sua fase mineral devido à combustão do carbono residual dos elementos orgânicos ([Shipman *et al.*, 1984](#); [Ellingham *et al.*, 2015](#)). Perante temperaturas superiores aos 800°C, a estrutura da hidroxiapatita é alterada, o que pode acarretar alterações na sua dimensão na ordem dos 30% ([Thompson, 2005](#); [Gonçalves, 2011](#); [Gouveia, 2015](#)), como consequência, respetivamente, da recristalização e fusão dos cristais ([Grupe e Hummel, 1991](#)). Estas alterações a nível microscópico refletem-se nas alterações macroscópicas e na massa observáveis no esqueleto ([Thompson, 2004](#)).

Neste estudo, registaram-se alterações cromáticas no cimento e no esmalte dentários semelhantes às documentadas em outras investigações ([Bush e Bush, 2011](#); [Taylor *et al.*, 2002](#); [Ferreira *et al.*, 2008](#); [Woisetschläger *et al.*, 2011](#); [Gocha e Schutkowski, 2013](#); [Sandholzer *et al.*, 2013](#); [2014a](#); [2014b](#)). A coloração negra da raiz nos dentes queimados a 400°C, em contraste com a coloração clara do esmalte pode eventualmente ser explicada pelos conteúdos distintos de matéria orgânica nas

duas estruturas. Provavelmente, a sua decomposição resultou em alterações cromáticas distintas. A inversão cromática entre a coroa e a raiz, a que assistimos a temperaturas mais elevadas, ocorreu em condições onde a componente orgânica era previsivelmente já muito reduzida ou mesmo inexistente. Será seguro dizer que a razão para essa inversão não está por isso relacionada com o conteúdo orgânico. Infelizmente, não possuímos informações suficientes para apontar uma causa específica para este fenómeno.

De acordo com estudos anteriores, se o calor é intenso e rápido, a evaporação diferencial nos vários componentes do dente leva à “explosão” da coroa e/ou à separação do esmalte, permitindo, deste modo, a queima e a fragmentação da dentina ([Purves, 1975](#); [Myers *et al.*, 1999](#); [Merlati, *et al.*, 2002](#); [Taylor *et al.*, 2002](#); [Hughes e White, 2009](#); [Sandholzer *et al.*, 2013](#); [2014a](#)). Com efeito, isso não se verificou em grande parte da amostra em análise. Uma possível explicação será porque se optou por um incremento de, aproximadamente 4°C por minuto - bem mais reduzido do que o utilizado por outros autores ([Savio *et al.*, 2006](#); [Ferreira *et al.*, 2008](#); [Woisetschläger *et al.*, 2011](#)). Aparentemente, se um dente é sujeito a incrementos de temperatura baixos, a água evapora-se lentamente e os danos na estrutura dentária são menores.

Verificou-se ainda que a densidade de fissuras foi proporcional ao aumento da temperatura (sem deformação visível na morfologia geral do dente). [Piga e colaboradores \(2009\)](#) e [Sandholzer e colaboradores \(2014b\)](#) obtiveram resultados

idênticos. Segundo estes autores, as alterações microscópicas podem ser utilizadas para deduzir uma temperatura aproximada, enquanto as alterações microscópicas e ultra-estruturais do tecido dentário térmico-induzidas – por exemplo, por meio de difração de Raio-X e microtomografia quantitativa - são cruciais para obter uma estimativa mais fiável da temperatura. É provável que outras variáveis como a duração da queima, o conteúdo de colagénio ou de água tenham também um efeito significativo na ocorrência das alterações térmico-induzidas aqui examinadas em maior pormenor. A eventual utilização dos resultados obtidos neste estudo como referência para a estimativa da temperatura máxima que incidiu sobre dentes deve ser realizada de forma cautelosa. Fatores como o rápido aumento da temperatura, o arrefecimento devido a agentes de extinção de incêndios ou a presença de contaminantes não foram tidos em conta na presente pesquisa, mas podem também ter efeitos importantes no estado de conservação dos dentes ([Purves, 1975](#); [Savio et al., 2006](#); [Gocha e Schutkowski, 2013](#); [Sandholzer et al., 2013](#); [2014a](#); [2014b](#)).

Um argumento é frequentemente avançado para reforçar a necessidade de uma abordagem cautelosa quando se extrapolam as conclusões obtidas em investigações experimentais como a que é aqui apresentada: dentes isolados dos alvéolos dentários não replicam todos os contextos nos quais os restos humanos são encontrados. Vários autores afirmam que a raiz, sem a proteção proporcionada pelos alvéolos e pelos tecidos moles, tende a

fraturar-se menos ([Shipman et al., 1984](#); [Hill et al., 2011](#); [Fairgrieve, 2008](#); [Schmidt, 2008](#); [Zorba et al., 2014](#); [Sandholzer et al., 2014a](#)). Esta constatação é relativamente simplista visto que centra a discussão numa falsa premissa: a de que essa proteção é impeditiva da formação de fraturas. Teoricamente, um dente *in situ* sujeito às mesmas intensidades de queima, em particular à mesma temperatura e duração, que um dente isolado deverá apresentar as mesmas alterações visto que estas são dependentes de transformações microscópicas causadas pela degradação térmico-induzida que, por sua vez, são independentes da eventual proteção fornecida por outros tecidos. É por isso que as fraturas e a coloração térmico-induzida têm, pelo menos no caso de dentes *in situ*, potencial para auxiliar a estimar apenas a temperatura mínima a que o dente foi sujeito e não a temperatura máxima a que o corpo foi sujeito.

A perda de massa induzida pelo calor ocorre principalmente durante as fases de desidratação e decomposição como resultado da remoção da água e eliminação da composição orgânica ([Shipman et al., 1984](#); [Fairgrieve, 2008](#); [Schmidt, 2008](#); [Hill et al., 2011](#)). Existem várias investigações experimentais focadas na perda de massa óssea induzida pelo calor ([Grupe e Hummel, 1991](#); [Person et al., 1996](#); [Munro et al., 2007](#)). Porém, são raras as que fazem referência à perda de massa dentária ([Person et al., 1996](#); [Piga et al., 2009](#)). O presente estudo, revela um aumento na perda de massa que está sensivelmente relacionado com o incremento de temperatura. Estes

resultados devem ser interpretados com alguma cautela, visto que foram obtidos a partir de três grupos de dentes de diferentes tipologias (ICS a 400°C, M1S a 700°C e PM2I a 900°C). Inclusivamente, diferenças entre eles, por exemplo na composição orgânica e inorgânica e ao nível da proporção das suas estruturas (esmalte vs. dentina) podem ter afetado de alguma forma os nossos resultados. De notar que entre os 700°C e os 900°C, a perda de massa foi insignificante. Resultados semelhantes foram encontrados em estudos anteriores referentes à perda de massa óssea. [Grupe e Hummel \(1991\)](#) observaram uma redução acelerada da massa até aos 200-300°C. A partir dos 400°C até aos 900°C, a perda de massa foi mais lenta e pouco substancial. [Person e colaboradores \(1996\)](#) obtiveram resultados idênticos, tendo observado uma redução de 33% até 400°C e de apenas 5% a partir desta temperatura até aos 700°C. Também [Munro e colaboradores \(2007\)](#) registaram perda de massa de 40% até aos 450°C e perda adicional de 3% até aos 900°C. Atendendo aos resultados auferidos por diferentes estudos, parece ser consensual que a maior redução térmico-induzida da massa dentária e óssea ocorre, aparentemente, a baixas temperaturas.

Conclusão e perspectivas futuras

Os investigadores na área da antropologia biológica dedicam cada vez mais recursos a examinar e a avaliar a complexa natureza dos dentes humanos e os processos tafonómicos que os afetam. A presente investigação resultou em informações úteis sobre as

alterações cromáticas, a frequência de fissuras e a perda de massa de dentes sujeitos a diferentes temperaturas. A utilidade destes dados estende-se ainda a contextos envolvendo restos humanos queimados fragmentados ou incompletos, podendo ajudar a inferir acerca da intensidade da queima, da condição pré-queima dos dentes ou contribuindo para exames bioantropológicos mais fiáveis que tenham por base a variação da massa.

Em estudos futuros sobre as alterações térmico-induzidas em dentes humanos, poderá ser vantajoso combinar as observações macroscópicas utilizadas neste trabalho, com outras técnicas, como por exemplo a difração de Raio-X (XRD) ([Piga *et al.*, 2009](#)) e a microtomografia quantitativa (micro-CT) ([Thompson *et al.*, 2013](#)), de forma a determinar com maior exatidão a que temperatura os dentes foram sujeitos. Pouca variabilidade foi encontrada nas sub-amostras, demonstrando que os resultados são consistentes. Porém, subamostras substancialmente maiores e com o mesmo tipo de dentes deverão idealmente ser utilizadas de forma a conferir maior fiabilidade aos resultados.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a todos os doadores e dentistas que colaboraram nesta pesquisa. Um agradecimento também à Doutora Sofia Wasterlain cuja experiência sobre a dentição humana foi de grande valor para esta pesquisa. Agradecemos ainda aos Departamentos de Ciências da Vida e de Gestão de Saúde e Segurança da Universidade de Coimbra, aos Serviços Sociais e à Biblioteca das Ciências da

Saúde. David Gonçalves foi financiado através de bolsa de investigação de pós-doutoramento (SFRH/BPD/84268/2012) da Fundação para a Ciência e Tecnologia. Este trabalho é financiado por parte da FCT/MEC através de fundos nacionais e pelo cofinanciamento pelo FEDER, no âmbito do Acordo de Parceria PT2020 e COMPETE 2020, no âmbito do projeto UID/ANT/00283/2013. Gostaríamos de agradecer pelos valiosos comentários resultantes da revisão feita ao primeiro manuscrito.

Bibliografia

- Acharya, A.B.; Angadi, P.V.; Prabhu, S.; Nagnur, S. 2011. Validity of the mandibular canine index (MCI) in sex prediction: reassessment in an Indian sample. *Forensic Science International*, 204: 207.e1–207.e4.
- Andersen, L.; Juhl, M.; Solheim, T. 1995. Odontological identification of fire victims-potentialities and limitations. *International Journal of Legal Medicine*, 107: 229-234.
- Bush, P.J.; Bush, M.A. 2011. The next level in victim identification: Materials properties as an aid in victim identification. In: Bowers, C.M. (ed.) *Forensic Dental Evidence*. London, Academic Press: 55-72.
- Cameriere, R.; Brogi, G.; Ferrante, L.; Mirtella, D.; Vultaggio, C.; Cingolani, M.; Fornaciari, G. 2006. Reliability in age determination by pulp/tooth ratio in upper canines in skeletal remains. *Journal of Forensic Sciences*, 51: 861-864.
- DeHaan, J.D. 2008. Fire and bodies. In: Schmidt, C.W.; Symes, S.A. (eds.) *The analysis of burned human remains*. London, Academic Press: 1-14.
- Dogaroiu, C.; Cosma, A.; Gherghe, E.; Morosanu, G.; Avramoiu, M. 2015. Age estimation in subadults using teeth eruption examination. *Romanian Journal of Legal Medicine*, 23: 49-56.
- Ellingham, S.T.D.; Thompson, T.J.U.; Islam, M. 2015. Thermogravimetric analysis of property changes and weight loss in incinerated bone. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 438: 239-244.
- Fairgrieve, S.F. 2008. *Forensic cremation: recovery and analysis*. Boca Raton, CRC press.
- Fereira, J. L.; Fereira, Á. E.; Ortega, A. I. 2008. Methods for the analysis of hard dental tissues exposed to high temperatures. *Forensic Science International*, 178: 119-124.
- Garn, S.M.; Van Alstine, W.L.; Cole, P.E. 1978. Relationship between root lengths and crown diameters of corresponding teeth. *Journal of Dental Research*, 57: 636.
- Gocha, T. P.; Schutkowski, H. 2013. Tooth cementum annulation for estimation of age-at-death in thermally altered remains. *Journal of Archaeological Science*, 58: 151-155.
- Gonçalves, D. 2011. *Cremins: The value of quantitative analysis for the bioanthropological research of burned human skeletal remains*. Dissertação de Doutoramento em Antropologia Biológica, Departamento de Ciências da Vida, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra.
- Gonçalves, D.; Granja, R.; Cardoso, F.; Carvalho, A. 2014. Sample-specific sex estimation in archaeological contexts with commingled human remains: a case study from the Middle Neolithic cave of Bom Santo in Portugal. *Journal of Archaeological Science*, 49: 185-191.
- Gouveia, M. 2015. *Avaliação do potencial da odontometria para a diagnose sexual em vestígios humanos queimados*. Dissertação de Mestrado em Evolução e Biologia Humanas, Departamento de Ciências da Vida, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra.
- Grupe, G.; Hummel, S. 1991. Trace element studies on experimentally cremated bone. I. Alteration of the chemical composition at high temperatures. *Journal of Archaeological Science*, 18: 177-186.
- Gustafson, G. 1950. Age determination on teeth. *The Journal of the American Dental Association*, 41: 45-54.
- Hill, A.J.; Lain, R.; Hewson, I. 2011. Preservation of dental evidence following exposure to high temperatures. *Forensic Science International*, 205: 40-43.
- Hillson, S. 1998. Crown diameters, tooth crown development, and environmental factors in growth. In: Marks, M.K. (ed.) *Human dental development, morphology and pathology: A tribute of Albert A. Dahlberg*. University of Oregon, Eugene, OR: 17-28.
- Hillson, S. 2005. *Teeth*. Cambridge, Cambridge University Press: 257-285.
- Hughes, C.E.; White, C.A. 2009. Crack Propagation in Teeth: A comparison of perimortem and postmortem behavior of dental materials and cracks. *Journal of Forensic Sciences*, 54: 263-266.

- Karkhanis, S.; Franklin, D. 2010. Macroscopic and microscopic changes in incinerated deciduous teeth. *Journal of Forensic Odonto-Stomatology*, 27: 9–19.
- Kaushal, S.; Patnaik, V.V.G.; Agnihotri, G. 2003. Mandibular canines in sex determination. *Journal of the Anatomical Society of India*, 52: 119-124.
- Kaushal, S.; Patnaik, V.V.G.; Sood, V.; Agnihotri, G. 2004. Sex determination in North Indians using mandibular canine index. *Journal of Indian Academy of Forensic Medicine*, 26: 0971-0973.
- Lamendin, H.; Baccino, E.; Humbert, J.F.; Tavernier, J.C.; Nossintchouk, R.M.; Zerilli, A. 1992. A simple technique for age estimation in adult corpses: the two criteria dental method. *Journal of Forensic Sciences*, 37: 1373-1379.
- Mayhall, J.T. 2000. Dental morphology: techniques and strategies. In: Katzenberg, M.A.; Saunders, R.S. (eds.) *Biological anthropology of the human skeleton*. New York, Wiley-Liss: 103-130.
- Megyesi, M.S.; Ubelaker, D.H.; Sauer, N.J. 2006. Test of the Lamendin aging method on two historic skeletal samples. *American Journal of Physical Anthropology*, 131(3): 363-367.
- Merlati, G.; Danesino, P.; Savio, C.; Fassina, G.; Osculati, A.; Menghini, P. 2002. Observations of dental prostheses and restorations subjected to high temperatures: Experimental studies to aid identification processes. *The Journal of Forensic Odonto-stomatology*, 20: 17-24.
- Muller, M.; Berytrand, M.F.; Quatrehomme, G. 1998. Macroscopic and microscopic aspects of incinerated teeth. *Journal of Forensic Odontostomatology*, 16: 1–7.
- Munro, L.E.; Longstaffe, F.J.; White, C.D. 2007. Burning and boiling of modern deer bone: Effects on crystallinity and oxygen isotope composition of bioapatite phosphate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 249: 90 – 102.
- Murray, K.A.; Rose, J.C. 1993. The analysis of cremains: A case study involving the inappropriate disposal of mortuary remains. *Journal of Forensic Sciences*, 38: 98-103.
- Myers, S.L.; Williams, J.M.; Hodges, J.S. 1999. Effects of extreme heat on teeth with implications for histologic processing. *Journal of Forensic Sciences*, 44: 805-809.
- Oliveira-Santos, I. 2015. *Cimentocronologia: estimativa de idade-à-morte numa amostra de dentes queimados de indivíduos identificados portugueses*. Dissertação de Mestrado em Evolução e Biologia Humanas, Departamento de Ciências da Vida, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
- Piga, G.; Thompson, T.J.U.; Malgosa, A.; Enzo, S. 2009. The potential of X-Ray diffraction in the analysis of burned remains from forensic contexts. *Journal of Forensic Sciences*, 54: 534-539.
- Person, A.; Bocherens, H.; Mariotti, A.; Renard, M. 1996. Diagenetic evolution and experimental heating of bone phosphate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 126: 135-149.
- Prabhu, S.; Acharya, A.B. 2009. Odontometric sex assessment in Indians. *Forensic Science International*, 192: 129.e1-129.e5.
- Purves, J.D. 1975. Dental identification of fire victims. *Forensic Science*, 6: 217-219.
- Rai, B.; Dhattarwal, S.K.; Anand, S.C. 2008. Sex determination from tooth. *Medico-Legal Update*, 8: 3-5.
- Rani, R.M.P.; Mahima, V.G.; Patoil, K. 2009. Bucco-lingual dimension of teeth - An aid in sex determination. *Journal of Forensic Dental Sciences*, 1: 88-92.
- Rösing, F.W. 1982. Sexing immature human skeletons. *Journal of Human Evolution*, 12: 149-155.
- Sandholzer, M.; Walmsley, A.; Lumley, P.; Landini, G. 2013. Radiologic evaluation of heat-induced shrinkage and shape preservation of human teeth using micro-CT. *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, 1: 107-111.
- Sandholzer, M.A.; Baron, K.; Heimel, P.; Metscher, B.D. 2014a. Volume analysis of heat-induced cracks in human molars: A preliminary study. *Journal of Forensic Dental Sciences*, 6: 139-144.
- Sandholzer, M.A.; Sui, T.; Korsunsky, A.M.; Walmsley, A.D.; Lumley, P.J.; Landini, G. 2014b. X-ray scattering evaluation of ultrastructural changes in human dental tissues with thermal treatment. *Journal of Forensic Sciences*, 59: 769-774.
- Savio, C.; Merlati, G.; Danesino, P.; Fassina, G.; Menghini, P. 2006. Radiographic evaluation of teeth subjected to high temperatures: experimental study to aid identification processes. *Forensic Science International*, 158: 108-116.
- Schmidt, C.W. 2008. The recovery and study of burned human teeth. In: Schmidt, C.W.; Symes, S.A. (eds.) *The analysis of burned human remains*. London, Academic Press: 55-74.
- Schroeder, H.; Haviser, J.B.; Price, T.D. 2012. The Zoutsteeg three: Three new cases of African types of dental modification from Saint Martin, Dutch Caribbean. *International Journal of Osteoarchaeology*, 24(6): 688-696.
- Shankar, S.; Anuthama, K.; Kruthika, M.; Kumar, S.; Ramesh, K.; Jaheerdeen, A.; Yasin, M.M. 2013. Identifying sexual dimorphism in a paediatric South Indian population using

stepwise discriminant function analysis. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 20: 752-756.

Shipman, P.; Foster, G.; Schoeninger, M. 1984. Burnt bones and teeth: an experimental study of color, morphology, crystal structure and shrinkage. *Journal of Archaeological Science*, 11: 307-325.

Silva, F.C. 2007. Abordagem ao ritual funerário da cremação através da análise dos restos ósseos. *Al-Madan*, 11ª Série, 15: 40-48.

Smith, B.H. 1984. Patterns of molar wear in hunter-gatherers and agriculturalists. *American Journal of Physical Anthropology*, 63: 39-56.

Taylor, P.T.G.; Wilson, M.E.; Lyons, T.J. 2002. Forensic odontology lessons: multishooting incident at Port Arthur, Tasmania. *Forensic Science International*, 130: 174-182.

Ten Cate, A. R. 1996. The role of epithelium in the development, structure and function of the tissues of tooth support. *Oral Diseases*, 2: 55-62.

Thompson, T. J. U., 2004. Recent advances in the study of burned bone and their implications for forensic anthropology. *Forensic Science International*, 146: 203-205.

Thompson, T. J. U., 2005. Heat-induced dimensional changes in bone and their consequences for forensic anthropology. *Journal of Forensic Sciences*, 50: 1008-1015.

Thompson, T. J. U.; Islam, M.; Bonniere, M. 2013. A new statistical approach for determining the crystallinity of heat-altered bone mineral from FTIR spectra. *Journal of Archaeological Science*, 40: 416-422.

Ubelaker, D.H. 2009. The forensic evaluation of burned skeletal remains: A synthesis. *Forensic Science International*, 183: 1-5.

Vassalo, A.R.; Cunha, E.; Batista de Carvalho, L.A.E.; Gonçalves, D. 2016. Rather yield than break: assessing the

influence of human bone collagen content on heat-induced warping through vibrational spectroscopy. *International Journal of Legal Medicine*. DOI: 10.1007/s00414-016-1400-x.

Viciano, J.; Alemán, I; D'Anastasio, R.; Capasso, L.; Botella, M.C. 2011. Odontometric sex discrimination in the herculaneum sample (79 AD, Naples, Italy), with application to juveniles. *American Journal of Physical Anthropology*, 145: 97-106.

Vodanovic, M.; Demo, Z.; Njemirovskij, V.; Keros, J.; Brkic, H. 2007. Odontometrics: a useful method for sex determination in an archaeological skeletal population? *Journal of Archaeological Science*, 34: 905-913.

Wasterlain, S.N.; Neves, M.J.; Ferreira, M.T. 2016. Dental modifications in a skeletal sample of enslaved Africans found at Lagos (Portugal). *International Journal of Osteoarchaeology*, 26: 621-632.

Woisetschläger, M.; Lussi, A.; Persson, A.; Jackowski, C. 2011. Fire victim identification by post-mortem dental CT: Radiologic evaluation of restorative materials after exposure to high temperatures. *European Journal of Radiology*, 80: 432-440.

Yamamoto, K.; Ohtani, S.; Kato, S. 1990. Morphological changes in human and animal enamel rods with heating – especially limits in temperature allowing discrimination between human and animal teeth. *Bulletin of the Kanagawa Dental College*, 18: 55–61.

Yuen, K.K.; Tang, E.L.; So, L.L. 1996. Relations between the mesiodistal crown diameters of the primary and permanent teeth of hong kong Chinese. *Archives of Oral Biology*, 41: 1-7.

Zorba, E.; Vanna, V.; Moraitis, K. 2014. Sexual dimorphism of root length on a Greek population sample. *HOMO - Journal of Comparative Human Biology*, 65: 143-154.