



ANEJOS DE

**na:ilos**

Estudios  
Interdisciplinarios  
de Arqueología



## Aniversario del origen del Reino de Asturias

Congreso internacional. Del fin de la Antigüedad Tardía  
a la Alta Edad Media en la península ibérica (650-900)

### Actas

---

**Alejandro García Álvarez-Busto**  
**César García de Castro Valdés**  
**Sergio Ríos González (Editores)**



Julio 2019  
OVIEDO

Anejos de NAILOS  
Número 5  
Oviedo, 2019  
ISSN 2341-3573

Asociación de  
Profesionales  
Independientes de la  
Arqueología de  
Asturias



**na:los**

Estudios  
Interdisciplinarios  
de Arqueología



## Aniversario del origen del Reino de Asturias

Congreso internacional. Del fin de la Antigüedad Tardía  
a la Alta Edad Media en la península ibérica (650-900)

### COMITÉ CIENTÍFICO

Rafael Azuar Ruiz  
*MARQ de Alicante*

Julio Escalona Monge  
*CEHS-CSIC, Madrid*

Margarita Fernández Mier  
*Universidad de Oviedo*

José Avelino Gutiérrez González  
*Universidad de Oviedo*

Julio Navarro Palazón  
*EEEA-CSIC, Granada*

Manuel Retuerce Velasco  
*Universidad Complutense  
de Madrid*

Vicente Salvatierra Cuenca  
*Universidad de Jaén*

### COMITÉ EJECUTIVO

José Antonio Fernández  
de Córdoba Pérez  
*Consejería de Educación y  
Cultura del Principado de  
Asturias*

Alejandro García Álvarez-Busto  
*Universidad de Oviedo*

Iván Muñiz López  
*UNED*

Juan R. Muñiz Álvarez  
*Pontificia Facultad de San  
Esteban de Salamanca*

César García de Castro Valdés  
*Museo Arqueológico de Asturias*

Sergio Ríos González  
*APIAA*





ANEJOS DE ■  
**na:los**

Estudios  
**Interdisciplinarios**  
de Arqueología



## Consejo Asesor

José Bettencourt  
*Universidade Nova de Lisboa*

Rebeca Blanco-Rotea  
*Universidade de Minho /  
Universidad de Santiago de  
Compostela*

Miriam Cubas Morera  
*Universidad de York*

Camila Gianotti  
*Universidad de la República  
(Udelar)*

Adolfo Fernández  
Fernández  
*Universidad de Vigo*

Manuel Fernández-Götz  
*University of Edinburgh*

Juan José Ibáñez Estévez  
*Institución Milá i Fontanals,  
CSIC*

Juan José Larrea Conde  
*Universidad del País Vasco*

José María Martín Civantos  
*Universidad de Granada*

Aitor Ruiz Redondo  
*Université de Bordeaux*

Ignacio Rodríguez Temiño  
*Junta de Andalucía*

José Carlos Sánchez Pardo  
*Universidad de Santiago de  
Compostela*

David Santamaría Álvarez  
*Arqueólogo*

## Consejo Editorial

Alejandro García Álvarez-Busto  
*Universidad de Oviedo*

César García de Castro Valdés  
*Museo Arqueológico de Asturias*

María González-Pumariega Solís  
*Gobierno del Principado de Asturias*

Carlos Marín Suárez  
*Universidad de la República, Uruguay*

Andrés Menéndez Blanco  
*Universidad de Oviedo*

Sergio Ríos González  
*Arqueólogo*

Patricia Suárez Manjón  
*Arqueóloga*

José Antonio Fernández  
de Córdoba Pérez  
*Secretario  
Arqueólogo*

Fructuoso Díaz García  
*Director*

*Fundación Municipal de Cultura de Siero*

# naïlos

**Estudios  
Interdisciplinares  
de Arqueología**

ISSN 2340-9126  
e-ISSN 2341-1074  
C/ Naranjo de Bulnes 2, 2º B  
33012, Oviedo  
secretario@naïlos.org  
www.naïlos.org

Anejo de Naïlos nº 5. Julio de 2019  
© Los autores

Edita:

Asociación de Profesionales  
Independientes de la Arqueología  
de Asturias (APIAA).

Hotel de Asociaciones Santullano.  
Avenida Joaquín Costa nº 48.  
33011. Oviedo.

apia.asturias@gmail.com  
www.asociacionapiaa.com

Lugar de edición: Oviedo

Depósito legal: AS-01572-2013



CC BY-NC-ND 4.0 ES

Se permite la reproducción de los artículos, la cita y la utilización de sus contenidos siempre con la mención de la autoría y de la procedencia.

**NAILOS: Estudios Interdisciplinares de Arqueología** es una publicación científica de periodicidad anual, arbitrada por pares ciegos, promovida por la Asociación de Profesionales Independientes de la Arqueología de Asturias (APIAA)

Bases de datos que indizan la revista | Bielefeld Academic Search Engine (BASE); Biblioteca Nacional de España; CAPES; CARHUS Plus+ 2014; Catàleg Col·lectiu de les Universitats de Catalunya (CCUC); Catalogo Italiano dei Periodici (ACNP); CiteFactor; Copac; Dialnet; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Dulcinea; Elektronische Zeitschriftenbibliothek (EZB); ERIH PLUS; Geoscience e-Journals; Interclassica; ISOC; Latindex; MIAR; NewJour; REBIUN; Regesta Imperii (RI); Sherpa/Romeo; SUDOC; SUNCAT; Ulrich's-ProQuest; Worldcat; ZDB-network

## Sumario

Presentación **17-18**  
Fructuoso Díaz García

Prólogo **19-22**  
Alejandro García Álvarez-Busto, César García de Castro Valdés y Sergio Ríos González

### BLOQUE I

01. Iñaki Martín Viso  
*Asentamientos y jerarquías territoriales en la meseta del Duero (siglos VII-IX)* **27-59**

02. José Carlos Sánchez-Pardo  
*Nuevos apuntes sobre técnicas constructivas altomedievales en Galicia* **61-73**

03. Joan Josep Menchon Bes  
*Tarragona y su territorio entre la Antigüedad tardía y la conquista feudal. Tradición historiográfica y nuevas perspectivas (siglos VI-XI)* **75-97**

04. Margarita Fernández Mier; Jesús Fernández Fernández,  
Pablo López Gómez, César Martínez Gallardo y Santiago Rodríguez Pérez  
*Arqueología de las aldeas habitadas en Asturias: los casos de Vigaña d'Arcéu y Villanueva de Santu Adrianu* **99-119**

05. Fernando Arce Sainz  
*Oposición, sumisión y progreso de los poderes locales cristianos en el naciente al-Andalus (primera mitad del siglo VIII)* **121-131**

06. Ángel Ocejo Herrero  
*Cuestiones para una correcta adopción de terminología arqueológica en el tránsito de «Asturia» a «Las Asturias»* **132-144**

### BLOQUE II

07. Paulo Almeida Fernandes  
*O «Portugal» asturleonês. As primeiras manifestações de um novo tempo no ocidente peninsular (meados do século IX – primeira metade do século X)* **149-199**

---

## Sumario

---

08. Shadi Mazloum <i>Contribución omeya al desarrollo del lenguaje artístico y arquitectónico en la península ibérica</i>	<b>201-227</b>
09. César García de Castro Valdés y Sergio Ríos González <i>Sondeos arqueológicos en el templo altomedieval de Santullano (Oviedo)</i>	<b>229-244</b>
10. Alicia García Fernández <i>Recuperación de la iglesia prerrománica de San Andrés de Bedriñana (Villaviciosa, Asturias)</i>	<b>247-263</b>
11. Alejandro Fernández González <i>La iglesia prerrománica del yacimiento arqueológico de Camesa-Rebolledo, Valdeolea (Cantabria)</i>	<b>265-279</b>
12. Sergio Ríos González y César García de Castro Valdés <i>A propósito de cuatro dinteles de aspillera altomedievales reaprovechados en la fábrica tardo románica de Santa María de la Oliva (Villaviciosa, Asturias)</i>	<b>281-281</b>
13. Raquel Castro Marqués y Jesús Ignacio Jiménez Chaparro <i>La documentación geométrica y virtualización del patrimonio edilicio rupestre como alternativa de conservación: un ejemplo dentro del Reino de Asturias</i>	<b>293-305</b>
14. Francisco Borge Cordovilla <i>El santuario de la basílica altomedieval de San Salvador de Oviedo: formulación de hipótesis morfológicas en función del análisis compositivo y metrológico</i>	<b>307-318</b>
<b>BLOQUE III</b>	
15. José Ángel Lecanda Esteban <i>Territorio, guerra, fronteras y castillos: Castilla, la fortificada frontera oriental de Asturias</i>	<b>323-372</b>
16. Daniel Justo Sánchez <i>Asentar el dominio y controlar el territorio. Funciones de los castillos en la expansión de la monarquía asturleonense: el caso de Ardón</i>	<b>375-387</b>

---

## Sumario

---

17. José Avelino Gutiérrez González, Alejandro García Álvarez-Busto  
y Patricia Suárez Manjón  
*Tudela: un castillo del reino de Asturias en el entorno de la corte de Oviedo.*  
*Avance de la investigación arqueológica* **389-407**
- 
18. Joan Josep Menchon Bes  
*Fortificaciones catalanas del fin de milenio en crisis:*  
*las torres de Santa Perpètua de Gaià (VII-VIII) y Vallferosa (VIII-IX)* **409-427**
- BLOQUE IV**
- 
19. Jordi Roig i Buxó  
*Prácticas funerarias de época visigoda y altomedieval (siglos VI al X):*  
*el ejemplo arqueológico del noreste peninsular (Cataluña)* **431-481**
- 
20. Alejandro García Álvarez-Busto  
*Iglesias, cementerios, poblamiento y ordenación social y territorial*  
*en el Reino de Asturias (718-910)* **483-512**
- 
21. Enrique Gutiérrez Cuenca y José Ángel Hierro Gárate  
*Riocueva, una cueva sepulcral de época visigoda (ss.VII-VIII) en la zona*  
*costera de Cantabria* **515-529**
- 
22. Beatriz González Montes, Rogelio Estrada García, Eduardo Pérez  
Fernández, Enrique Caso Blanco, Nieves Fernández Ordoñez  
y Nieves Ruiz Nieto  
*Argandenes: un espacio de enterramiento entre la Antigüedad Tardía y*  
*la Alta Edad Media* **531-547**
-

---

## Sumario

---

### BLOQUE V

23. Adolfo Fernández Fernández, Roberto Bartolomé Abraira, Adrián Folgueira Castro y Enrique Alcorta Irastorza  
*Horizontes cerámicos tardoantiguos en Punta Atalaia (Cervo-Lugo). Una revisión del comercio cantábrico entre los siglos IV y VI* **551-602**
24. Noelia Fernández Calderón  
*La producción del hierro en el noroeste peninsular durante la Alta Edad Media. Su estudio a través del registro arqueológico* **605-619**
25. Noelia Fernández Calderón, Covadonga Ibañez Calzada, Alejandro García Álvarez-Busto e Iván Muñiz López  
*Aproximación al taller artesanal del castillo de Gauzón (Castrillón, Asturias). Arqueología de la producción en el Reino de Asturias* **621-652**
26. Rodrigo Portero Hernández, Óscar González-Cabezas, Rosario Gómez Osuna, Fernando Colmenarejo García, Elvira García Aragón y Alfonso Pozuelo Ruano  
*Economía de origen animal en la presierra madrileña entre los siglos VII y VIII d. C. el asentamiento aldeano minero-metalúrgico de Navalhija (Colmenar Viejo, Madrid)* **645-661**
27. Antonio Javier Criado Martín, Laura García Sánchez y Antonio José Criado Portal  
*Fabricación del acero de Damasco: estudio metalográfico* **663-680**
- Conferencia de clausura**
28. César García de Castro Valdés  
*La batalla de Covadonga. Problema historiográfico, trasfondo histórico y consecuencias sociopolíticas* **685-751**

---

## Summary

---

Presentation Fructuoso Díaz García	<b>17-18</b>
Prologue Alejandro García Álvarez-Busto, César García de Castro Valdés y Sergio Ríos González	<b>19-22</b>
<b>PART I</b>	
01. Iñaki Martín Viso <i>Settlements and territorial hierarchies in the Duero's Plateau (7<sup>th</sup>-9<sup>th</sup> Centuries)</i>	<b>27-59</b>
02. José Carlos Sánchez-Pardo <i>New research on early medieval construction techniques in Galicia</i>	<b>61-73</b>
03. Joan Josep Menchon Bes <i>Tarragona and its territory between late antiquity and feudal conquest. From the historiographic tradition to the new perspectives of study (6<sup>th</sup>-11<sup>th</sup> centuries)</i>	<b>75-97</b>
04. Margarita Fernández Mier, Jesús Fernández Fernández, Pablo López Gómez, César Martínez Gallardo y Santiago Rodríguez Pérez <i>Archaeology at the inhabited villages in Asturias: the cases of Vigaña d'Arcéu and Villanueva de Santu Adrianu</i>	<b>99-119</b>
05. Fernando Arce Sainz <i>Opposition, submission and progress of local Christian powers in the nascent al-Andalus and the strange case of Pelayo</i>	<b>121-131</b>
06. Ángel Ocejo Herrero <i>Questions for a correct adoption for archeological terminology in the transit from «Asturia» to «the Asturias»</i>	<b>133-144</b>
<b>PART II</b>	
07. Paulo Almeida Fernandes <i>Astur-leonaise Portugal. The first emergency of a new time in peninsular West (850-950 A.D.)</i>	<b>149-199</b>

---

## Summary

---

08. Shadi Mazloum <i>Umayyad Contribution to Development of the Artistic and Architectural Language of the Iberian Peninsula</i>	<b>201-227</b>
09. César García de Castro Valdés y Sergio Ríos González <i>Archaeological sondages at the early medieval church of Santullano (Oviedo)</i>	<b>229-244</b>
10. Alicia García Fernández <i>Recovery of the preromanesque church of San Andrés de Bedriñana (Villaviciosa, Asturias)</i>	<b>247-263</b>
11. Alejandro Fernández González <i>Pre-Romanesque Church of Camesa-Rebolledo archaeological site (Valdeolea, Cantabria)</i>	<b>265-279</b>
12. Sergio Ríos González y César García de Castro Valdés <i>Remarks on four early medieval embrasure lintels reused in the late romanesque work of Saint Mary's parish church (Villaviciosa, Asturias)</i>	<b>281-291</b>
13. Raquel Castro Marqués y Jesús Ignacio Jiménez Chaparro <i>The geometric documentation and virtualization of the rock building heritage as an alternative of conservation: an example within the Kingdom of Asturias</i>	<b>293-305</b>
14. Francisco Borge Cordovilla <i>The sanctuary of the early medieval basilica of San Salvador de Oviedo: formulation of morphological hypothesis based on a compositive and metrological analysis</i>	<b>307-318</b>
<b>PART III</b>	
15. José Ángel Lecanda Esteban <i>Territory, war, borders and castles: Castilla, the fortified eastern border of Asturias</i>	<b>323-372</b>
16. Daniel Justo Sánchez <i>Settling domain and controlling territory. The functions of castles in the expansion of the Astur-Leonese Kingdom: the case of Ardón</i>	<b>375-387</b>

---

## Summary

---

17. José Avelino Gutiérrez González, Alejandro García Álvarez-Busto y Patricia Suárez Manjón  
*Tudela: an asturian Kingdom castle at the surroundings of the Oviedo's court. A preliminary report on its archaeological research* **389-407**
- 
18. Joan Josep Menchon Bes  
*Two catalan fortifications from the end of the tenth century revisited: the towers of Santa Perpètua de Gaià (VII-VIII) and Vallferosa (VIII-IX)* **409-427**
- PART IV**
- 
19. Jordi Roig i Buxó  
*Funerary practices during the visigothic and early medieval periods (5<sup>th</sup>-10<sup>th</sup> C.): the archaeological example of North-Eastern Iberia (Cataluña)* **431-481**
- 
20. Alejandro García Álvarez-Busto  
*Churches, cemeteries, settlement and social and territorial organization in the kingdom of Asturias* **483-512**
- 
21. Enrique Gutiérrez Cuenca y José Ángel Hierro Gárate  
*Riocueva, a burial cave from Visigothic times (7<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> centuries) in the coastal zone of Cantabria* **515-529**
- 
22. Beatriz González Montes, Rogelio Estrada García, Eduardo Pérez Fernández, Enrique Caso Blanco, Nieves Fernández Ordoñez y Nieves Ruiz Nieto  
*Argandenes: a burial space between Late Antiquity and early Middle Age* **531-547**
-

---

## Summary

---

### PART V

---

23. Adolfo Fernández Fernández, Roberto Bartolomé Abraira,  
Adrián Folgueira Castro y Enrique Alcorta Irastorza  
*Late antique pottery records from Punta Atalaia (Cervo-Lugo).  
Revisiting cantabrian commerce between 4<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> centuries A.D.* **551-602**

---

24. Noelia Fernández Calderón  
*Iron production in the north-western Iberia during early middle ages. Its study  
through the archaeological record* **605-619**

---

25. Noelia Fernández Calderón, Covadonga Ibañez Calzada,  
Alejandro García Álvarez-Busto e Iván Muñiz López  
*Approach to the metallurgical workshop of the castle of Gauzón  
(Castrillón, Asturias). Archeology of production in the kingdom of Asturias* **621-642**

---

26. Rodrigo Portero Hernández, Óscar González-Cabezas,  
Rosario Gómez Osuna, Fernando Colmenarejo García,  
Elvira García Aragón y Alfonso Pozuelo Ruano  
*Animal-origin economy at the range border of Madrid during the 7<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> centuries  
A.D.: the miner-metallurgical peasant settlement of Navalhija (Colmenar Viejo, Madrid)* **645-661**

---

27. Antonio Javier Criado Martín, Laura García Sánchez y  
Antonio José Criado Portal  
*Damas steel smithworking: a metallographical study* **663-680**

---

### Final plenary

---

28. César García de Castro Valdés  
*The battle of Covadonga as an historiographical problem, its historical  
background and its sociopolitical consequences* **685-751**

---

# 27

## Fabricación del acero de Damasco

Damas steel smithworking: a metallographical study

Antonio Javier Criado Martín, Laura García Sánchez y  
Antonio José Criado Portal

### Resumen

Acero de Damasco es la denominación que los europeos dieron al material del que estaban hechas las espadas musulmanas durante la época de las Cruzadas. Este acero hipereutectoide, presenta un alto contenido de carbono que supera en todos los casos el 0,8 %, llegando en algunos casos al 2,1 % en masa. El secreto de sus buenas características mecánicas radica en los procesos de forja en caliente, en un intervalo de temperaturas entre 650 y 780 °C, a los que se puede someter. El temple final en agua, salmuera u otras soluciones acuosas, confiere a las armas fabricadas con este acero una buena resistencia en su filo cortante y una tenacidad elevada. En la presente investigación se estudian los procesos de fabricación de este tipo de acero a partir de una elaboración llevada a cabo por los autores siguiendo los métodos artesanos antiguos de forja y temple.

**Palabras clave:** Acero de Damasco; forja en caliente; diagrama Fe-C; Wootz; técnica experimental

### Abstract

Damascus steel is the name that Europeans gave to the material of which Muslim swords were made during the time of the Crusades. This hypereutectoid, has a high carbon content that exceeds in all the in some cases to 2,1 % by mass. The secret of its good mechanical characteristics lies in the processes of hot forging, in a range from of temperatures between 650 and 780 °C, to which it may be subjected. The final hardening in water, brine or other aqueous solutions, confers on weapons manufactured with this steel a good resistance in its cutting edge and a high tenacity. In the present the manufacturing processes of this type of steel are studied from the point of view of the of an elaboration carried out by the authors following the artisan methods.

**Keywords:** Damascus Steel; hot forging; Fe-C Diagram; Wootz; experimental technique

Antonio Javier Criado Martín: Universidad Internacional de La Rioja. Facultad de Educación | antonio.criado@unir.net

Laura García Sánchez: Universidad Complutense de Madrid. Departamento de Ingeniería Química y Materiales | gslaura@quim.ucm.es

Antonio José Criado Portal: Universidad Complutense de Madrid. Departamento de Ingeniería Química y Materiales | antoniocriado@quim.ucm.es



## 1. Introducción y objetivos

Para completar la visión general del marco histórico en el que nació el Reino de Asturias nos ha parecido apropiado detenernos en el armamento de la época y el impacto que supuso la introducción en la península de las armas forjadas con el llamado Acero de Damasco.

Este estudio pretende acercar al lector a las particularidades de esta aleación, el origen de su fortaleza y al desglose de su manufactura o proceso de fabricación. Aspiramos asimismo a exponer algunos otros usos que ha tenido este material, lejos de su clásico valor bélico.

El Acero de Damasco constituye para el arqueólogo un elemento diagnóstico, pues en sus orígenes se trata de un elemento estrechamente ligado a la presencia islámica. Sin embargo aún precisa de estudios pormenorizados que precisen la evolución de la aleación entre los siglos X y XV para llegar a ofrecernos claves cronológicas que actualmente debemos buscar en otros materiales de los mismos horizontes estratigráficos.

Acero de Damasco (*Damascus Steel*) es un término dado a este tipo de acero al crisol, de muy alto contenido en carbono forjado en caliente, con el que se toparon los cruzados en Palestina, en forma de armas de excelentes cualidades mecánicas y una belleza incomparable. Espadas, escudos, puntas de lanza y de flechas, espejos, instrumentos quirúrgicos, etc., se hacían con este acero en el mundo islámico medieval. Los cruzados en Palestina le comenzaron a llamar acero de Damasco. Fue afortunado el nombre, ya que se extendió su fama y su nueva denominación como acero de Damasco. Es cierto que Damasco fue una encrucijada de rutas caravaneras y constituyó un punto estratégico en la comercialización de objetos fabricados con este acero. Sin embargo, acero de Damasco no ha sido siempre su denominación, y menos en el mundo islámico. Es importante conocer el nombre del acero de Damasco en su denominación árabe, ya que las únicas y excelentes crónicas medievales y modernas que dan noticia de él y describen en algunos casos la técnica de su fabricación, son y están en árabe (García Sánchez 2011:5).

Si es interesante seguir la pista de las distintas denominaciones en el mundo islámico, más lo es hacerlo si nos referimos a al-Andalus, en el extremo occidental del imperio musulmán. La homogeneidad es tal en el Islam que los términos árabes para nombrar al acero de Damasco son iguales en todas las localizaciones del imperio islámico (García Sánchez, 2011:5).

En el mundo árabe, el término genérico para todas las aleaciones hierro-carbono es *hadid*; mientras que, para el acero de Damasco utilizan el término *al-hind*, recordando en la denominación la procedencia de la India de los lingotes de acero con los que se fabricaba el Damasco. Otras denominaciones de los cronistas árabes medievales son *alhindi* y, también, *hadid al-hindi* (acero de la India). Para los cronistas árabes, acero de la India es sinónimo de ace-

ro al crisol. Otra denominación de este acero de la India (*hadid al-hindi*), acero al crisol, etc., es de origen persa: *fulladh*. En todos los casos tiene un significado concreto de acero de gran calidad, y su referencia a la procedencia hindú se debe a la gran importancia del hierro y el acero de este país, por parte del mundo persa y árabe, con el que ellos obtenían el acero de Damasco para la forja de sus armas (García Sánchez 2011:5).

Después de la investigación histórica y la revisión bibliográfica, con la experiencia de años en la forja de estos aceros, nuestro objetivo fundamental consistió en seguir un procedimiento que se ajustara, según nuestros criterios, al de los fabricantes de armas en acero de Damasco de los talleres persas medievales. Sin la posibilidad de contar con un herrero experimentado en este tema, hemos tratado de llevarlo a cabo artesanalmente, en nuestro laboratorio. Hemos fundido, tratado térmicamente, forjado y laminado artesanalmente con nuestros medios (García Sánchez 2011:82).

## 2. Métodos

### 2.1. Obtención del acero base por fusión de hierro ARMCO y aleantes, y posterior colada

Se trata de obtener un lingote de hierro similar, en impurezas, a los obtenidos por reducción en los hornos antiguos. Para ello, se utilizó hierro ARMCO, ferrofósforo y otras aleaciones madre como: ferrocromo, ferrosilicio, etc., para obtener un acero de partida, en todo semejante a las analíticas de estos aceros (García Sánchez 2011:82).

### 2.2. Tratamiento térmico de carburización a alta temperatura en crisol cerrado, con carbón vegetal de madera de encina

Con este tratamiento, según las crónicas árabes medievales (al-Kindi, al-Biruni, etc...), se trataba de



Figura 1. Imagen del shamshir de Mehemet Ali (Museo de Ejército, Toledo, España), en el que se observan con claridad las vetas sinuosas del legítimo acero de Damasco.

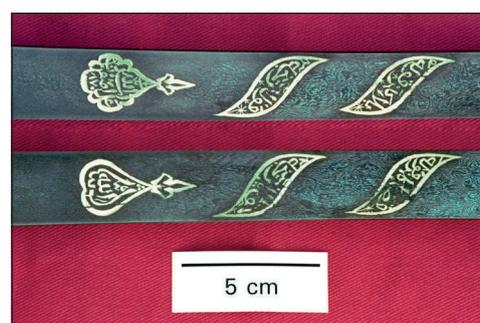


Figura 2. Imagen del shamshir de Mehemet Ali (Museo del Ejército, Toledo, España), en el que se observan, con detalle, las vetas sinuosas junto con los nihelados en oro del maestro Assad Alláh.



Figura 3. Conjunto del shamshir y funda del sable de Mehemet Ali (Museo del Ejército, Toledo, España).

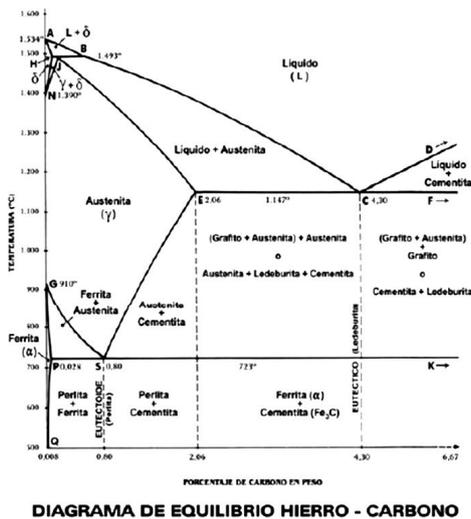


Figura 4. Diagrama de Equilibrio de Fases Fe-C.

obtener lingotes de acero indio (*wootz* de al-hind) con contenidos elevados en carbono. La temperatura elegida, según estas crónicas y las de los viajeros y científicos del siglo XIX, debía ser muy elevada, por lo que se situaría entre los 1270-1370 °C. De hecho, la microestructura de los *wootz* recuperados muestra, en todos ellos, una estructura dendrítica inequívoca. Esto significa que se situaría en el campo de la austenita más el líquido, en el diagrama Fe-C (Figura 4). La temperatura de carburización, pues, oscilaría en ese intervalo de temperaturas antes citado, siendo más alta o más baja dependiendo del contenido en carbono alcanzado.

El tiempo requerido abarcaba, según los cronistas árabes medievales, hasta que al agitar los crisoles se notara un claro chapoteo, indicio de que se había producido una fusión parcial, debido al aumento del contenido en carbono del acero al crisol. Oscilaba, por tanto, entre 8 y 12 horas, suficiente para la carburización, fusión parcial y crecimiento de los cristales dendríticos formados. Después, el enfriamiento se hace al aire, como se deduce de las fuentes históricas. Este tratamiento tan peculiar permite la formación de grandes masas de carburos de hierro ledeburíticos a expensas de la cementita de la austenita. Al enfriar, la austenita se transforma en perlita, con un contenido en carbono inferior al 0,8 %. Todo esto supone que en la etapa de forja vamos a disponer de una gran cantidad de cementita, de tamaño muy grosero, y de colonias ledeburíticas muy separadas para formar las bandas visibles de carburos de hierro. El tamaño y número de los lingotes depende del volumen de la pieza que se pretende forjar. Las crónicas árabes medievales hablan de docenas de crisoles, de los que se obtenían lingotes *wootz* de cientos de gramos, siempre inferiores al kilogramo. Esto permite una correcta carburización y el aprovechamiento de la orientación de los cristales dendríticos para la obtención fácil de las bandas visibles de carburos (García Sánchez 2011:82-83).

### 2.3. Tratamiento de recocido subcrítico de ablandamiento del acero

Se trata de un recocido subcrítico, entre los 760 °C y 780 °C, para conseguir la globulización parcial de la cementita ledeburítica, según se deduce de las crónicas medievales y modernas. Es un tratamiento aplicado actualmente a los aceros hipercarburados de herramientas antes de su conformación por forja en caliente. El calentamiento a esas temperaturas se debe prolongar de 50 a 72 horas, previo revestimiento del lingote con arcilla refractaria para evitar su decarburación. Se puede realizar una etapa, o hasta en cuatro, según se relata en alguna crónica. Se debe vigilar la posibilidad de deterioro del revestimiento de arcilla (García Sánchez 2011:83).

### 2.4. Forja en caliente

En el intervalo de temperaturas de 650-750 °C, en el rojo sangre, como relatan las crónicas antiguas, se forja en caliente mediante macho pilón y/o laminación manual, inicialmente, y por golpeo con martillo hasta su conformación final. La temperatura del rojo sangre, 650-750 °C, es la idónea y coincide con las crónicas antiguas y modernas (siglo XIX), ya que en ese intervalo la cementita es muy plástica, como han demostrado las experiencias de Verhoeven y colaboradores y, además, no se redisuelve en la austenita. Esto permite su rotura y globalización sin permitir la regeneración de la cementita continua en límites de grano. Según el tamaño y forma de los lingotes, wootz, se hacía y se hace necesaria una primera etapa de desbaste mediante macho pilón o maza, o cualquier otro método mecánico apropiado. A continuación, la forja se continua con el martillo hasta su conformación final (García Sánchez 2011:83).

### 2.5. Temple en distintos medios, agua con salmuera o en aceite, según las crónicas medievales árabes y los relatos de viajeros y científicos del siglo XIX

El temple solo se realiza o realizaba para aquellas armas en las que la estética no fuera la única característica destacable del arma. Las no templadas muestran una estética envidiable; bien pulidas o pulidas y atacadas, para mostrar las fascinantes vetas sinuosas de carburos de hierro. La resistencia mecánica y al corte de las no templadas es muy buena. Sin embargo, con el temple ganan mayor resistencia, aunque con una merma evidente de su belleza. La temperatura de calentamiento debe coincidir con la de forja para no permitir que se disuelvan las bandas de carburos de hierro esferoidizados y así, al templar, solo lo hacemos con el carbono de la austenita correspondiente al eutectoide. La presencia de carburos de hierro en la matriz martensítica presta una excelente resistencia al corte. No debe olvidarse que la cementita es el microconstituyente más duro en los aceros al carbono. Tras el temple es necesario un revenido para endulzar la estructura martensítica y aumentar su tenacidad. Este revenido, como ya ha

sido referido, está en algunas crónicas, como la del relato de M. Baker, cónsul británico en Alepo (Siria) (*The Annual Register*, 1825) (García Sánchez 2011:83-84).

## 2.6. Desbaste y pulido de las hojas de acero de Damasco

Esta es una operación trascendental en el acicalamiento de las armas u otros objetos fabricados en cualquier tipo de acero, como aceros de Toledo, aceros francos, katanas japonesas, etc., y más en el acero de Damasco o *al-hindi*, pues hemos podido comprobar en la investigación histórica cómo brillaban las espadas de este material, incluso los espejos hechos con él. Es más, para revelar las bandas de carburo se hacen necesarias estas operaciones de acicalado. El cónsul británico en Alepo, M. Baker, da cuenta de estas operaciones de una forma exhaustiva y detallada.

En nuestro caso, las operaciones de desbaste y pulido se han llevado a cabo como si de actuaciones para una preparación metalográfica se tratara. Se ha utilizado papel de Buheler de grano 120, 320, 400, 600 y 2000 y, para el pulido, alúmina  $\alpha$  (0,3  $\mu\text{m}$ ).

El acabado final de estas operaciones prepara un posterior ataque químico, tanto en el caso de presentar bandas visibles de carburos, como si no las presentan, para que su aspecto quede brillante y especular como corresponde a un acero con tanto carburo de hierro (García Sánchez 2011:84).

## 2.7. Ataque químico para resaltar las bandas de carburos de las hojas de acero de Damasco

El ataque químico busca resaltar las bandas de carburos en aquellos casos en que las presentan, según las recetas extraídas de la investigación histórica y las fórmulas actuales. En todas las referencias medievales y modernas a este tipo de grabado químico, para resaltar las bandas de carburos se utilizan reactivos oxidantes en medio ácido. La sal oxidante que aparece en todos los casos es, siempre, un compuesto de hierro. En general, es el sulfato de hierro disuelto en agua, con adiciones de ácidos orgánicos naturales como el málico, cítrico, acético, etc., el reactivo seleccionado para este efecto. La descripción más detallada y precisa vuelve a ser la de M. Baker (Baker 1816:40-43), a base de tierra de Damasco o *zaj*, que no son otra cosa que soluciones de sulfato férrico resultantes de la lixiviación de unas tierras ricas en esta sustancia química, traídas de los alrededores de Beirut, en el Líbano actual. En nuestro caso, el ataque químico causante del grabado químico de las bandas de carburos, en aquellos aceros que las presentan, se llevó a cabo con Nital ( $\text{HNO}_3/\text{EtOH}$ ) al 10 % o solución alcohólica ácida de cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3/\text{HCl}/\text{EtOH}$ ). El resultado es exactamente el mismo (García Sánchez 2011:84).

### 3. Resultados

Técnica experimental (García Sánchez 2011:88-127).

#### 3.1. Obtención del acero base

Se trata de la primera operación en la fabricación y forja del acero de Damasco. En la época medieval y moderna, este acero base se obtenía por reducción de minerales de hierro: magnetitas y hematitas, con carbón vegetal. En nuestro caso hemos tenido que obviar esta etapa por razones técnicas.

##### 3.1.1. El horno eléctrico

Para la obtención de hierros, y acero de Damasco directo se ha empleado un horno de fusión de alta frecuencia con crisol cerámico, o de grafito, y molde (lingotera) incorporado al sistema (Figura 5). Presenta un sistema eléctrico que controla el proceso y un sistema cerrado de refrigeración de agua. Se trata de un horno Taylormade Induction de 10 centímetros de diámetro y 40 centímetros de longitud, cuya capacidad máxima son 8 kilos de acero, aproximadamente, y tiene una potencia de 30 Kilovatios. El molde o lingotera se calienta antes de la operación de colada mediante combustión de gas.

##### 3.1.2. Materiales de partida

El hierro base utilizado para obtener las distintas calidades de acero de partida ha sido el hierro ARMCO (C: 0,004; Si: 0,00; Mn: 0,04; Ni: 0,013; Cu: 0,007; Cr: 0,001; P: 0,00; Fe: 99,9) (Figura 6). En la obtención del acero de Damasco directo se empleó grafito del 99.99 % de pureza.

##### 3.1.3. Fusión y colada: acero de Damasco directo y acero suave

En primer lugar, se fundieron barras de hierro ARMCO (Figura 7). En el caso de la obtención del acero de Damasco directo se añade también grafito, en la cantidad adecuada, en el molde o lingotera precalentada. Una vez fundido el hierro ARMCO se pasa a la etapa de colada. Se vuelca el conjunto

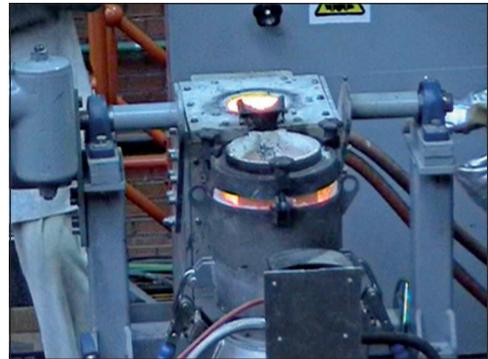


Figura 5. Horno eléctrico de alta frecuencia utilizado en la obtención de hierros y acero de Damasco directo. El molde o lingotera se calienta por combustión de gas.



Figura 6. Materiales de partida: barras de hierro ARMCO, de aproximadamente 70 cm de longitud, y ferroaleaciones.



Figura 7. Se observan dos barras de hierro ARMCO en el crisol, en el momento de comenzar la fusión.

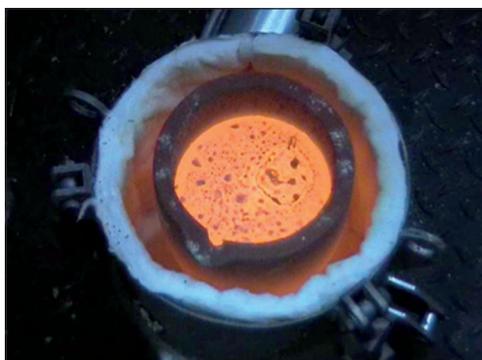


Figura 8. Imagen del crisol con el acero todavía al rojo.

del horno con su crisol y se cuela en el molde lingotera (Figura 8). Una vez frío el molde o lingotera, se extrae el lingote para pasar a las operaciones posteriores (Figura 9).

### 3.2. Obtención del wootz por carburización a alta temperatura

Esta operación es clave para la obtención del acero indio (*al-hindi*), base de los demás procesos para la fabricación de armas y otros objetos con el acero de Damasco. Muy posiblemente no fue la única manera de obtener este acero de ultra alto contenido en carbono; pero sí fue el proceso utilizado por los herreros medievales y modernos, tal y como se desprende de las crónicas estudiadas. De hecho, es la única forma de obtener acero de Damasco (*al-hindi*) con estructura ledeburítica, la más favorable para obtener el aspecto final de las bandas serpenteantes de carburos de hierro. Las crónicas medievales describen muy bien el proceso, como hemos podido constatar en la investigación histórica. Este proceso de carburización era seguido por todos los herreros, sobre todo en los wootz procedentes de la India y los que se fabricaban en Persia, Irak, etc.

#### 3.2.1. Horno eléctrico con resistencias de CSi (Carbolite)

El horno utilizado para el proceso de carburización es un horno Carbolite Furnaces Type 15/4B, de 5000 vatios de potencia a 380v., el cual puede alcanzar, con eficacia, los 1500 °C (Figura 10).

#### 3.2.2. Preparación del crisol cerrado con hierro ARMCO y carbón de madera de encina

Se corta el trozo de acero suave del tamaño adecuado a la pieza que se pretenda forjar, y se introduce en el crisol cerámico. A continuación, se rellena el crisol con el carbón vegetal triturado hasta un tamaño de partícula de dos centímetros de diámetro medio (Figura 11). Esto es fundamental para que el carbón se queme a alta temperatu-

ra en un ambiente muy cerrado con poco volumen de aire, produciéndose monóxido de carbono, que es la sustancia carburizante. Por lo tanto, el carbón que rodea al trozo de hierro no debe estar muy compactado. El carbón vegetal debe llenar hasta las  $\frac{3}{4}$  partes del crisol. Para continuar, se añade arena de río de grano fino hasta enrasar el crisol (Figuras 12 y 13).

### 3.2.3. Introducción del crisol en el horno y calentamiento a 1340 °C

Con el horno a la temperatura de carburización (1340 °C), se introduce el crisol bien centrado. Se cierra el horno y se deja a esa temperatura entre 12 y 16 horas. Ese es el tiempo necesario para conseguir introducir carbono en el hierro por difusión, hasta un contenido que oscila entre el 1,6 % y 1,9 % en masa (Figura 14). El resultado final de la operación oscila entre esos valores debido a que no siempre el tamaño y forma de los trozos de carbón son rigurosamente iguales. Numerosos ensayos nos han llevado a esos tiempos, que concuerdan perfectamente con los datos de los cronistas medievales y modernos.

### 3.2.4. Extracción del crisol del horno, enfriamiento al aire y obtención del pequeño lingote por rotura del crisol

De la misma manera como se describe en las crónicas medievales y modernas, el crisol se rompe una vez frío. Se extrae el lingote y se puede observar cómo el sellado de la arena vitrificada es hermético y, por otra parte, cómo parte de la carga del carbón vegetal aún se conserva y, además, con la misma textura inicial (Figura 15).

## 3.3. Tratamiento de recocido de ablandamiento del acero del wootz, previo a la forja en caliente

Esta etapa vuelve a ser crucial para la forja en caliente del acero de Damasco. Está correctamente descrito en las crónicas y es un tratamiento térmi-



Figura 9. Imagen del lingote obtenido por enfriamiento en crisol.



Figura 10. Horno utilizado para la obtención de los wootz por carburización.



Figura 11. Se añade el carbón vegetal triturado hasta llegar a las tres cuartas partes del volumen del crisol.



Figura 12. Se rellena y enrasa el crisol con la arena de río.

co equivalente al que se realiza en la actualidad con los aceros hipereutectoides de herramientas, antes de la forja en caliente. Asimismo, es el tratamiento que se efectúa antes de la forja de los aceros aleados hipercarburados de herramientas. Por lo tanto, hace muchos siglos que se conoce la manera de forjar aceros de ultraalto contenido en carbono.

### 3.3.1. Sellado del pequeño lingote (*wootz*) de acero de Damasco con arcilla humedecida (*greas*)

Este sencillo recurso de revestir con arcilla una pieza de acero para realizarle un tratamiento térmico es, el mismo que utilizaban, y utilizan, los maestros herreros en Japón para el recocido y temple de las katanas. Se trata, pues, de envolver el lingote de acero (*wootz*) con arcilla húmeda (*barro* o *greas*) para evitar su oxidación durante el tratamiento térmico de recocido de ablandamiento (Figura 16).

### 3.3.2. Calentamiento del lingote sellado con arcilla en el horno a 780 °C durante 48 horas

Siguiendo las recetas de las crónicas, se introduce el lingote sellado con arcilla en el horno a 780 °C durante 48 horas. A esta temperatura de recocido subcrítico, la cementita proeutectoide, precipitada en límites de grano o de forma ledeburítica, no se disuelve en la austenita. De esta manera sufre un proceso de globulización muy efectivo, al igual que ocurre en la industria actual con los aceros de herramientas hipereutectoides. Transcurridas 48 horas, se deja enfriar lentamente en el horno, con lo que se producirá, también, una globulización más o menos completa de la cementita del eutectoide.

## 3.4. Forja en caliente del lingote de acero de Damasco

Tanto en las crónicas medievales como modernas se describe detalladamente la forja del acero de Damasco o acero indio. El dato clave es la temperatura superior de forja, que no se puede sobrepasar en ningún momento, ya que, de hacerlo, se regeneraría la cementita proeutectoide en límite



Figura 13. El crisol queda con el lingote y el carbón vegetal sellado con la arena de río.



Figura 14. Introducción en el horno del crisol sellado a una temperatura de 1350 °C, durante 12-16 horas.



Figura 15. Se rompe el crisol y se observa el lingote, la capa de arena vitrificada sellante y parte del carbón aún sin consumir.



Figura 16. Sellado con arcilla de una pletina de acero indio y tratamiento de recocido de ablandamiento.

de grano durante el enfriamiento. Esto supondría la fragilización de la pieza de acero de Damasco, que se rompería como si fuera barro (Figura 17). Esta es una de las claves más evidentes del fallo continuado de los herreros occidentales a la hora de querer forjar estos aceros. La forja correcta del acero de Damasco, después del tratamiento de recocido de ablandamiento, debe realizarse en el intervalo de temperaturas que van desde los 650 °C a los 780 °C. Cualquier calentamiento superior a esa temperatura acarrea el riesgo serio de su fragilización.

#### 3.4.1. Desbaste en martillo pilón neumático

Cuando se parte de un lingote (wootz) relativamente grande (de 0,75 a 1 kg de masa), es interesante desbastar y dar preforma con el martillo (macho) pilón en el intervalo de temperaturas antes señalado. Esta tarea ahorra mucho esfuerzo y tiempo y se viene haciendo desde tiempo inmemorial. La diferencia entre nuestros martillos pilones actuales y los antiguos radica únicamente en el sistema mecánico de accionamiento. Los actuales funcionan con mecanismos



Figura 17. Trozos de una pletina de acero indio forjada a temperatura inadecuada (superior a 800 °C).



Figura 18. Martillo pilón neumático para desbastar una pletina de acero indio.

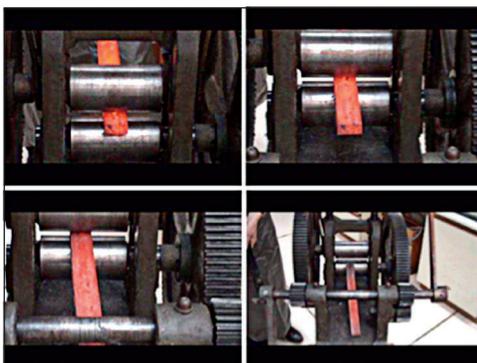


Figura 19. Introducción de la pletina en la laminadora.

hidroneumáticos o de ballesta, mientras que los antiguos utilizaban artilugios que aprovechaban la fuerza animal o la fuerza del agua de arroyos y riachuelos (Figura 18).

### 3.4.2. Desbaste por laminación manual artesanal

El desbaste por laminación es un recurso muy interesante y eficaz si, previamente, el lingote de acero de Damasco ha sido desbastado y conformado a la forma de pletina. Con el sistema de laminación hemos conseguido acercarnos a las dimensiones últimas de las piezas forjadas, quedando el martillado para los golpes finales con el fin de conseguir las formas exactas. Sin embargo, las estructuras de las bandas de carburos obtenidas no son iguales a la que se logran por martillado exclusivamente. La laminación aplasta y alarga sin apenas recalcar, obteniéndose como resultado estructuras de bandas menos retorcidas y más regulares (Figura 19).

### 3.4.3. Forja por martillado en el yunque

La forja por martillado se debe ejecutar con martillos de ½ kg y de 1 kg de masa. La temperatura, como ya se ha comentado anteriormente, debe mantenerse por debajo de los 780 °C, es decir, sin pasar del rojo sangre y rojo cereza. Si la pieza se va retorciendo durante la forja, la estructura de las bandas de carburos de hierro se irá entrelazando y retorciendo, hasta conseguirse las bellas aguas del acero de Damasco (Figura 20).

## 3.5. Temple en distintos medios

El temple era una operación que no tuvo carácter general. Los bellísimos *shamshires* persas medievales de Isfahân no han sufrido temple. En ninguno de los Damascos con bellas vetas de carburos examinados y estudiados hasta el momento se han observado estructuras de temple. Esto no es casual, ya que el temple provoca que, con el ataque químico final, la estructura se ennegrezca y ensucie, como ocurre siempre con las estructuras martensíticas. Por tan-

to, si se desea una estética excelente, la matriz debe quedar ferrítica. Entonces sí, el oxidante ataca limpiamente la ferrita, dejando en relieve los carburos de hierro. A pesar de no templarse, la resistencia del filo al desgaste queda igual, ya que el carburo de hierro o cementita es el constituyente más duro de los aceros al carbono, por encima de la martensita.

Sin embargo, son innumerables los aceros de Damasco que no presentan las bandas de carburos en los que prima más la resistencia mecánica y la eficacia del arma que una concesión a la estética. Igualmente es cierto que muy pocos herreros dominaban el arte de obtener hojas de acero de Damasco con esa estética. En todo caso, el temple debía hacerse desde temperaturas que no implicasen la disolución en la austenita del carbono de la cementita proeutectoide. Otra vez estamos ante una situación análoga a los aceros de herramientas, aleados o no, hipereutectoides. Se debe hacer un recocido subcrítico, a temperaturas entre 760 °C y 800 °C y, después, efectuar el temple en salmuera o en aceite y similares. En las referencias históricas analizadas vemos que, en el caso referido por el cónsul británico en Alepo (siglo XIX), el herrero sumerge el acero al rojo sangre en un líquido aceitoso, mezcla de ricino y otros componentes. Nosotros hemos realizado el temple en agua con salmuera y en aceite (Figura 21). Aunque realizamos algunos procesos de revenido, este se reveló innecesario, ya que al tratarse de aceros de tan alto contenido en carbono, en todas las operaciones de temple quedaba un porcentaje de austenita retenida sin transformar a martensita. Por tanto, el acero de Damasco, después del temple, siempre conserva una aceptable tenacidad debido a la presencia de esta austenita residual.

### 3.6. Desbaste y pulido de las hojas de acero obtenidas

Esta es la operación de acabado fundamental. Téngase en cuenta que entre los maestros japoneses antiguos y actuales, fabricantes de katanas, el maestro pulidor se sitúa en una escala superior al



Figura 20. Imágenes de la forja de un puñal por el maestro herrero Juan Pozón (Córdoba).



Figura 21. El puñal al rojo sangre se sumerge en aceite para su temple.

que realiza la forja. Como se ha referido en la investigación histórica, el desbaste y pulido de las hojas u otros objetos en acero de Damasco era muy cuidadosa y con los métodos más complejos. En nuestra investigación, después del rectificado de la superficie en el taller mecánico o con piedra de agua artesanalmente, se procedió a su desbaste mediante discos abrasivos en agua de Buheler de grano 240, 320, 600 y 2000. El pulido se realizó en alúmina  $\alpha$  (0,3  $\mu\text{m}$ ) y alúmina  $\alpha$  (0,03  $\mu\text{m}$ ), en paño de pulir Buheler.

### 3.7. Ataque químico opcional para revelar la estructura de bandas de carburos de hierro

Hemos visto en la investigación histórica como, los cronistas andalusíes, comentaban el brillo especular de las hojas de acero indio (*al-hindi*). Incluso, y no solo en al-Andalus, se utilizaba el acero indio, o acero de Damasco, para fabricar espejos, gracias a un brillo magnífico blanquecino y transparente. Este hecho fue, asimismo, descrito por Marco Polo durante su viaje a Oriente, a su paso por regiones de Persia limítrofes con India. Es evidente que en estos casos, y en ciertos periodos de tiempo y localizaciones geográficas específicas, no se obtuvo la estética de las bandas serpenteantes de carburos de hierro, bien porque se desconocían, no eran su objetivo, o solo se buscaba su aplicación mecánica. En todos estos casos, el ataque químico no puede ser contemplado. La estética final es precisamente el brillo inmaculado de un acero hipereutectoide pulido correctamente.

En los casos en que se pretenda resaltar las bandas de carburos, como fue el caso de los aceros persas medievales y modernos de la escuela de Isfahân, este se realiza con una sustancia oxidante en medio acuoso ácido. En las recetas estudiadas de las crónicas medievales y modernas siempre aparecen las sales de hierro ( $\text{Fe}^{3+}$ ) en disoluciones acuosas ácidas. En nuestra experiencia particular hemos utilizado tres reactivos ácidos para el ataque químico de aceros al carbono ferríticos (hipoeutectoides e hipereutectoides): Nital al 4 %, cloruro férrico en solución acuosa ácida ( $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$ ), y cloruro férrico en solución alcohólica ácida ( $\text{HCl}/\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ). Con todos ellos el resultado ha sido satisfactorio. Quizás con las soluciones de cloruro férrico se obtenga ese aspecto, ligeramente gris verdoso, que tanto se aprecia en el mundo de los aceros de Damasco. Los ataques con las fórmulas de las crónicas medievales y modernas también resultaron exitosos. Con estos ataques, asimismo, se distingue ese tono sutil gris verdoso.

El ataque debe realizarse con un paño humedecido, pasándolo con suavidad por toda la superficie del arma, con mucha diligencia para evitar que salgan manchas localizadas. Si el paño se pasa con rapidez y suavidad, el ataque químico progresa homogéneamente, obteniéndose la misma tonalidad en toda la superficie atacada. El tiempo depende, solamente, del contraste que se pretenda conseguir: llegado este a los tres o cuatro minutos, el contraste no mejora y la insistencia en el ataque puede provocar el ennegrecimiento del acero (Figura 22, 23 y 24).

## 4. Conclusiones

### 4.1. Resumen de las fases de fabricación del acero de Damasco

- 1ª Fase. Obtención por carburización en crisol cerrado de un lingote (*wootz*): calentamiento entre 1270 °C y 1370 °C durante 12-16 horas y enfriamiento al aire. Es fundamental conseguir la ledeburitización del acero hipercarburado.
- 2ª Fase. Recocido subcrítico a 660 °C durante 72 horas con revestimiento de arcilla para evitar su decarburación superficial.
- 3ª Fase. Forja previa en martillo pilón y/o en laminadora manual y posterior forja manual, en el intervalo de temperaturas entre 650 °C y 760 °C. Produce un alineamiento de los cristales de cementita ledeburítica en bandas con trazados dispares según los esfuerzos aplicados, y una globulización intensa de los cristales de carburo de hierro, incluidos los ledeburíticos o proeutectoides.
- 4ª Fase. Acicalado de la pieza forjada, desbaste y pulido cuidadoso, y ataque oxidante con Nital al 4 % o FeCl<sub>3</sub> en solución alcohólica acidificada con HCl. Para que el ataque revele las marcas superficiales, características del acero de Damasco, la matriz debe ser ferrítica, esto es, en ausencia de temple (Figura 26).
- 5ª Fase. Acicalado final, tras el temple en aceite desde 760 °C, consistente en un desbaste y pulido muy cuidadosos. La mayoría de las armas fabricadas en acero de Damasco no mostraban marcas porque iban templados, o estas eran muy finas. (Figura 27).

### 4.2. Conclusiones

1. Ha quedado de manifiesto que su nombre genérico entre los árabes, y musulmanes medievales en general, es el de *al-hindi*, es decir,



Figura 22. Puñal de acero de Damasco atacado con cloruro férrico en solución alcohólica ácida. Se observan las bandas de carburos de hierro en red poligonal.



Figura 23. Puñales de acero de Damasco pulidos sin ataque. Presentan un brillo muy transparente y especular.



Figura 24. Puñal de acero de Damasco con bandas de carburos de hierro muy finas, templado y sin ataque.



Figura 25. Macrografía de la sección de uno de los lingotes obtenidos por carburización a 1300 °C durante 12-16 horas, obsérvese la estructura dendrítica de este acero ledeburítico del 1,8 % C en masa.



Figura 26. Marcas superficiales en el shamshir de Mehemet Ali forjado por Assad Allâh al-Isfahâni.

acero indio. Para el mundo castellano-leonés la palabra, derivada del árabe andalusí, que denominaba este tipo de acero es alinde o alfinde.

2. Las marcas superficiales que han hecho célebre a las armas fabricadas en acero de Damasco en el mundo occidental no son definitivas de este acero, ya que solo las presentaban aquellas fabricadas bajo la influencia del mundo islámico oriental, cuyo centro principal fue Persia, y más concretamente, los talleres de la ciudad de Isfahân.
3. Se ha llegado a la conclusión de que partían de aceros base, lingotes, con estructuras metalográficas constituidas por grandes cristales de cementita ledeburítica, causantes del efecto óptico final de la superficie de las armas, después de la forja.
4. La única manera que existía de obtener un acero de ultraalto contenido en carbono, en épocas antiguas, medievales y modernas, era su fabricación a partir de hierros y aceros de bajo contenido en carbono, por carburización en crisoles cerrados; de ahí su denominación europea occidental de acero al crisol.
5. La carburización del acero al crisol, u obtención del lingote wootz de acero indio, consistía en calentar un trozo de hierro al acero suave en un crisol de arcilla refractaria, herméticamente cerrado, en cuyo interior, además del hierro o acero suave, se introducía carbón vegetal triturado convenientemente. El calentamiento de los crisoles, con los trozos metálicos de las dimensiones de las piezas que se querían forjar, se realizaba a temperaturas muy elevadas, entre los 1270 °C y 1350 °C, durante 12-16 horas. Pasado este tiempo, se sacaban del horno y se dejaban enfriar al aire.
6. Del enfriamiento al aire, de la estructura semifundida, obtenida por carburización a temperaturas elevadas de entre 1270 °C y

1350 °C, se obtenía una estructura dendrítica ledeburítica muy característica de todos los lingotes wootz recuperados hasta el presente. La estructura de grandes cristales interdendríticos de cementita ledeburítica, semejantes en todo a los aceros actuales hipercarburados de herramientas, son la causa más determinante para la aparición de las marcas superficiales, características de los Damascos que las presentan, fundamentalmente de los talleres persas de Isfahân.

7. La imposibilidad de la forja directa en caliente de estos aceros hipereutectoides, de ultraalto contenido en carbono, obligaba a un recocido subcrítico a temperaturas de alrededor de los 760 °C, para provocar la segmentación y globulización parcial de la cementita ledeburítica. El tratamiento de endulzamiento del acero duraba alrededor de las 72 horas. Para evitar una fuerte decarburación, durante este proceso se le recubría con un revestimiento de arcilla refractaria.
8. El acero endulzado por recocido subcrítico a 760 °C, durante 72 horas, quedaba apto para su forja en caliente. Esta se realizaba a temperaturas que oscilaban entre los 650 °C y los 760 °C. Superar el límite superior de temperatura de forja suponía la fragilización y ruina de la pieza de acero.
9. Si el acero fue endulzado debidamente y la forja se realizó de forma correcta, sin recalentamientos repentinos, se pasaba, si ese era el caso, al temple del arma. Este se realizaba desde temperaturas subcríticas, es decir, desde los 760 °C aproximadamente, en aceite, o mezclas aceitosas, consiguiéndose unas estructuras de grandes cristales globulizados de cementita proeutectoide en una matriz de martensita en austenita retenida. El conjunto presentaba una buena dureza (55-58 HRC), una gran resistencia al desgaste por la presencia de abundante cementita, y



Figura 27. Puñal forjado con acero de Damasco templado en aceite.



una tenacidad notable. La resistencia mecánica (alrededor de los 190-200 Kg/mm<sup>2</sup>) y la potencia de corte de su filo las hicieron insuperables.

13. En el caso de obtener las bellas marcas superficiales, inherentes a las armas fabricadas en los talleres medievales de Isfahân en Persia, era necesario obviar el temple para obtener una matriz ferrítica. La presencia de bandas suficientemente separadas de grandes cristales de carburos de hierro ledeburíticos hacían que el acicalado final del arma, desbaste, pulido y ataque oxidante en medio ácido ( $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ ) provocara la aparición de esas bellísimas marcas alternadas, en claro y oscuro, con formas irrepetibles. ❁

## Bibliografía

BAKER, J. (1816): «Method of Renewing the Giogare or Flovery Grain of Persian Swords Commonly Called Damascus Blades». *Fundgrafen des Orients* 5: 40-43 (red. bajo el nombre de S. Baker, *The Annual Register*, 1818: 599-602).

GARCÍA SÁNCHEZ, Laura (2011). *Claves metalúrgicas de la fabricación de espadas con acero de Damasco (al-hindi) según el taller persa medieval del shamshirsaz Assad Allâh de Isfahân*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas. Disponible en: <http://eprints.ucm.es/14429/> [Consultado: 10/06/2018].



GOBIERNO DEL  
PRINCIPADO DE ASTURIAS

CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN  
Y CULTURA



COVADONGA  
CENTENARIOS 2018

**apiaa**

Asociación de Profesionales  
Independientes de la Arqueología  
de Asturias



GRANHOTELESPAÑA

\*\*\*\*

MUSEO | ARQUEOLÓGICO | DE ASTURIAS