



# Optimización del Procesado de Polvos Metálicos mediante Sinterización Eléctrica

*Jaime Forcada Cataño*

Sevilla, Mayo 2002



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

ESCUELA SUPERIOR  
DE  
INGENIEROS

Proyecto Fin de Carrera presentado por Jaime Forcada Cataño, alumno de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, para la obtención del Título de Ingeniero Industrial, especialidad Mecánica.

Vº Bº  
El Director del Proyecto

Fdo. Jaime Forcada Cataño.

Fdo. D. Juan Manuel Montes Martos.

Profesor Asociado de la Universidad de Sevilla, Área de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica.

Departamento de Ingeniería Mecánica y Ciencias de los Materiales.

Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.

## AGRADECIMIENTOS

Debo expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han intervenido, directa o indirectamente, en la realización del presente proyecto del Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales de La Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.

A D. Juan Manuel Montes Martos, tutor del proyecto, al lado de quien ha sido un deleite trabajar, siempre disponible.

Al Dr. José Antonio Rodríguez Ortiz por los sabios consejos y por la colaboración prestada.

Al Director del Departamento, Dr. Enrique Herrera Luque por poner a mi servicio su amplia experiencia investigadora e introducirme en el mundo de la sinterización.

Al Dr. José María Gallardo, a Dr. Laureano Soria Conde, a D. Jesús Cintas y a D. Francisco de Paula Gómez Cuevas por su ayuda prestada en todo momento.

A D<sup>a</sup> Mercedes Sánchez (e hijo/a), D. Jesús Pinto, D. José Miguel Madrid y D. Antonio Valverde, por prestarme su ayuda siempre que lo necesité.

A Evaristo, Ticciane, César, José, Antonio, Carlos y Marta, compañeros de Laboratorio, por todos los momentos compartidos.

# Índice

---

<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>1.1 MOTIVACIÓN</b>	<b>6</b>
<b>1.2 OBJETIVO</b>	<b>6</b>
<b>1.3 ESQUEMA DEL PROYECTO</b>	<b>7</b>
<b>2 BASES TEÓRICAS</b>	<b>8</b>
<b>2.1 LA CONSOLIDACIÓN DE POLVOS</b>	<b>9</b>
<b>2.2 EL Prensado en caliente</b>	<b>10</b>
<b>2.3 SISTEMA DE Prensado en caliente</b>	<b>11</b>
2.3.1 EL Prensado uniaxial en caliente	12
2.3.1.1 Calentamiento indirecto	12
2.3.1.2 Calentamiento directo	13
2.3.2 EL Prensado isostático en caliente	14
<b>2.4 LA SINTERIZACIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA</b>	<b>15</b>
2.4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	15
2.4.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA	15
<b>3 EQUIPOS</b>	<b>19</b>
<b>3.1 LA MÁQUINA DE SINTERIZACIÓN ELÉCTRICA</b>	<b>20</b>
3.1.1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	22
3.1.2 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	23
<b>3.2 LOS SENSORES</b>	<b>23</b>
3.2.1 DESPLAZAMIENTO	23
3.2.2 FUERZA	24
3.2.3 INTENSIDAD	25

3.2.4 TENSIÓN	25
3.2.5 TEMPERATURA	26
<b>3.3 EL PC</b>	<b>26</b>
3.3.1 CONEXIONES MÁQUINA-PC	27
<b>3.4 LAS MATRICES Y PUNZONES</b>	<b>29</b>
3.4.1 MATRIZ CERÁMICA-METÁLICA	30
3.4.2 MATRIZ DE HORMIGÓN	30
3.4.3 MATRIZ HORMIGÓN-CERÁMICA	31
<b>3.5 EL EQUIPO DE ACTIVACIÓN</b>	<b>32</b>
<b>4 MATERIALES</b>	<b>34</b>
<b>4.1 POLVO DE HIERRO</b>	<b>35</b>
<b>4.2 POLVO DE NÍQUEL</b>	<b>37</b>
4.2.1 NÍQUEL T210	37
4.2.2 NÍQUEL 4SP	38
<b>4.3 POLVO DE TITANIO</b>	<b>40</b>
<b>4.4 POLVO DE ALUMINIO</b>	<b>42</b>
<b>5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>44</b>
<b>5.1 CONSIDERACIONES PREVIAS</b>	<b>45</b>
5.1.1 MATRIZ	45
5.1.2 CONEXIONES	45
<b>5.2 PROCESO DE SINTERIZACIÓN</b>	<b>45</b>
5.2.1 EL SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN	46
5.2.1.1 Secuencias de soldadura	46
5.2.1.2 Intensidad	47
5.2.1.3 Tensión	47
5.2.1.4 Presiones	48
5.2.1.5 Tiempos	48
5.2.2 EJECUCIÓN	49
5.2.3 EL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN	50
5.2.3.1 El interfaz	50
5.2.3.2 Procesado de datos	51
5.2.4 EXTRACCIÓN DE LOS COMPACTOS	54
5.2.5 ACTIVACIÓN ELÉCTRICA	54

<b>5.3 SINTERIZACIÓN TRADICIONAL</b>	<b>55</b>
<b>5.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPACTOS</b>	<b>55</b>
5.4.1 DIMENSIONES	55
5.4.2 ESMERILADO Y PULIDO	55
5.4.3 MACROGRAFÍAS	56
5.4.4 ANÁLISIS DE IMAGEN	56
5.4.5 ANÁLISIS METALOGRAFICO	57
<b>6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>58</b>
<b>6.1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>60</b>
<b>6.2 CONSIDERACIONES PREVIAS</b>	<b>60</b>
6.2.1 PRESIÓN DE COMPACTACIÓN	60
6.2.2 INTENSIDAD DE CORRIENTE	61
6.2.3 TIEMPO DE PROCESADO	62
<b>6.3 EXPERIENCIAS REALIZADAS</b>	<b>63</b>
6.3.1 EXPERIENCIAS CON POLVO DE HIERRO (WPL200)	63
6.3.1.1 Evolución de la porosidad y de la resistencia eléctrica	63
6.3.1.2 Energías disipadas	65
6.3.1.3 Estudios metalográficos	66
6.3.2 EXPERIENCIAS CON POLVO DE NÍQUEL (T210)	71
6.3.2.1 Curvas características	71
6.3.2.2 Aspectos metalográficos	73
6.3.3 EXPERIENCIAS CON POLVO DE NÍQUEL (4SP)	77
6.3.2.1 Curvas características	77
6.3.2.2 Aspectos metalográficos	79
6.3.4 EXPERIENCIAS CON POLVO DE TITANIO (P150)	82
6.3.2.1 Curvas características	82
6.3.2.2 Aspectos metalográficos	83
6.3.5 EXPERIENCIAS CON POLVO DE ALUMINIO (AS61)	88
6.3.2.1 Curvas características	89
6.3.2.2 Aspectos metalográficos	91
6.3.6 COMPARATIVA	95
<b>6.4 INTERPRETACIÓN MICROSCÓPICA</b>	<b>98</b>
<b>6.5 DURABILIDAD DE LAS MATRICES ESTUDIADAS</b>	<b>101</b>
6.5.1 MATRIZ CERÁMICA-MATÁLICA	101
6.5.2 MATRIZ DE HORMIGÓN	101

6.5.3 MATRIZ HORMIGÓN-CERÁMICA_____	102
<b>7 CONCLUSIONES_____</b>	<b>104</b>
<b>7.1 CONCLUSIONES GENRALES_____</b>	<b>105</b>
<b>7.2 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN_____</b>	<b>106</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA_____</b>	<b>108</b>
<b>APÉNDICE I_____</b>	<b>110</b>
<b>APÉNDICE II_____</b>	<b>283</b>