

# 3. MATERIALES

## 3.1 BRONCE

El polvo de bronce empleado ha sido suministrado por la empresa ECKART. Su denominación comercial es ECKA Spherical Bronze 89/11 AK.

### 3.1.1 PROPIEDADES GENERALES

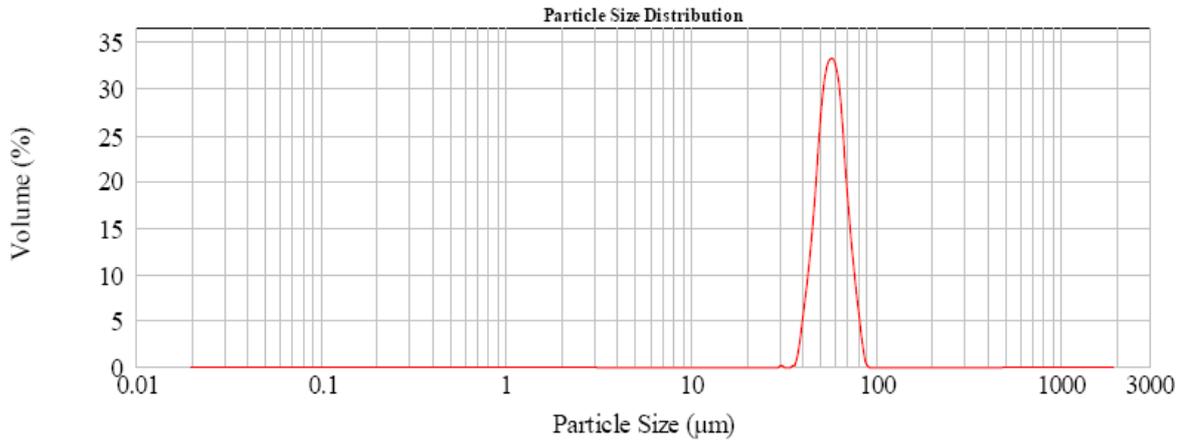
En este apartado se especifican las propiedades generales del bronce, las cuales o han sido suministradas por el fabricante, o son fruto de los ensayos realizados. Los valores correspondientes a las mismas se exponen en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Propiedades del polvo de bronce.

Propiedades generales del bronce	
Densidad	8.9 g/cm <sup>3</sup>
Velocidad de fluidez	0.449 cm <sup>3</sup> /s
Densidad aparente	4.999 g/cm <sup>3</sup>
Densidad de golpeo	5.405 g/cm <sup>3</sup>
Porosidad de golpeo	0.39
T <sup>a</sup> de fusión	1085° C
T <sup>a</sup> de aparición de fase líquida	800° C

### 3.1.2 GRANULOMETRÍA

Los resultados de la granulometría se muestran en la Figura 1. En ella se puede observar que prácticamente la totalidad de las partículas, exactamente el 98,44%, tienen un tamaño menor de 80 µm. El rango de tamaños de partícula se encuentra entre 40 µm y 90 µm, con un tamaño medio de poco menos de 60 µm.



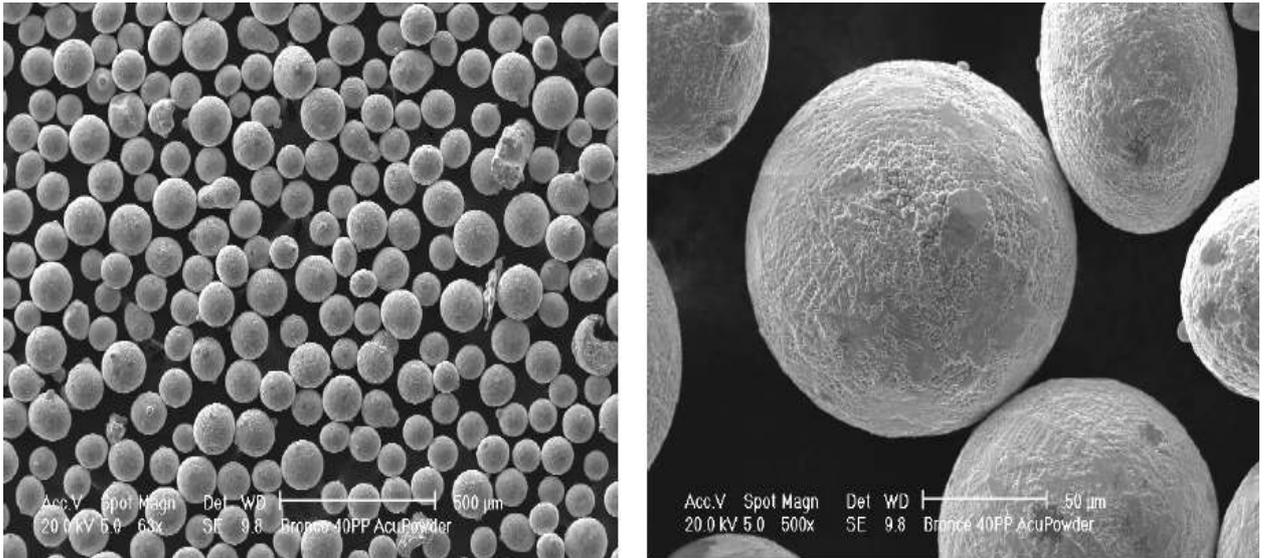
**Figura 1:** Granulometría del bronce.

**Tabla 2:** Granulometría del bronce por intervalos de tamaño.

Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.00	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.00	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.00	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.00	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.953	0.00	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.909	0.00	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.00	26.303	0.00	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.00	30.200	0.00	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.00	34.674	0.00	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.00	39.811	0.59	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.00	45.709	8.80	478.630	0.00	5011.672	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.00	52.481	21.99	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.00	60.256	29.93	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.00	69.183	25.83	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.00	79.433	11.30	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.00	91.201	1.56	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.00	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.00	120.226	0.00	1258.925	0.00		

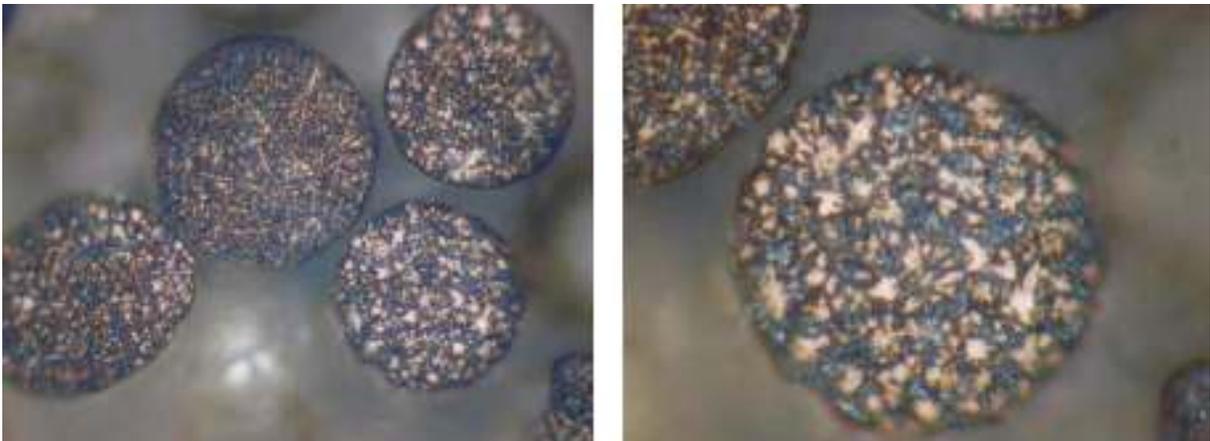
### 3.1.3 MORFOLOGÍA Y MICROESTRUCTURA

Por medio del microscopio SEM se puede observar que la morfología de las partículas es esférica con superficies bastante suaves. Esta regularidad en las partículas es la causa de la gran fluidez del polvo.



**Figura 2:** Micrografías SEM-SE del polvo de bronce.

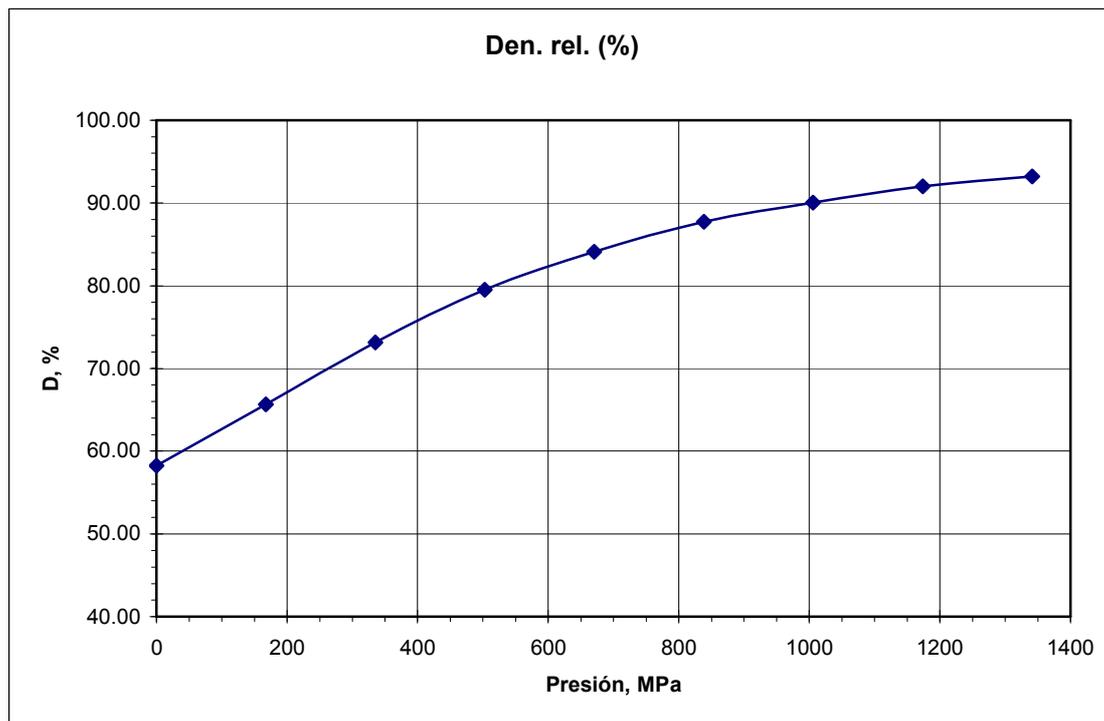
En la Figura 3, se presenta la microestructura del polvo de bronce, que presenta una estructura dendrítica fruto de la formación del polvo partiendo de la fase líquida.



**Figura 3:** Microestructura del polvo de bronce, observada por medio de un microscopio óptico.

### 3.1.4 CURVA DE COMPRESIBILIDAD

La curva de compresibilidad es la representación gráfica de la densidad relativa frente a la presión de compactación de la probeta, que se muestra en la Figura 4. La curva presenta una evolución muy suave, en principio casi lineal que decae al final muy ligeramente.



**Figura 4:** Curva de compresibilidad del bronce

De la misma se pueden deducir las presiones que se van a tener que aplicar a las probetas, para de este modo poder obtener las porosidades normalizadas que se necesitan para realizar las pertinentes sinterizaciones. En la siguiente Tabla 3 se encuentran recogidas las mismas.

**Tabla 3:** Tabla de presiones del bronce obtenidas mediante la curva de compresibilidad.

Porosidad normalizada	Presión
0.6	430 MPa
0.4	686 MPa

## 3.2 ALUMINIO

El polvo de aluminio usado para este proyecto procede de la empresa ECKART-WERKE. Su denominación comercial es Eckart Aluminium AS-61. Tiene una pureza superior al 99.7 %, y además cumple la especificación DIN 1712/1 sobre aluminio de pureza comercial.

### 3.2.1 PROPIEDADES GENERALES

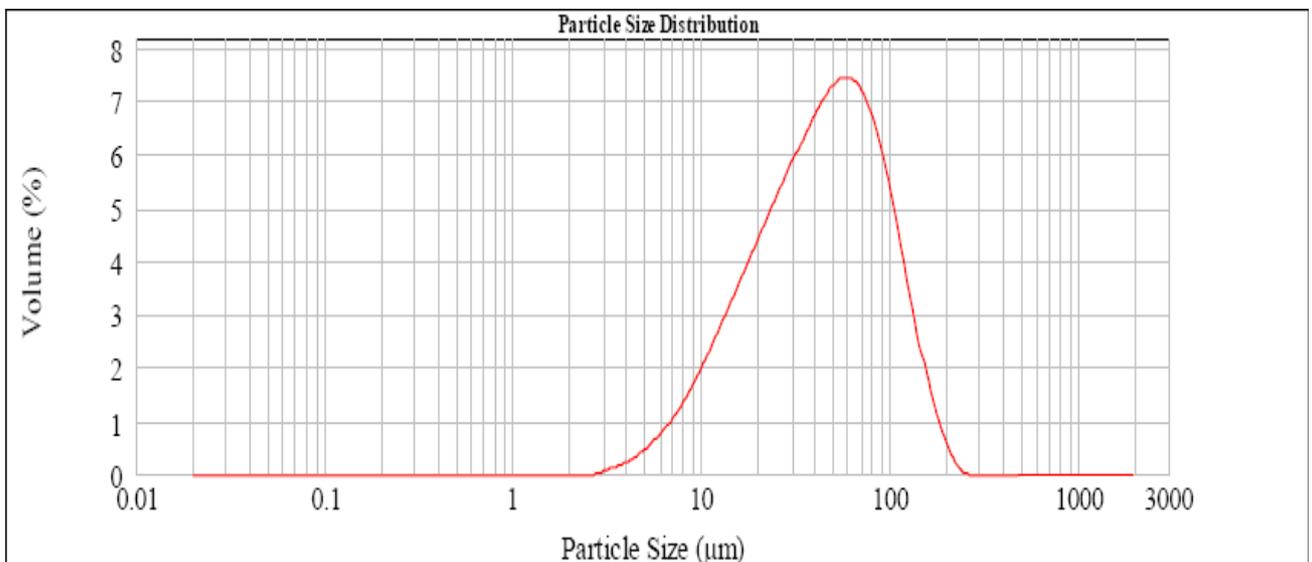
Las propiedades generales, al igual que se hizo con el bronce, están recogidas en la Tabla 4. Se observa que el aluminio es mucho menos denso que el bronce, con un punto de fusión menor, su densidad de golpeo está en torno al 50% de la absoluta. La velocidad de fluidez es menor que la del bronce, característica que lo perjudica a la hora de realizar el proceso de sinterización, en el momento de verter el polvo al molde.

**Tabla 4:** Propiedades principales del polvo de aluminio.

Propiedades generales del aluminio	
Densidad	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Velocidad de fluidez	0.234 cm <sup>3</sup> /s.
Densidad aparente	1.116 g/cm <sup>3</sup>
Densidad de golpeo	1.417 g/cm <sup>3</sup>
Porosidad de golpeo	0.46
T <sup>a</sup> de fusión	660° C

### 3.2.2 GRANULOMETRÍA

Los resultados del estudio granulométrico realizado al aluminio están resumidos en la Figura 5 y en la Tabla 5. Se puede observar que la mayor parte de las partículas es menor de 125  $\mu\text{m}$ , exactamente un 99.4%. El rango de tamaños de partícula se encuentra comprendido entre 10  $\mu\text{m}$  y 125  $\mu\text{m}$ , con un tamaño medio algo menor de 44  $\mu\text{m}$ . Si se compara con el tamaño de las partículas del bronce, se observa que para el aluminio el rango de tamaños es mayor, es decir el tamaño no es tan homogéneo como en el bronce, tal como muestran la Figura 1 y la Figura 5. La media del tamaño de partículas es menor que el del bronce, en este caso. Un amplio intervalo de tamaños es perjudicial en los objetivos del proyecto, debido a que introduce una nueva variable a analizar a la hora de explicar los fenómenos sometidos a estudio. A pesar de que en el caso del aluminio la dispersión de tamaños es bastante más notable que la del bronce, es suficientemente pequeña como para que no tenga que ser tomada en consideración, a la hora de analizar los resultados obtenidos en el proyecto.



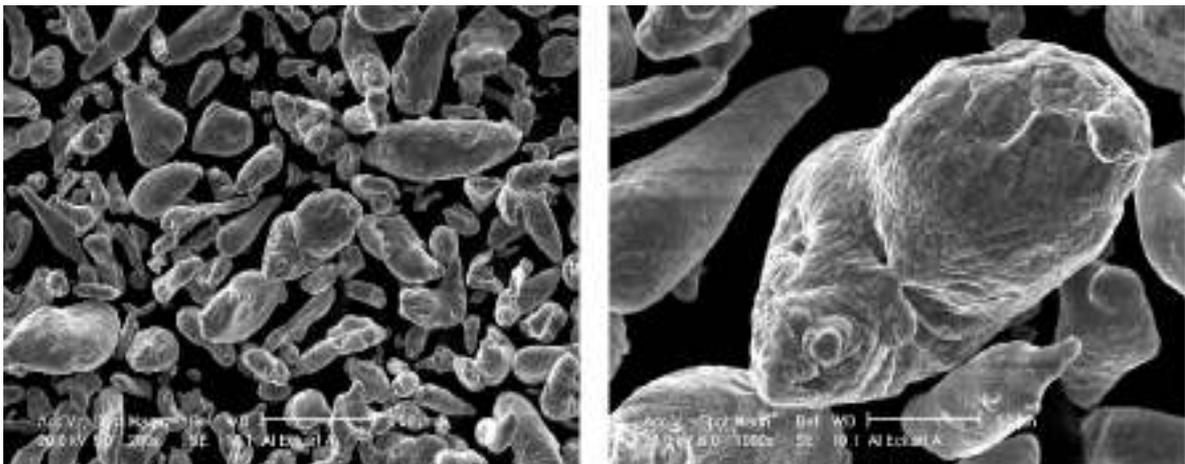
**Figura 5:** Granulometría del polvo de aluminio.

**Tabla 5:** Granulometría del polvo de aluminio por intervalo de tamaños.

Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	2.41	120.226	3.09	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	2.84	138.038	2.09	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	3.28	158.489	1.24	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	3.72	181.970	0.61	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.953	4.15	208.930	0.20	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.909	4.59	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.00	26.303	5.03	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.00	30.200	5.46	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.06	34.674	5.87	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.12	39.811	6.25	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.21	45.709	6.55	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.33	52.481	6.71	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.49	60.256	6.88	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.70	69.183	6.41	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.95	79.433	5.87	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	1.26	91.201	5.10	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	2.00	104.713	4.13	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482		120.226		1258.925			

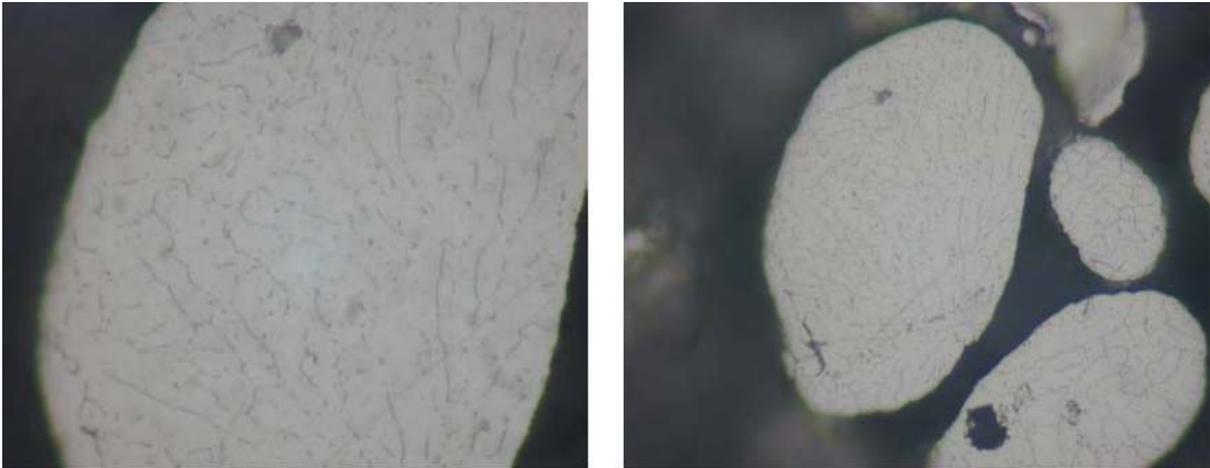
### 3.2.3 MORFOLOGÍA Y MICROESTRUCTURA

La Figura 6 muestra la morfología del polvo de aluminio en el microscopio SEM. Se observa que la forma de las partículas es irregular, aunque su superficie es poco abrupta. La irregularidad en las formas de las partículas, es una de las causas que motivan una velocidad de fluidez mucho menor que la del bronce que presenta una morfología mucho más suave, lo que provoca una mayor fluidez de las partículas.



**Figura 6:** Micrografía del SEM-SE del polvo de aluminio.

En la Figura 7 se muestra el resultado del estudio de las partículas de aluminio mediante el microscopio óptico. En la misma se observa una estructura granular dendrítica.

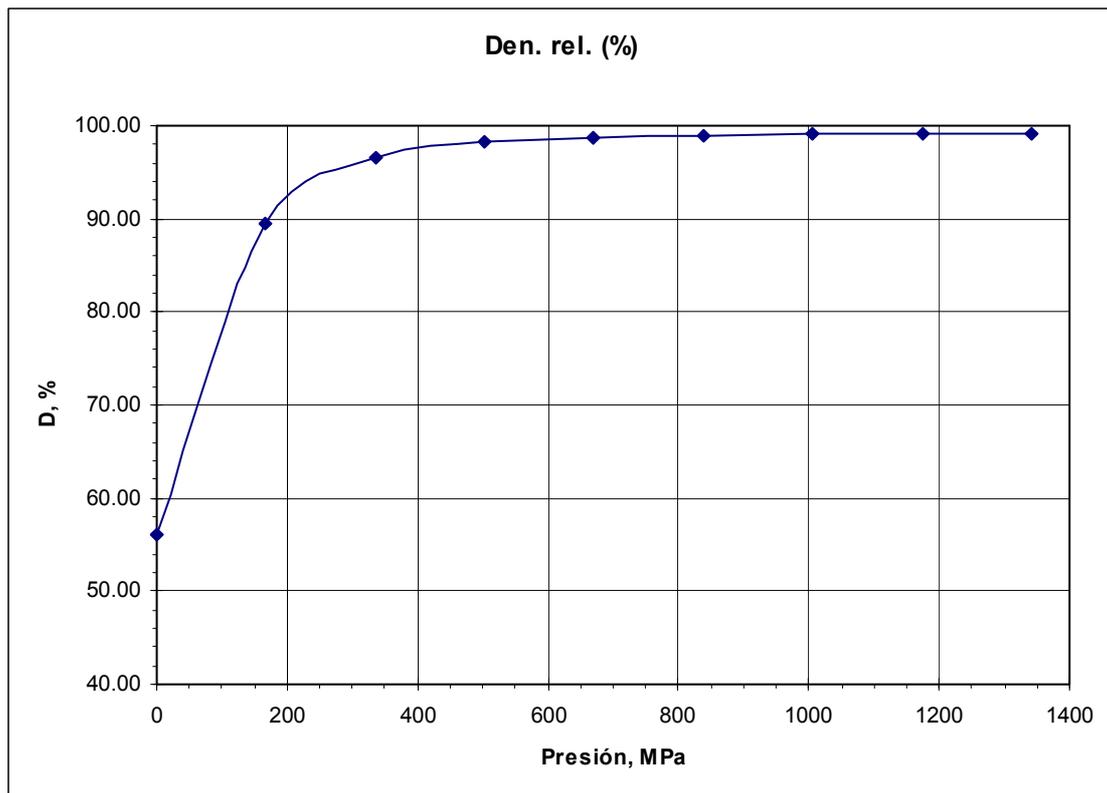


**Figura 7:** Microestructura del polvo de aluminio, obtenida mediante un microscopio óptica.

### **3.2.4 CURVA DE COMPRESIBILIDAD**

En el caso del aluminio la correspondiente curva de compresibilidad es la correspondiente a la Figura 8. La curva presenta un crecimiento lineal con una pendiente muy elevada en el primer tramo, en el cual se alcanza prácticamente el 90% de la densidad absoluta, a partir de este valor la curva va disminuyendo su pendiente, hasta presentar un crecimiento lineal, con una pendiente prácticamente nula. La curva, al contrario de lo que ocurría con el bronce que superaba levemente el 90 % de la densidad absoluta, alcanza casi el 100 % de la densidad absoluta.

De la curva se pueden determinar, al igual que se hizo con el bronce, las cargas necesarias para compactar las probetas de aluminio, las cuales se muestran en la Tabla 6.



**Figura 8:** Curva de compresibilidad del aluminio.

**Tabla 6:** Tabla de presiones del aluminio obtenidas mediante la curva de compresibilidad.

Porosidad normalizada	Presión
0.6	67 MPa
0.4	33 MPa

### 3.3 ACERO INOXIDABLE

El acero inoxidable usado en este caso es el 316L nomenclatura de la norma AISI, el cual es un acero austenítico, con contenidos de cromo, níquel y molibdeno [1].

#### 3.3.1 PROPIEDADES GENERALES

Siguiendo el procedimiento llevado a cabo con los otros materiales, en primer lugar se muestran en la Tabla 7 las propiedades generales del mismo. En este caso la densidad aparente también ronda el 50 % de la absoluta. El acero inoxidable es el material que mayor punto de fusión tiene de los que vamos a estudiar, su densidad no llega a ser tan alta como la del bronce, pero si que es mucho mayor que la del aluminio.

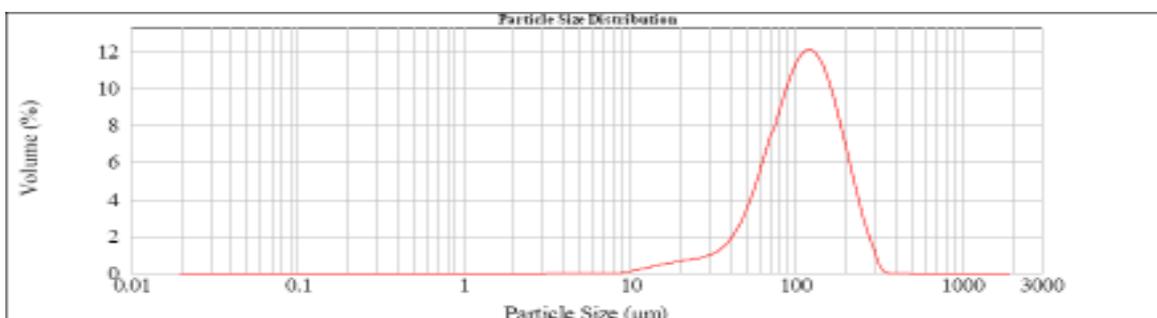
En cuanto a la velocidad de fluidez, el acero inoxidable es el que presenta un valor más bajo, aunque el mismo está muy próximos al del aluminio.

**Tabla 7:** Propiedades principales del polvo de acero inoxidable.

Propiedades generales del acero inoxidable	
Densidad	7.96 g/cm <sup>3</sup>
Velocidad de fluidez	0.227 cm <sup>3</sup> /s.
Densidad aparente	2.8736 g/cm <sup>3</sup>
Densidad de golpeo	3.75 g/cm <sup>3</sup>
Porosidad de golpeo	0.53
Tª de fusión [2]	1370° C

### 3.3.2 GRANULOMETRÍA

En la Figura 9 y en la Tabla 8 se encuentran recogidos los datos del estudio granulométrico del polvo de acero inoxidable. El tamaño de las partículas es, en general, menor de 240 µm, teniendo una distribución que va desde 10 µm hasta 275 µm, con un tamaño medio de las partículas de 120 µm. A pesar de que el rango de tamaños es el mayor de los tres casos, el tamaño de partículas en su mayor parte está más concentrado, teniendo realmente una dispersión mayor el aluminio que el acero inoxidable, siendo el bronce el que menor dispersión en el tamaño de partículas presenta. Por otra parte las partículas de acero inoxidable son aquellas que tienen un mayor tamaño medio, siendo bastante más grande que en los casos del bronce y del aluminio.



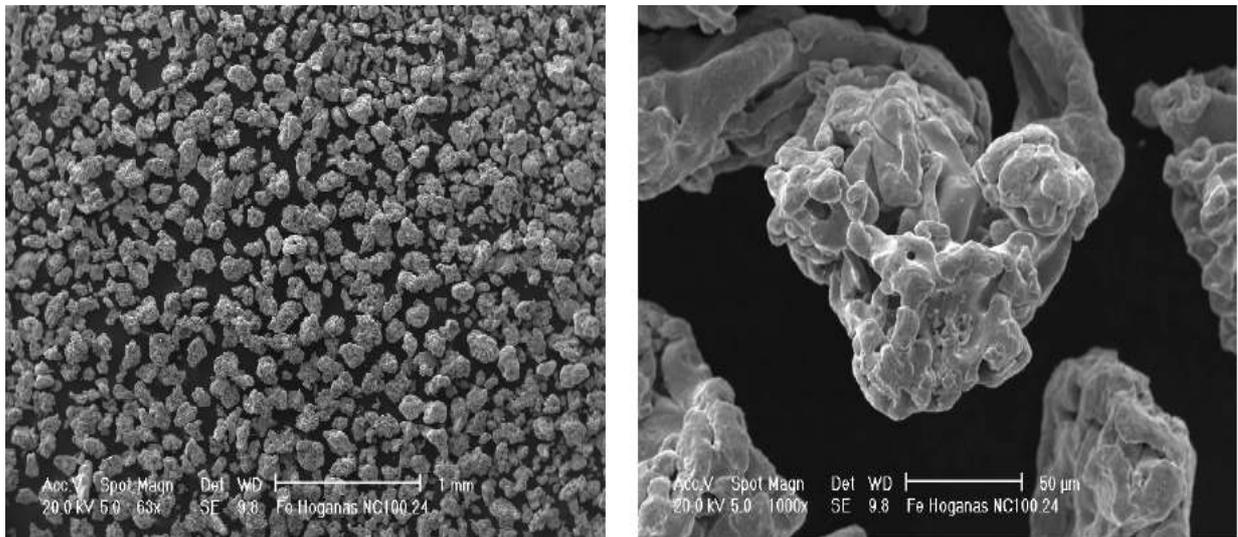
**Figura 9:** Granulometría del acero inoxidable.

**Tabla 8:** Granulometría del polvo de acero inoxidable por intervalo de tamaños.

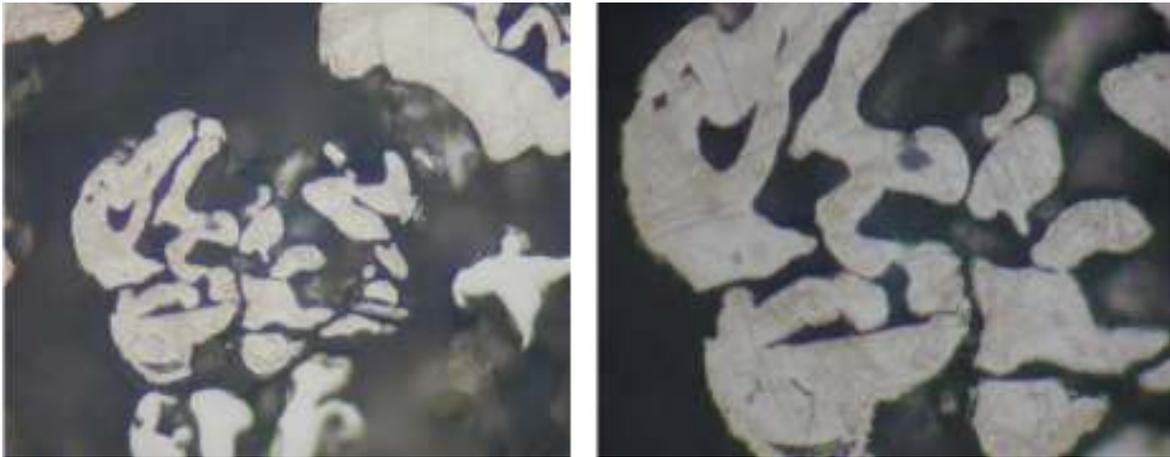
Size (µm)	Volume in %										
0.040	0.00	0.105	0.00	1.066	0.00	11.482	0.19	120.226	10.76	1258.625	0.00
0.044	0.00	0.120	0.00	1.250	0.00	13.183	0.30	136.036	9.94	1445.440	0.00
0.048	0.00	0.136	0.00	1.445	0.00	15.106	0.41	156.489	8.46	1659.587	0.00
0.053	0.00	0.156	0.00	1.660	0.00	17.270	0.51	181.970	6.61	1905.401	0.00
0.058	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.693	0.58	206.690	4.46	2187.762	0.00
0.064	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.399	0.66	239.660	2.96	2511.880	0.00
0.070	0.00	0.240	0.00	2.512	0.00	26.303	0.73	276.625	1.12	2884.032	0.00
0.077	0.00	0.275	0.00	2.884	0.00	30.300	0.91	316.226	0.05	3311.311	0.00
0.084	0.00	0.316	0.00	3.311	0.00	34.674	1.24	363.076	0.00	3801.894	0.00
0.092	0.00	0.363	0.00	3.802	0.00	39.611	1.30	416.666	0.00	4365.158	0.00
0.100	0.00	0.417	0.00	4.365	0.00	45.709	2.08	476.630	0.00	5011.872	0.00
0.109	0.00	0.479	0.00	5.012	0.00	52.481	3.90	549.641	0.00	5754.389	0.00
0.119	0.00	0.550	0.00	5.754	0.00	60.290	5.43	630.267	0.00	6606.004	0.00
0.130	0.00	0.631	0.00	6.607	0.00	69.193	7.71	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.142	0.00	0.724	0.00	7.586	0.00	79.433	8.74	831.764	0.00	8709.630	0.00
0.155	0.00	0.832	0.00	8.719	0.00	91.201	10.05	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.170	0.00	0.958	0.00	10.000	0.11	104.713	10.76	1086.476	0.00		
0.185	0.00	1.096	0.00	11.482	0.11	120.226		1258.625	0.00		

### 3.3.3 MORFOLOGÍA Y MICROESTRUCTURA

En la Figura 10 y en la Figura 11, se muestran la morfología y la microestructura del polvo de acero inoxidable. La morfología que presenta es de tipo esponjoso, las partículas presentan unas superficies muy abruptas, causando una mala fluidez, cuyo valor es muy parecido al del polvo de aluminio, el cual también presenta una superficie de las partículas bastante abrupta, al contrario de lo que sucede en el polvo de bronce.



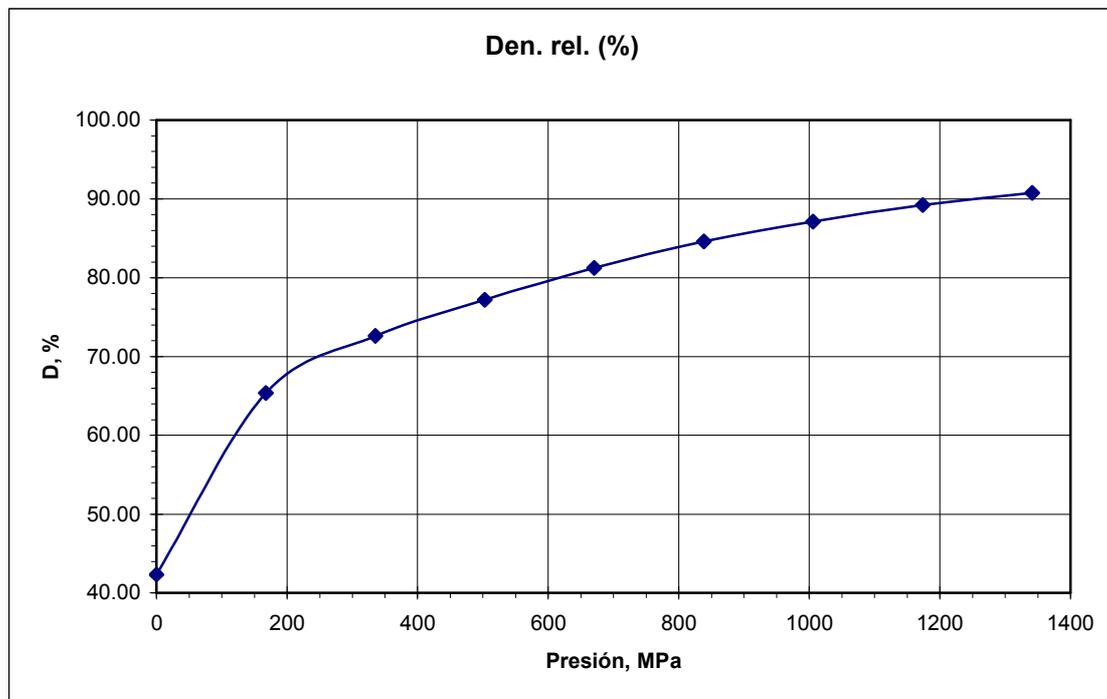
**Figura 10:** Micrografía del SEM-SE del polvo de acero inoxidable.



**Figura 11:** Microestructura del polvo de acero inoxidable, observada por medio de un microscopio óptico.

### 3.3.4 CURVA DE COMPRESIBILIDAD

La Figura 12 representa la curva de compresibilidad del acero inoxidable. Se aprecia en ella un crecimiento lineal en el primer tramo, con una pendiente bastante elevada, aunque no tanto como la que presenta el aluminio. Posteriormente experimenta un descenso de la pendiente de la curva, que se va atenuando progresivamente pero de una manera suave, sin presentar ningún cambio brusco. En cuanto al grado de densidad alcanzado, el del acero inoxidable es el más bajo de los tres casos que se han tratado, llegando apenas a un valor ligeramente superior al 90 % de la densidad absoluta.



**Figura 12:** Curva de compresibilidad del acero inoxidable.

De la Figura 12 se pueden obtener los valores de las cargas, necesarios para compactar las probetas, los cuales están recogidos en la Tabla 9.

**Tabla 9:** Tabla de presiones del acero inoxidable obtenidas mediante la curva de compresibilidad.

Porosidad normalizada	Presión
0.6	580 MPa
0.4	220 MPa

---

<sup>1</sup> [www.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/aceros/sabimet.html](http://www.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/aceros/sabimet.html)

<sup>2</sup> [www.goodfellow.com/csp/active/STATIC/S/Acero\\_Inoxidable\\_-\\_AISI\\_316.HTML](http://www.goodfellow.com/csp/active/STATIC/S/Acero_Inoxidable_-_AISI_316.HTML)