

VNIVERSIDAD D SALAMANCA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ZAMORA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y AGRONOMÍA

ÁREA DE CIENCIA DE LOS MATERIALES E INGENIERÍA METALÚRGICA

INGENIERÍA DE MATERIALES



PROYECTO FIN DE CARRERA

**INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE ESCORIA DE SOLDADURA SOBRE
LA SINTERABILIDAD Y COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE
MATERIALES FABRICADOS A PARTIR DE RESIDUOS DE LADRILLO**

AUTORA: SEILA PICÓN ALONSO

DIRECTORA: NATIVIDAD ANTÓN IGLESIAS

FECHA DE ADJUDICACIÓN: OCTUBRE 2013

FECHA DE PRESENTACIÓN: FEBRERO 2014

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer de manera especial y sincera a mi tutora Natividad Antón por aceptarme en esta línea de investigación, por su apoyo y capacidad para guiar mis ideas con un aporte invaluable.

Quiero expresar también, mi más sincero agradecimiento a cada uno de los profesores de esta titulación por su dedicación, docencia y disponibilidad en todo momento.

A Ascensión Murciego por proporcionarme de manera totalmente desinteresada los difractogramas de las materias primas utilizadas en este proyecto.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a mis compañeros de laboratorio y estudios, entre ellos a Manu por haberme animado desde el primer momento a realizar esta carrera, y por sus consejos y ayuda recibida.

Un agradecimiento muy especial para Miguel, porque además de ser mi compañero de clase, de laboratorio... siempre ha conseguido sacarme una sonrisa en los momentos difíciles, motivándome y ayudándome cuando sentía que nada salía como yo esperaba.

Agradecer de manera especial la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de mi familia; y sobre todo por parte de mi hermano que aunque en la distancia, siempre se ha interesado por saber cómo iba este proyecto.

De igual forma merecen mención en estas líneas, los conserjes de esta Escuela por su enorme paciencia y amabilidad cuando llegada la hora de cierre, aún no habíamos salido del laboratorio.

Por último, a todas aquellas personas que en algún momento directa o indirectamente han influido y contribuido en este proyecto.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	6
1. RESUMEN	8
2. OBJETIVOS	9
3. TRATAMIENTO DE RESIDUOS	10
3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS	10
3.2. RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	11
3.3. SITUACIÓN ACTUAL	12
3.4. REUTILIZACIÓN DEL LADRILLO	13
3.5. RESIDUOS INDUSTRIALES.....	14
3.6. SITUACIÓN ACTUAL	15
3.7. REUTILIZACIÓN DE LA ESCORIA DE SOLDADURA O FLUX	15
4. PROCESADO DE CERÁMICOS.....	17
4.1. EXTRACCIÓN	18
4.2. OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA EN FORMA DE POLVOS.....	18
4.2.1. TRITURACIÓN Y MOLIENDA.....	19
4.2.2. CRIBADO.....	20
4.3. TÉCNICAS DE CONFORMADO	21
4.3.1. COMPACTACIÓN O COMPRESIÓN.....	21
4.4. SINTERIZACIÓN	27
5. COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO.....	32
6. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO	39
CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	42
7. MATERIAS PRIMAS	44
7.1. SELECCIÓN DE LAS PROPORCIONES DE LOS CONSTITUYENTES MEDIANTE DIAGRAMAS TERNARIOS.....	44
8. MOLIENDA Y TAMIZADO	50
9. MÉTODO DE CONFORMADO.....	53



9.1.	MEZCLA.....	54
9.2.	PROCESO DE CONFORMADO POR MOLDEO MEDIANTE EL PROCESO STARCH.....	56
9.3.	MECANIZADO DE LAS PROBETAS EN VERDE.....	58
9.4.	PROCESO DE SINTERIZACIÓN.....	62
9.5.	ADECUACIÓN SUPERFICIAL: DESBASTE Y PULIDO	65
10.	COMPORTAMIENTO FRENTE AL DESGASTE	67
11.	MICROSCOPIA ÓPTICA	69
12.	ENSAYOS DE DUREZA	70
12.1.	DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL.....	73
13.	COMPORTAMIENTO ACÚSTICO	75
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		77
14.	DIFRACCIÓN DE RAYOS X	79
15.	PRESENCIA DE PARTÍCULAS DE HIERRO DE LA ESCORIA DE SOLDADURA	81
16.	DENSIDADES EN VERDE.....	82
17.	CURVAS DE SINTERABILIDAD	84
17.1.	CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA	89
18.	DUREZA	92
18.1.	DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL.....	93
19.	COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO.....	100
20.	COMPORTAMIENTO ACÚSTICO	131
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES.....		145
CONCLUSIONES		146
CAPÍTULO 5: PERSPECTIVAS DE FUTURO		148
PERSPECTIVAS DE FUTURO		149
CAPÍTULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		150
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		151



ANEXOS	162
ANEXO 1. DENSIDADES EN VERDE.....	163
ANEXO 2. DENSIDADES SINTERIZADO	166
ANEXO 3. MEDIDAS DE DUREZA.....	169
ANEXO 4. CONDICIONES DEL ENSAYO TRIBOLÓGICO	173
ANEXO 5. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO	174



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	6
1. RESUMEN	8
2. OBJETIVOS	9
3. TRATAMIENTO DE RESIDUOS	10
3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS	10
3.2. RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	11
3.3. SITUACIÓN ACTUAL	12
3.4. REUTILIZACIÓN DEL LADRILLO	13
3.5. RESIDUOS INDUSTRIALES.....	14
3.6. SITUACIÓN ACTUAL	15
3.7. REUTILIZACIÓN DE LA ESCORIA DE SOLDADURA O FLUX	15
4. PROCESADO DE CERÁMICOS.....	17
4.1. EXTRACCIÓN	18
4.2. OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA EN FORMA DE POLVOS.....	18
4.2.1. TRITURACIÓN Y MOLIENDA.....	19
4.2.2. CRIBADO.....	20
4.3. TÉCNICAS DE CONFORMADO	21
4.3.1. COMPACTACIÓN O COMPRESIÓN.....	21
4.4. SINTERIZACIÓN	27
5. COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO.....	32
6. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO	39



1. RESUMEN

Durante años, tanto los residuos derivados de la actividad industrial como los generados en la construcción y demolición, han sido destinados a su depósito en vertedero. Sin embargo, las cantidades producidas han crecido de manera exponencial siendo cada vez más complejo su almacenamiento.

Además del problema medioambiental ocasionado por la gran cantidad de residuos, los recursos naturales consumidos no son inagotables. Incluso estos residuos, en algunas ocasiones, llegan a provocar importantes riesgos de salud en los seres vivos.

Es por ello que el presente Proyecto Fin de Carrera propone una vía de solución a los problemas descritos anteriormente mediante la reutilización de los residuos, en este caso, procedentes de la construcción como el ladrillo y residuos industriales como es la escoria de soldadura, más comúnmente denominada flux. Para dicho fin, se ha tratado de obtener el material más óptimo mediante una curva de sinterabilidad trazada con distintas mezclas de composiciones de ambos elementos. Seguidamente, se realizaron una serie de ensayos de desgaste, dureza y acústicos.



2. OBJETIVOS

El objetivo fundamental consiste en conseguir un ahorro energético en la fabricación de nuevos ladrillos a partir de sus residuos, mediante el aporte de un fundente como es la escoria de soldadura o flux, reduciendo la temperatura de sinterización.

Para conseguir el principal objetivo es necesario emplear el proceso de moldeo Starch para la fabricación de piezas de composición binaria de ladrillo y residuos de escoria de soldadura.

Realizar las mezclas de polvo de residuo de ladrillo con escoria de soldadura en las siguientes proporciones: 2% de flux denominada "L98FL2", 3%"L97FL3", 4%"L96FL4", 5%"L95FL5", 6%"L94FL6" y 8%"L92FL8" y el restante porcentaje de ladrillo respectivamente como refleja el nombre escogido para designar cada muestra. Obtener las densidades en verde y densidades de sinterizado, para trazar la curva de sinterabilidad y definir la ventana óptima de sinterización.

Estudiar la dureza de las piezas fabricadas y evaluar su desgaste mediante el coeficiente de fricción y desgaste. Evaluar cómo influye la temperatura de sinterización sobre el comportamiento frente al desgaste.

Y por último, realizar un ensayo acústico de las piezas más idóneas para este fin.



3. TRATAMIENTO DE RESIDUOS

El desarrollo industrial y económico que había acontecido de manera creciente hasta hace pocos años, ha llevado a un gran aumento de los residuos generados.

Además de la escasa prevención de la producción de residuos se suma el limitado reciclado de los que se generan provocando contaminación de suelos y acuíferos en vertederos incontrolados, incluso el deterioro del paisaje y la eliminación de estos residuos sin aprovechamiento de sus recursos valorizables.

Es por ello que en la actualidad, se manifiesta un mayor interés en el reciclaje para una utilización racional de los recursos naturales con el objetivo de proteger y mejorar la calidad de vida, y defender y restaurar el medio ambiente [1].

3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS

Según el Catálogo Europeo de Residuos CER, aprobado por Decisión 2000/532/CE, de la Comisión Europea, de 3 de mayo. Y modificado por las Decisiones 2001-118, de 16 de enero; 2001-119, de 22 de enero y por la Decisión del Consejo Decisión 573-2001, de 23 de julio, los residuos se clasifican del siguiente modo:

Tabla 1. Capítulo 12 del Catálogo Europeo de Residuos CER [2].

12 Residuos del moldeado y del tratamiento físico y mecánico de superficie de metales y plásticos	
Código	Subcapítulos de la lista de residuos
12 01	Residuos del moldeado y tratamiento físico y mecánico de superficie de metales y plásticos
12 01 13	Residuos de soldadura

Tabla 2. Capítulo 17 del Catálogo Europeo de Residuos CER [2].

17 Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	
Código	Subcapítulos de la lista de residuos
17 01	Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
17 01 02	Ladrillos



Para el presente proyecto nos centraremos en dos tipos de residuos, los que se sitúan bajo el código 12 “Residuos del moldeado y del tratamiento físico y mecánico de superficie de metales y plásticos” en el subcapítulo con el código 12 01 “Residuos del moldeado y tratamiento físico y mecánico de superficie de metales y plásticos” y concretamente 12 01 13 “Residuos de soldadura”; y los residuos que se encuentran en el capítulo 17 “Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)” en el subcapítulo con el código 17 01 “Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos” y de forma más precisa 17 01 02 “Ladrillos”.

3.2. RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Se consideran residuos de construcción y demolición (RCDs) cualquier sustancia u objeto que cumpla la condición de residuo establecida en el artículo 3 de la Ley 22/2011 de 28 de julio de residuos y suelos contaminados, y aquellos que se generan en las actividades propias de construcción [3].

Se componen de residuos constituidos por tierras, áridos mezclados, restos de hormigón, ladrillos, cristales, pavimentos asfálticos, materiales refractarios, plásticos, yesos, maderas, etc. [4,5].

En la última década, el principal motor de la economía española ha sido el sector de la construcción que ha alcanzado índices muy elevados de actividad. Los residuos generados por esta actividad plantean una problemática ambiental en cuanto al creciente volumen de residuos y de su tratamiento, a pesar de que en la actualidad dicha producción haya decaído debido a la situación que presenta España [1].

Es por esto que se ha propiciado la aparición de normas legales que regulan la producción y gestión de los residuos de construcción mediante las que se pretende garantizar su aplicación real.

La finalidad específica de estas normas, implica la reducción de la producción de residuos, la reutilización de aquellos residuos que así lo permitan, el reciclado de los residuos que no puedan reutilizarse, la valorización energética de los residuos que no puedan reciclarse y por último, el depósito adecuado en vertedero de todo lo que no pueda valorizarse [6].



La producción y gestión de los residuos de construcción y demolición se regula mediante la aplicación del Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero y establece el principio de jerarquía que debe regir en la gestión de estos residuos [1].



Figura 1. Jerarquía de la gestión de residuos de construcción y demolición [7].

La aparición de estas normas podría frenar el deterioro del medio ambiente. No obstante, esto implica un cambio drástico en la mentalidad de todos los agentes implicados, siendo imprescindible su compromiso activo para conseguir la sostenibilidad de la actividad constructiva, aportando así una pequeña contribución que permita acercarse a la sostenibilidad global [6].

3.3. SITUACIÓN ACTUAL

En la Figura 2, se muestra gráficamente la composición aproximada en cuanto a la generación de residuos de construcción y demolición. Es importante destacar, puesto que es uno de los dos materiales en los que se ha centrado el presente proyecto, que los materiales cerámicos (ladrillos, azulejos y otros cerámicos) suponen más de la mitad (54%) del resto de residuos generados.

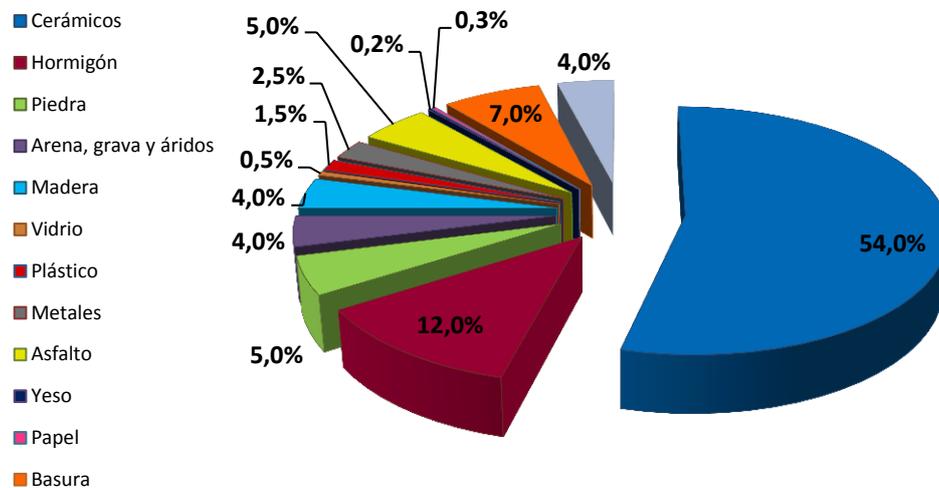


Figura 2. Composición de los residuos de construcción y demolición [8].

3.4. REUTILIZACIÓN DEL LADRILLO

La arcilla es el material básico del ladrillo, material sedimentario formado por partículas pequeñas de silicatos hidratados de alúmina junto con otros minerales como el caolín, la montmorillonita y la illita. Y concluida la etapa de cocción, adquiere las propiedades que le caracterizan [9].

Se pueden distinguir diferentes vías para su reutilización, debido a que su fabricación es un proceso en el que se realiza un uso intenso de energía y otros recursos; y con el motivo de propiciar la reducción anual de residuos.

En primer lugar, el ladrillo junto con otros residuos procedentes de demolición sin selección previa aunque libres de impurezas, pueden ser utilizados directamente como material de relleno, sub-bases de carreteras o pavimento en vías temporales de tránsito de vertederos. Además de reciclarse, los ladrillos pueden dedicarse a la fabricación de productos secundarios [10].

Otra forma de reutilización es la del aprovechamiento de los ladrillos que quedan en buenas condiciones tras una demolición. Y a pesar de los inconvenientes como el de limpiar los ladrillos, dificultad para eliminación del mortero de los mismos, la diferente procedencia y



variedad de formas, investigadores han conseguido desarrollar un sistema que separa los ladrillos reutilizables y procede a la eliminación del mortero de forma automatizada [11].

Diversos estudios realizados en esta Escuela [12-17], se han centrado en la reutilización de residuos de ladrillo. *A través de este nuevo proyecto se ha intentado disminuir la temperatura de sinterización de los residuos de ladrillo mediante adición de flux o escoria de soldadura, o lo que es lo mismo, realizando una mezcla binaria de ambos residuos.*

3.5. RESIDUOS INDUSTRIALES

Los residuos industriales son aquellos que se generan de las actividades industriales, aunque pueden ser muy diversos en función del tipo de industria que los genere. Muchos de estos residuos permiten ser reutilizados y reciclados, pero las técnicas implican un elevado coste y provocan una gran pérdida económica. No obstante, existen industrias que están comenzando a utilizar estos procesos para favorecer el medio ambiente.

Se puede hacer una clasificación de los residuos en dos tipos diferenciados: inertes y peligrosos [18-20].

Se consideran residuos industriales inertes o no peligrosos (RINP), a aquellos residuos producidos en el ejercicio de una actividad industrial, que no estén identificados como peligrosos en la Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero [21,22]. Son inofensivos para el medio ambiente y tienen una fácil reutilización para las obras públicas y similares, aunque en ocasiones se llevan a vertederos provocando además de un impacto visual, una gran afección en el agua, suelo y aire en mayor o menor medida [20,23].

De igual forma, los residuos industriales peligrosos (RIP), son los que se incluyen en la citada orden [21,22]. Estos residuos son sustancias tóxicas, corrosivas, algunos plásticos que incluso pueden llegar a causar reacciones químicas indeseables. Dependiendo de la concentración de éstos, pueden ser peligrosas para la salud y el medio ambiente. La principal característica es el largo periodo de tiempo que tardan en degradarse. Las estructuras químicas de algunas de las sustancias que contienen este tipo de residuos, tardan años en descomponerse en formas menos tóxicas debido a que se trata de estructuras muy estables [18,19,24].



3.6. SITUACIÓN ACTUAL

Según los datos que proporciona la Junta de Castilla y León en su sección de Medio Ambiente, en el año 2010 se han contabilizado 1.163.113 toneladas de residuos industriales no peligrosos (RINP) producidas en Castilla y León. En lo referente a los residuos industriales peligrosos (RIP) durante el año 2010 se generaron en Castilla y León 165.792 toneladas.

A continuación se muestran las cantidades generadas en Castilla y León de residuos no peligrosos según la LER para “Residuos del moldeo y del tratamiento físico y mecánico de superficie de metales y plásticos” durante los años 2009-2010, ya que es el capítulo donde se encuentra la escoria de soldadura utilizada en el proyecto [25].

Tabla 3. Generación de residuos ind. no peligrosos del Capítulo 12 en Castilla y León 2009-2010 [25].

Familia LER	Descripción LER	2009		2010	
		Cantidad (t)	%	Cantidad (t)	%
12	Residuos del moldeo y del tratamiento físico y mecánico de superficie de metales y plásticos	57.888	4,98%	75.854	6,52%
TOTAL		1.163.098	100%	1.163.113	100%

3.7. REUTILIZACIÓN DE LA ESCORIA DE SOLDADURA O FLUX

La escoria de soldadura está formada por diferentes compuestos minerales en función del fabricante que se reserva la composición química completa. Aunque los más habituales son SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MnO y MgO [26].

El proceso de soldadura por arco sumergido o método SAW, consiste en la fusión de un electrodo macizo o tubular continuo, que está protegida por la escoria generada por un flux, granulado o en polvo, con el que se alimenta el arco por separado.

El proceso permite depositar grandes volúmenes de metal de soldadura de buena calidad a bajo coste. Además, el sistema es automático y de este modo, se obtienen grandes rendimientos en producción. Se puede usar también como un proceso semiautomático, mediante una pistola manual, de forma que se aportaría el flux que viene alimentado de un tanque a presión.

El flux protege el arco y el baño de fusión de la atmósfera, de tal manera que ambos permanecen invisibles durante el proceso. Parte del flux se funde y así protege el arco, lo estabiliza, genera una escoria de viscosidad y tensión superficial adecuadas e incluso permite añadir elementos de aleación o compensar la pérdida de ellos. El resto de flux no fundido, puede recuperarse y reciclarse en el proceso [27].

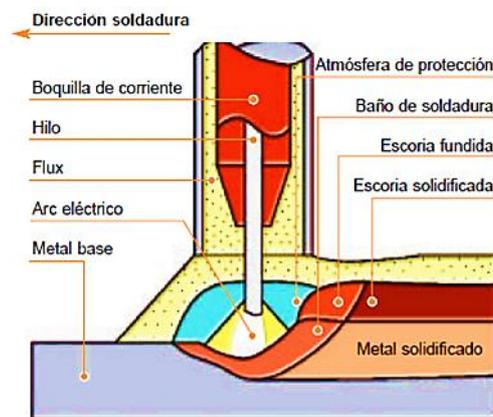


Figura 3. Método de soldadura por arco sumergido (SAW) [27].

Para recoger el flux sobrante y proceder a su reutilización, se suelen utilizar equipos de aspiración. Sin embargo, la cantidad de flux que se obtiene es muy pequeña con relación a la que se desperdicia. No obstante, el flux recogido deberá ser depurado de cualquier tipo de contaminante que se haya incorporado durante el proceso. Incluso, la adición de un 10% a un 40% de flux nuevo, contribuiría a mantener la granulometría inicial del flux.

El proceso de soldadura SAW presenta numerosas ventajas frente a otros procesos, entre las que se encuentra su alta productividad, convirtiéndolo en el más empleado [27].

Son pocos los datos y las líneas de investigación abiertas sobre este residuo. En la Escuela Politécnica Superior de Zamora, simplemente se ha iniciado su investigación con un estudio previo sobre la valorización mixta de residuos de construcción y escoria de soldadura [13].



4. PROCESADO DE CERÁMICOS

Los materiales cerámicos son materiales de naturaleza inorgánica constituidos por metales y no metales, caracterizados por su baja o incluso inexistente tenacidad. Debido a su gran resistencia eléctrica, térmica y frente al desgaste son útiles para innumerables aplicaciones dentro de la industria. Sus propiedades varían dependiendo del tipo de enlace, en definitiva, en función de su microestructura.

Si realizamos una breve mención de las características generales de los materiales cerámicos podríamos destacar las siguientes:

- Presentan una estructura cristalina de base compleja.
- Constituidos por elementos metálicos y no metálicos.
- Enlace iónico y/o covalente.
- Se dividen en cerámicos tradicionales y avanzados.
- Apenas sufren deformación plástica debido a que son muy poco dúctiles.

Sin embargo, sus propiedades más importantes son:

- Opacidad.
- Baja tenacidad.
- Baja conductividad térmica y eléctrica.
- Alta resistencia a compresión.
- Buena resistencia a la corrosión y al desgaste incluso en ambientes agresivos por su gran estabilidad química.
- Elevada fragilidad y dureza.
- Alta temperatura de fusión [28].

Las etapas generales del proceso de fabricación de materiales cerámicos, reseñando aquellos procesos que plantean más similitud con los estudiados en este proyecto, pueden ser [29,30]:



1. Extracción

2. Obtención de la materia prima en forma de polvos

3. Técnicas de conformado

Compactación a partir de polvos sin aporte de calor (en frío): <i>Compactación uniaxial</i> <i>Compactación isostática</i>	Moldeo a partir de pastas húmedas: <i>Moldeo en barbotina</i> <i>Proceso Starch</i>	Conformado plástico: <i>Moldeo por inyección</i> <i>Moldeo por extrusión</i>
--	---	--

4. Tratamientos térmicos

Secado
Cocción (sinterizado)

4.1. EXTRACCIÓN

Las canteras de arcilla o barreros son explotaciones a cielo abierto y su extracción se realiza por medios mecánicos. Para la fabricación de determinados materiales cerámicos, es necesario retirar la primera capa del material ya que éste se encuentra en peores condiciones de las se requieren [29].

4.2. OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA EN FORMA DE POLVOS

Para evitar cualquier tipo de defectos que no puedan eliminarse posteriormente en la etapa de sinterización, es necesario que el material tenga un tamaño y forma controlados. Es por esto que se debe realizar un procesado del material considerando, en todo momento, la distribución de tamaños de las partículas y así alcanzar las propiedades más óptimas del



producto final. Los métodos más habituales para la obtención del polvo cerámico son los métodos relativos a trituración y molienda mecánica [31], aunque otra forma muy extendida es la síntesis inorgánica polvos de alta pureza [32,33] y en menor medida se encuentran los métodos de atomización (fusión de sistemas cerámicos y solidificación en forma de partículas) [34].

4.2.1. TRITURACIÓN Y MOLIENDA

Las operaciones de trituración y molienda suelen realizarse en distintos tipos de molinos: de rodillos, martillos, molinos de bolas, autógena, etc.

El molino de bolas está compuesto por una carcasa que gira sobre su propio eje donde se introduce el material a moler y la carga, generalmente de bolas aunque existe la opción de que sean cilindros o varillas. Durante el giro, debido al movimiento del material y la carga de bolas en su interior, se produce una disminución del tamaño de partícula por impacto partícula-partícula y partícula-bola; por fricción y/o compresión entre las partículas y las bolas.

La eficiencia de la molienda depende de la dureza, tenacidad, densidad y tamaño relativo de las bolas así como del propio material a moler y la velocidad de rotación del molino que tendrá un efecto decisivo. La dureza y la tenacidad de las bolas deben ser superiores a las de la carga, ya que en caso contrario, serían las propias bolas las que sufrirían el desgaste y molienda.

La distribución de tamaños de las bolas es otra de las características para la obtención de una distribución óptima de tamaños en la molienda. Las bolas de mayor tamaño actúan por compresión rompiendo las partículas mientras que las pequeñas lo hacen por fricción reduciendo el tamaño de las mismas. Por lo tanto, cuanto mayor sea la distribución de tamaños de las bolas, mayor efectividad en la molienda [35]. Cuando la velocidad del molino de bolas es demasiado baja, no se producirá el efecto de machaqueo. Mientras que si es excesivamente alta, las bolas quedarán adheridas a la pared de la carcasa y de igual forma, no se conseguirá la molienda del material [36].

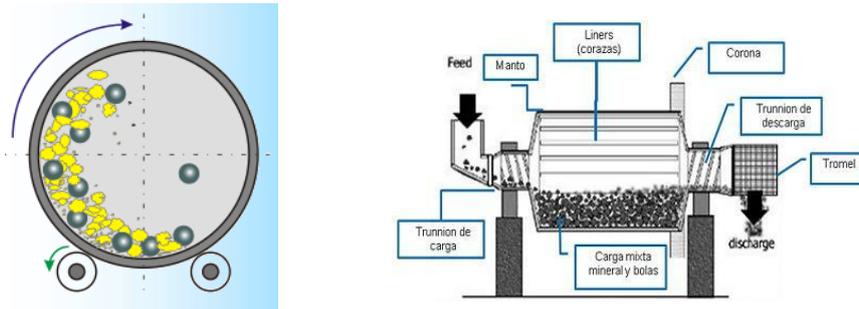


Figura 4. Esquema de un molino de bolas [37].

La molienda se puede realizar por dos vías diferenciadas: vía húmeda y vía seca. En la vía húmeda, no hay problemas de emisión de polvos ni de compactación y por ello, la molienda es muy homogénea. Sin embargo, se consiguen menores tamaños de partícula a igualdad de tiempo de molienda que por vía seca. Aunque si la molienda se realiza en seco, se evita la necesidad del posterior secado [35,36].

4.2.2. CRIBADO

El cribado consiste en una operación de clasificación por tamaño de partículas, obligándolas a enfrentarse a la superficie de cribado que permite el paso de las partículas con dimensiones inferiores al tamaño del pasante y reteniendo aquellas otras con un tamaño superior a la dimensión de la abertura.

En el proceso existen diversos factores que determinan la eficacia y rapidez con que las partículas de dimensiones adecuadas son capaces de atravesar la superficie de cribado [38]. Entre ellas se encuentran:

- La forma de las aberturas.
- Tamaño relativo de la partícula y abertura.
- Ángulo de ataque de las partículas o lo que es lo mismo, la inclinación de la criba.
- El porcentaje de humedad superficial, puesto que alrededor del 1% el cribado tiene gran dificultad.
- El espesor de la capa de material, ya que un espesor óptimo favorece el fenómeno de estratificación de las partículas en las cribas vibratorias.



- El movimiento de la criba aumenta la probabilidad de que pasen las partículas con un tamaño inferior al de la dimensión de malla.

4.3. TÉCNICAS DE CONFORMADO

4.3.1. COMPACTACIÓN O COMPRESIÓN

La compactación (o compresión) es una etapa que tiene por objeto dar consistencia a la masa de polvo con una forma determinada (pieza) y conseguir una entidad suficiente para su manipulación desde su extracción del molde (o matriz) hasta el paso por el horno de sinterización. En general, consiste en aplicar una presión suficiente a la masa de polvo colocada en una matriz. Mediante esta presión, disminuye la porosidad, aumenta la cohesión entre las partículas y el número de puntos de contacto. Como se verá más adelante, existen otros métodos en los cuales no es necesario aplicar presión.

Si hablamos de sistemas con aplicación de presión, la máxima densidad del compacto verde depende de varios factores como la intensidad de la presión aplicada, velocidad de aplicación, susceptibilidad del material a la deformación plástica y propiedades inherentes de endurecimiento y características del polvo (en el caso que tenga capacidad de deformación), en particular la forma de la partícula.

La curva de compresibilidad (Figura 5) es la representación gráfica de la densidad en función de la carga de compactación de los polvos. La curva permite determinar la presión necesaria que hay que aplicar al polvo, y así obtener la mínima presión necesaria para conseguir la máxima densidad de las probetas.

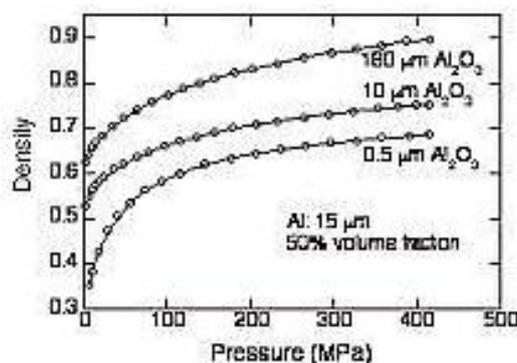


Figura 5. Curva de compresibilidad de materiales cerámicos [39].



En la compactación de los materiales cerámicos la presión que se puede aplicar es menor que la que admiten los materiales metálicos, puesto que los cerámicos no poseen capacidad de deformación, de manera que al aumentar la presión aplicada se fracturan [31].

COMPACTACIÓN EN FRÍO

La compactación en frío consiste en la densificación de polvos en una matriz mediante la aplicación de una presión. La pieza adopta la forma de la matriz. Dependiendo de las direcciones de presión se distingue la compactación uniaxial y la compactación isostática [40].

COMPACTACIÓN UNIAXIAL

Este método supone aplicar presión en una única dirección hasta conseguir la compactación de los polvos [41].

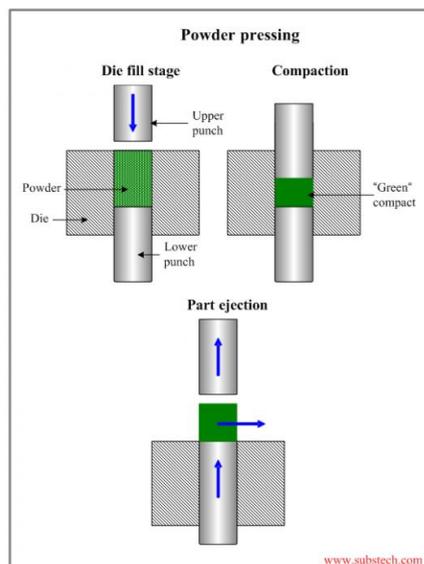


Figura 6. Esquema de compactación uniaxial [41].

Las limitaciones del proceso son la imposibilidad de alcanzar densidades próximas a la teórica. Además, la presión aplicable está limitada por el área proyectada de las piezas que se van a fabricar que se relaciona de manera directa con la capacidad de las prensas de compactación, por lo que las piezas son de un tamaño pequeño. Igualmente, la relación de altura/diámetro tiene que ser inferior a 2 para evitar elevadas diferencias de densidad por lo

que no se consiguen piezas muy esbeltas. No obstante, con un proceso semicontinuo se reduce el coste por pieza producida [42,43].

COMPACTACIÓN ISOSTÁTICA EN FRÍO

Consiste en compactar el polvo mediante la aplicación de presión desde múltiples direcciones a través de un medio líquido o gaseoso que rodea la pieza compactada [31,41].

El polvo se coloca en un molde de plástico de material sintético, que se introduce en el interior de la cámara de presión. El molde y la cámara se cierran herméticamente comprimiendo el polvo y se aumenta progresivamente la presión hidráulica hasta un valor prefijado [44].

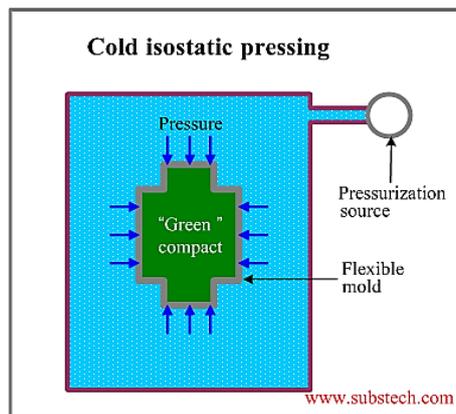


Figura 7. Esquema de compactación isostática [41].

La principal ventaja de este método es una mejor uniformidad de la compactación y la posibilidad de realizar formas más complejas como tubos de pared delgada que otros sistemas no permiten [41]. La pieza compactada en verde tiene una mayor densidad y más homogénea que con otras técnicas [44]. Además, es una de las técnicas más idóneas para compactar materiales de tipo cerámico.

Si lo comparamos con el anterior, en la compactación isostática en frío se pueden compactar probetas con una elevada relación altura/diámetro. Sin embargo, en ocasiones son necesarias operaciones de acabado superficial, el molde no suele ser reutilizado y es un proceso discontinuo [31].



MOLDEO A PARTIR DE PASTAS HÚMEDAS

MOLDEO EN BARBOTINA

Una vez preparado el material cerámico en polvo y de un líquido, comúnmente agua, en una suspensión estable llamada barbotina, se realiza el vertido de la barbotina en un molde poroso, generalmente fabricado de yeso, que permite la absorción parcial de la parte líquida de la barbotina en el molde. Según se elimina el líquido de la barbotina, se forma una capa de material semiduro contra la superficie del molde y cuando el espesor de la pared es la adecuada, se interrumpe el proceso y el exceso de barbotina se desaloja de la cavidad drenando o escurriendo el molde. Por último, hasta que no se alcance la resistencia necesaria para ser manipulado, no se puede proceder a retirarlo. El último paso consiste en su sinterizado [45,46].

Algunas de sus limitaciones son la baja productividad y la escasa exactitud dimensional para espesores por debajo de 10 milímetros. Es necesario un control de las contracciones y saturación del molde. No obstante, se pueden conseguir piezas grandes y formas complejas con un bajo coste [46,47].

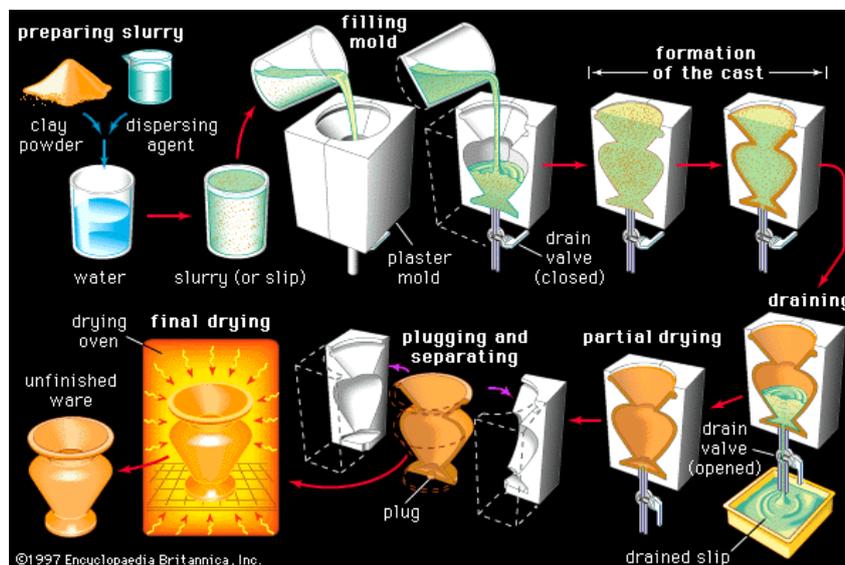


Figura 8. Etapas del moldeo en barbotina [48].



PROCESO STARCH

El proceso de moldeo Starch consiste en una técnica en la que se emplea un aglutinante que sirve de unión entre los polvos cerámicos y el agua. El objetivo de este ligante es el de permitir a la pieza adoptar una óptima entidad mecánica para su manipulación [49,50].

El tipo de aglutinante utilizado en este estudio fue el almidón de arroz. Sin embargo, el método permite utilizar diferentes tipos. Entre ellos se puede destacar el almidón de patata utilizado en numerosos estudios [51].

Existen otros procesos similares como la técnica de conformado tape casting que se utiliza para la producción de láminas de material cerámico a gran escala y bajo coste. En este caso, al polvo cerámico se le adicionan disolventes, dispersantes, aglutinantes y plastificantes que se echan en una superficie para a continuación secarla y sinterizarla para obtener una forma final deseada. Dependiendo de la composición del polvo los disolventes pueden ser orgánicos no acuosos (alcoholes, cetonas o hidrocarburos). Sin embargo, éstos han desaparecido por aspectos económicos, ambientales y de salud y se han reemplazado por lechadas acuosas [52,53].

CONFORMADO PLÁSTICO

El conformado plástico se puede conseguir mediante moldeo por inyección o moldeo por extrusión. En este caso, se aplica presión para empujar la masa (pasta húmeda o con ligantes) y rellenar el molde.

MOLDEO POR INYECCIÓN

El moldeo por inyección es un proceso cíclico en el que la mezcla de los polvos cerámicos es forzada a introducirse en la cavidad del molde por medio de un tornillo que gira en un cilindro para darle la forma requerida [31,41].

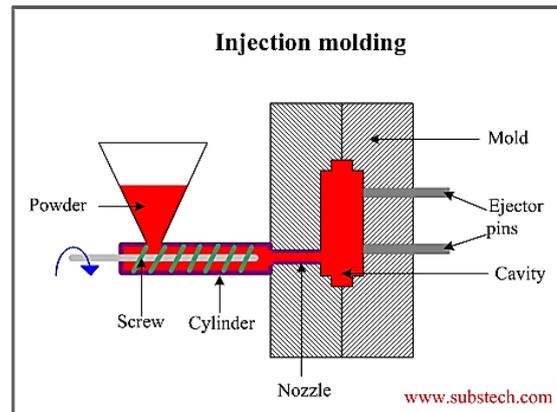


Figura 9. Moldeo por inyección [41].

En primer lugar, se realiza la mezcla homogénea de los polvos cerámicos con el ligante hasta conseguir una mezcla homogénea. Se inyecta la mezcla en el molde y pasada la etapa del moldeo, se elimina el ligante. Finalmente, se procede a sinterizar la pieza [31].

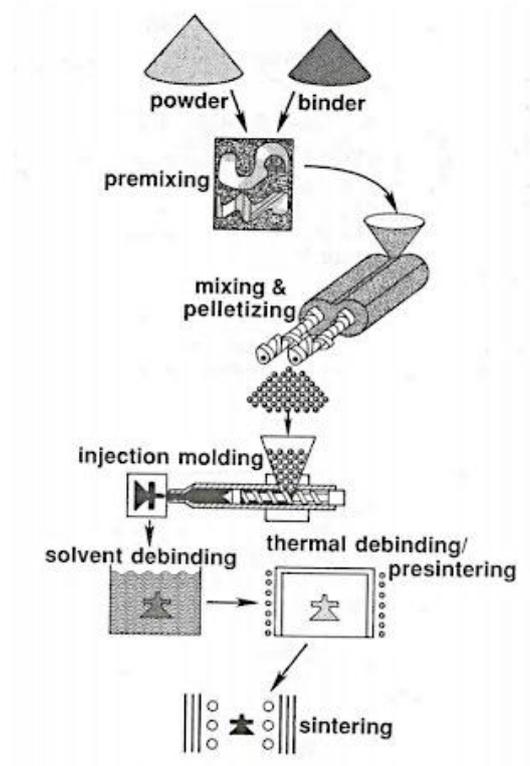


Figura 10. Etapas del moldeo por inyección [54].



Este método se utiliza ampliamente para la fabricación de piezas pequeñas con formas complejas. El ciclo de operaciones en el método de moldeo por inyección es inferior al de métodos alternativos que tienen una mayor duración. Sin embargo, la técnica provoca grandes contracciones de la pieza, que se debe tener en cuenta en el diseño de los moldes.

MOLDEO POR EXTRUSIÓN

La mezcla de materiales plásticos y cerámicos pasa a través de una tolva de alimentación donde se vierte la mezcla en forma de gránulos o polvo. Seguidamente, un tornillo sinfín situado en el interior de un cilindro empuja la masa hacia la boquilla de salida que le confiere la forma deseada.

Este método se emplea para obtener piezas de gran longitud [41].

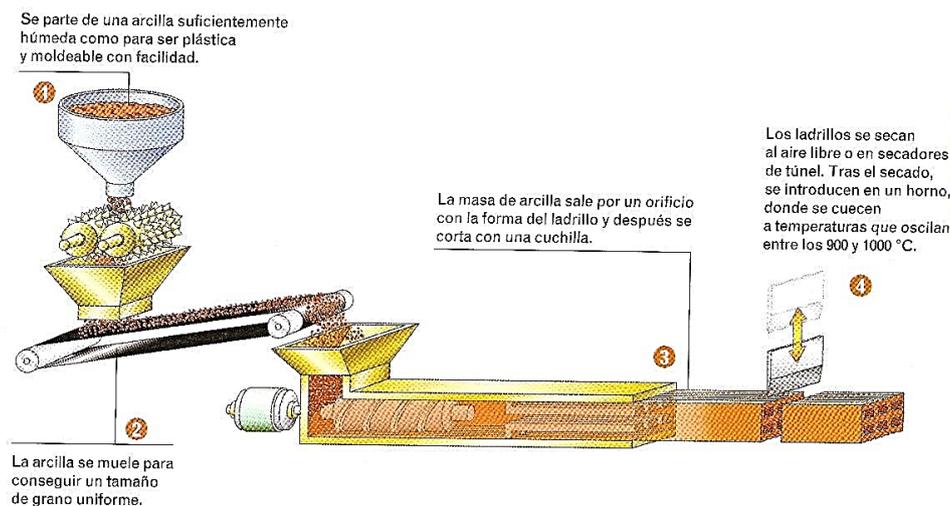


Figura 11. Moldeo por extrusión [55].

4.4. SINTERIZACIÓN

La sinterización consiste en la densificación de los materiales cerámicos mediante el aporte de calor a la pieza de material para originar la eliminación de poros existentes entre sus partículas a una temperatura inferior a la de fusión [31, 56].

Las propiedades de los polvos de cada constituyente tienen gran relevancia, puesto que afectan a la capacidad de la sinterización de la pieza. Dentro de estas propiedades se



encuentran el tamaño y forma de partícula, además de la distribución de tamaños [57]. Mediante la sinterización se disminuye la energía libre entre granos, consiguiendo una óptima cohesión. Cualquier material orgánico o gas incrustado en la pieza en verde, es eliminado durante el proceso [58].

Por lo general, es posible conseguir con tiempos cortos a temperaturas elevadas efectos análogos que con tiempos largos a temperaturas bajas, aunque en este caso la decisión es por el factor económico [44].

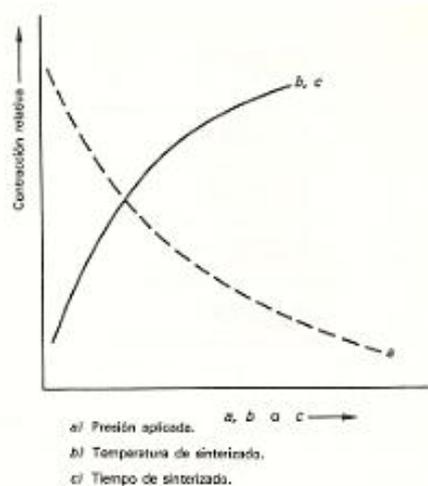


Figura 12. Representación entre contracción y variables de sinterizado [44].

Habitualmente, se puede decir que una alta densidad en verde correspondería con una elevada densidad de sinterizado, salvo en algunos casos de sistemas cerámicos. Como se puede ver en la Figura 12, a partir de una determinada presión no se mejora de densidad en verde de la muestra.

Según el estado de los componentes que aparecen durante la sinterización, se distinguen dos tipos: sinterización en fase sólida, cuando los componentes permanecen en estado sólido durante todo el proceso; o sinterización con fase líquida, cuando existe algún componente que ha pasado al estado líquido durante la sinterización.



SINTERIZACIÓN EN FASE SÓLIDA

La sinterización se desarrolla en tres etapas. En la etapa inicial, el primer fenómeno observado es el crecimiento de los puentes de enlace. Las áreas de contacto de las partículas aumentan al soldarse formándose cuellos de unión entre las partículas. Las dimensiones de la pieza objeto de la sinterización varían ligeramente porque los centros de las partículas se aproximan y la resistencia aumenta.

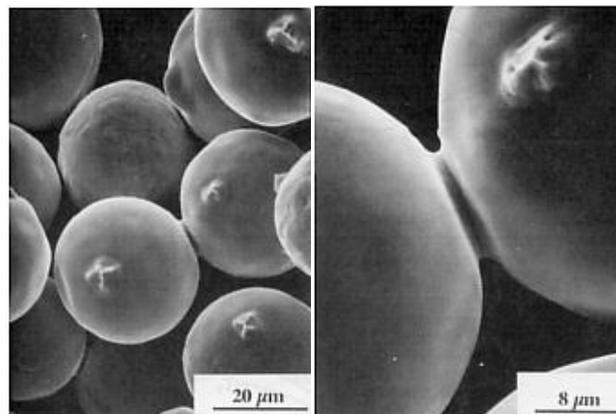


Figura 13. Formación de cuellos entre partículas de níquel sinterizadas a 1030°C [59].

La segunda etapa es la densificación, las partículas independientes comienzan a perder su identidad, de este modo se cierran los canales existentes entre las partículas, produciéndose un aumento de la densidad y cambios dimensionales de la pieza.

En la etapa final los poros disminuyen y se cierran, de forma que buscan una superficie de mínima energía. Los cambios dimensionales y de densidad son prácticamente inapreciables en esta etapa [44].

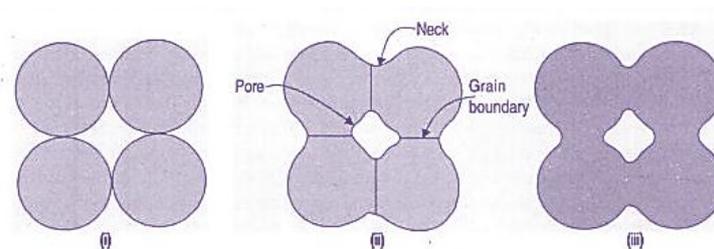


Figura 14. Etapas de la sinterización en fase sólida [42].

SINTERIZACIÓN CON FASE LÍQUIDA

La temperatura que se alcanza durante la sinterización es menor que la temperatura de fusión del constituyente de mayor proporción, pero dicha temperatura es superior a la temperatura de fusión de uno de sus constituyentes secundarios, de esta manera se crea fase líquida. En este tipo de sinterización también se distinguen tres etapas.

En la primera etapa se produce el reapilamiento de las partículas. Al alcanzar la temperatura de sinterización se forma fase líquida debido a la fusión de alguno de los componentes, de manera que se produce una reorganización de las partículas y una densificación de la pieza.

La segunda etapa corresponde a la disolución de las partículas en el líquido y el transporte por difusión de las partículas pequeñas con reprecipitación sobre las grandes. Se produce un engrosamiento microestructural junto con el crecimiento de los cuellos que se han creado en el punto de contacto entre las partículas.

En la última etapa tiene lugar la eliminación de poros, crecimiento de cuellos y de granos. Aparecen poros aislados debido a la coalescencia de las partículas. De modo que los poros se redondean y desaparecen los pequeños, al mismo tiempo que los mayores crecen [44, 60].

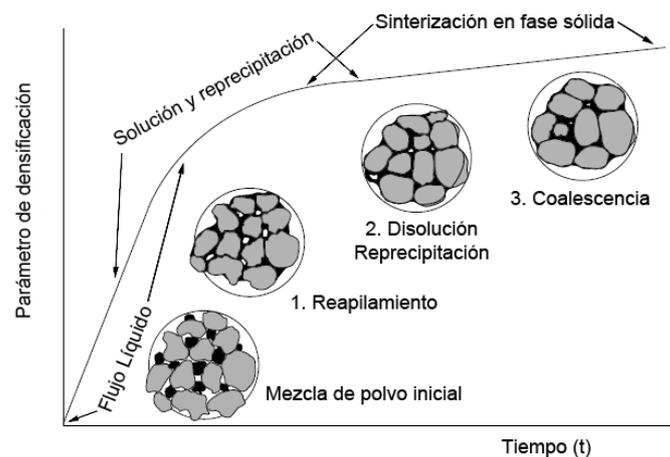


Figura 15. Etapas de la sinterización con fase líquida [61].



En la sinterización de muchos de los materiales cerámicos más empleados se suele producir la aparición de una fase líquida, lo cual supone un ahorro energético importante. Este hecho se ha comprobado en estudios precedentes realizados en esta Escuela [12, 13, 15, 62].

5. COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO

Se denomina tribología a la ciencia que se ocupa de la fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste y la lubricación de las superficies en contacto como un medio para evitar el desgaste [63].

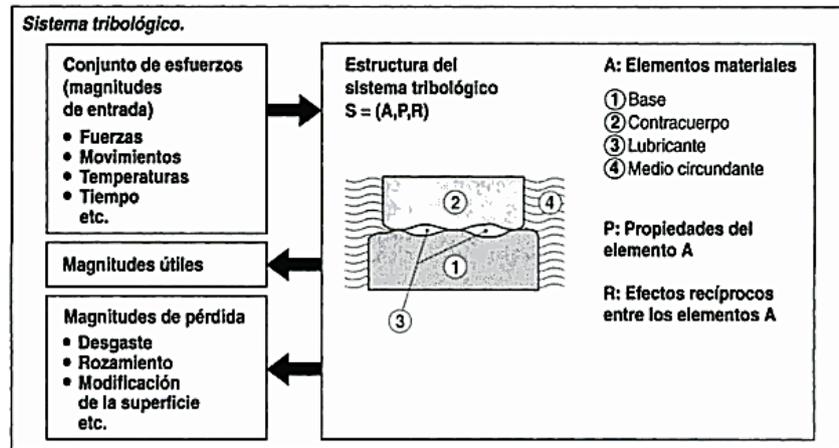


Figura 16. Sistema tribológico [64].

Cuando dos superficies planas están en contacto, la rugosidad superficial provoca numerosos puntos de contacto. El conjunto de las áreas de todos los puntos en contacto constituye el área real de contacto, que para la mayoría de los materiales será una pequeña fracción del área aparente de contacto. Ésta última, se considera al área resultante si las superficies fuesen perfectamente lisas. Por lo tanto, el área real de contacto es función de la textura superficial, propiedades del material y condiciones de carga.

Primeramente, el contacto entre dos superficies ocurre en pocos puntos que soportan la carga normal. Cuando ésta aumenta, el número de asperezas en contacto también lo hace y por ello, el área de los diferentes puntos de contacto crece para soportar la carga aumentada [65].

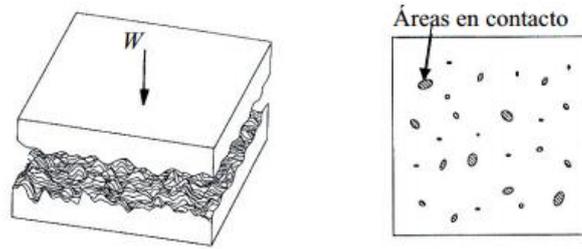


Figura 17. Esquema de superficies rugosas en contacto [65].

La fricción es la resistencia al movimiento durante el rozamiento que experimenta un cuerpo al moverse sobre otro con el que está en contacto y depende de las características de las superficies. La fricción puede ser estática o dinámica. No se trata de una propiedad del material, es una respuesta del sistema. La fricción es proporcional a la carga e independiente del área de deslizamiento de las superficies.

Mientras que el desgaste es el daño de la superficie por eliminación del material de una o ambas superficies en el movimiento relativo. En el proceso, las capas superficiales de un sólido se desprenden de la superficie. Al igual que la fricción, el desgaste no es solamente una propiedad intrínseca del material sino una respuesta integral del sistema [66].

En función del tipo de material, el desgaste puede presentar tres tipos diferenciados de comportamiento.

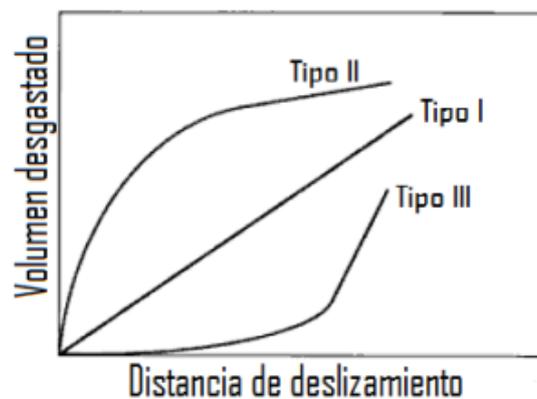


Figura 18. Comportamiento frente al desgaste [67].

En el comportamiento tipo I, el volumen obtenido en el desgaste, es proporcional a la distancia de deslizamiento. Sin embargo, en el comportamiento tipo II, se inicia con un elevado nivel de desgasta y posteriormente disminuye de forma drástica. Se trata de un comportamiento típico de materiales metálicos. Por último, en el comportamiento tipo III, comienza con un comportamiento muy resistente al desgaste para disminuir de forma brusca a partir de cierta distancia. Este comportamiento corresponde con los materiales frágiles [68].

Se denomina **desgaste abrasivo** al que se produce cuando una superficie dura desliza sobre otra superficie desprendiendo partículas y formando microesquirlas. De este modo, se producen rayas en el material [66]. En esta pérdida de material pueden intervenir cuatro mecanismos de desgaste:

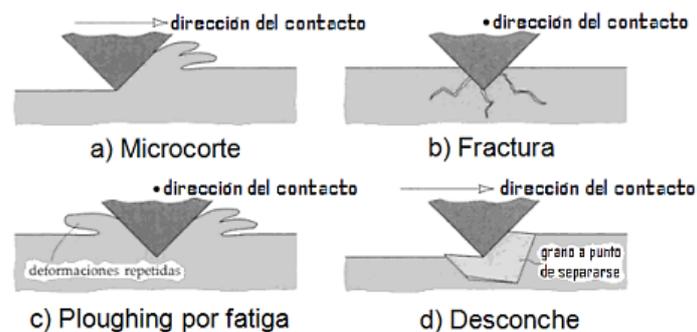


Figura 19. Mecanismo de desgaste abrasivo [68].

Los tipos mecanismos de desgaste abrasivo, Figura 19 a) y c), corresponden a materiales de naturaleza dúctil. Mientras que en los materiales frágiles se producen los mecanismos de desgaste Figura 19 b) y d).

El primer mecanismo, Figura 19 a), representa el modelo clásico de microcorte donde una aspereza de alta dureza corta una superficie de dureza menor. El material de la superficie desgastada sale mediante partículas.

Cuando el material desgastado es frágil como en el caso de los cerámicos, puede dar lugar a una fractura de la superficie desgastada. En este caso, las partículas que se han desgastado son el resultado de la convergencia de diferentes microgrietas, Figura 19 b).

Si el material desgastado es dúctil, es improbable que se produzca el microcorte. Es por ello, que la superficie desgastada se deforma repetidamente como se puede observar en la Figura 19 c) y las partículas son el resultado del desgaste mediante fatiga.

El último mecanismo, representa el desgaste por levantamiento de granos del propio material denominado, desconche o pull-out. Este mecanismo se presenta en materiales cerámicos principalmente, Figura 19 d) [31,68].

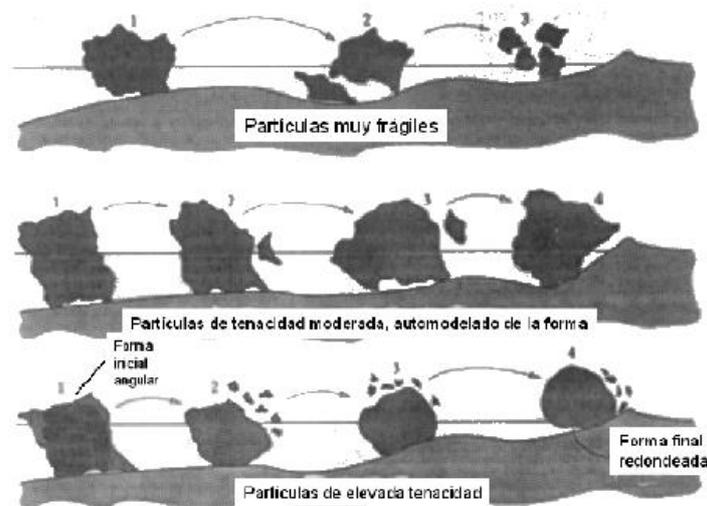


Figura 20. Comportamiento de las partículas abrasivas [31].

Cuando las partículas son extremadamente frágiles, éstas se rompen y el desgaste disminuye con el tiempo. Las partículas con una tenacidad moderada, no provocan desprendimientos de partículas. Por tanto, el desgaste es mínimo aunque se produce un gran desgaste tanto al principio como al final. Esto no es lo que sucede cuando las partículas tienen una tenacidad elevada, puesto que estas partículas se rompen muy poco. De esta forma, tienen pequeños ángulos, es decir, adquieren una forma redondeada y como consecuencia, su capacidad para levantar el material es bastante baja [31, 69].

Dependiendo de las variables del sistema y propiedades de los materiales que conforman el par tribológico, la eficiencia en la remoción del material puede variar. Aunque el mecanismo de remoción de material en desgaste abrasivo para materiales dúctiles más efectivo es el corte.

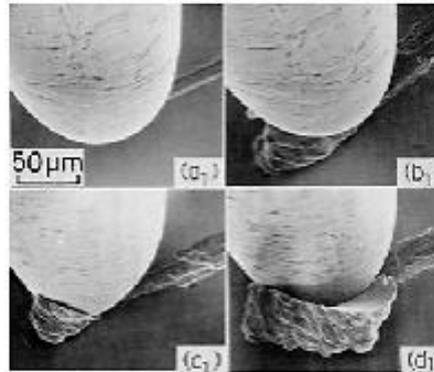


Figura 21. Micrografías de mecanismos de abrasión. (a₁) microsurcado, (b₁ y c₁) formación de proas y (d₁) microcorte [70].

La proporción de material del volumen de surco desplazado durante el proceso de abrasión de un material dúctil a ambos lados del surco dependerá del ángulo de ataque de la partícula abrasiva. Cuanto mayor es el ángulo de ataque, el corte tiene mayores probabilidades de suceder [31,70].

Lo más habitual, es que el desgaste se produzca entre tres cuerpos, ya que las partículas libres deslizan en la zona de contacto entre las superficies acelerando el proceso de desgaste. No obstante, el desgaste puede darse entre dos cuerpos [31].

El **desgaste adhesivo** se produce entre materiales iguales o similares generalmente, ya que al poseer mayor afinidad, se transfiere material de una a otra superficie durante su movimiento relativo, que produce como resultado una soldadura en frío en puntos de interacción de asperezas. En algunos casos, parte del material desprendido regresa a la superficie original mientras que en otros se arranca y desprende [71].

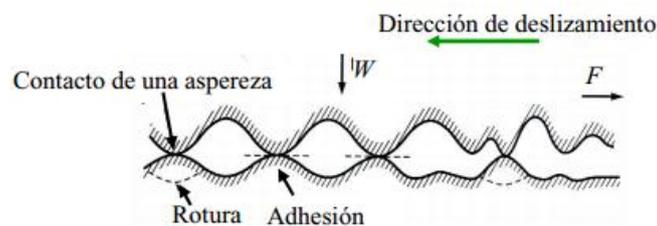


Figura 22. Adhesión durante el deslizamiento de dos superficies en contacto [65].

En el mecanismo de adhesión se pueden diferenciar cuatro etapas:



- La primera corresponde a la interconexión mecánica por las irregularidades que presentan las superficies de contacto.
- La segunda etapa es la correspondiente a la difusión de átomos a través de la interfase en la que al aumentar la temperatura, se facilita el transporte de las moléculas.
- A continuación, tiene lugar una transferencia electrónica mediante la interfase de contacto con una capa eléctrica que se forma en la interfase.
- Por último, se produce la adsorción que puede ser mediante uniones por enlaces fuertes o por fuerzas del tipo Van der Waals aunque éstas tengan un carácter más débil.

Durante la sucesión de etapas del mecanismo adhesivo, se producen adhesiones, roturas superficiales y la formación de partículas de desgaste que pueden provocar un cambio de régimen a abrasivo. En definitiva, el mecanismo de desgaste no tiene por qué ser puramente abrasivo o adhesivo sino que en la práctica sucede la combinación de ambos.

Para evitar este tipo de desgaste en los materiales es necesario que no exista deslizamiento entre materiales con composición química similar. Además, los materiales deben tener unas elevadas durezas, a no ser que el sistema esté lubricado. Y en último lugar, se debe evitar aquellos pares tribológicos que tengan una solubilidad mutua [31].

Además de los mecanismos principales que son abrasivo y adhesivo, existen una gran cantidad de submecanismos que suelen tener componentes de abrasión o adhesión (por fatiga, erosivo, etc.).

El **desgaste triboquímico** se presenta cuando existe alguna superficie metálica bajo deslizamiento sin lubricación o poca lubricación, en presencia de un agente agresivo como puede ser el aire u oxígeno. El calor generado por la fricción en contacto deslizante en presencia de oxígeno, provoca una oxidación acelerada.

Durante el proceso se pueden producir cambios en la composición superficial, rotura y eliminación de la película de óxido procedente del metal, interacciones entre las rugosidades deformadas y el ambiente, formación de productos de reacción y micropilas de corrosión [31].

El **desgaste por fatiga** sucede cuando la superficie de un material se somete a cargas cíclicas [66].

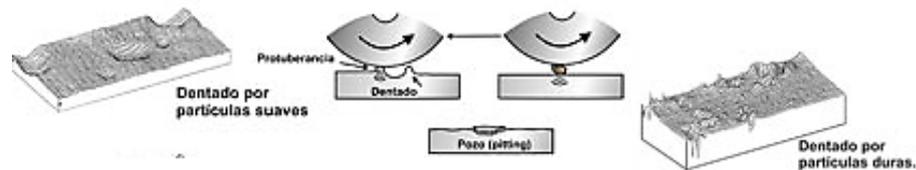


Figura 23. Desgaste por fatiga [72].

En el **desgaste erosivo** se produce una pérdida de material de una superficie por la repetición del efecto de impacto de partículas en movimiento [66].



Figura 24. Desgaste erosivo [72].

Cuando los cerámicos deslizan contra un metal, en pocas ocasiones el desgaste se produce por deformación plástica y fractura frágil superficial; Sin embargo es más probable que se produzca por reacciones químicas superficiales, rayado y posiblemente fatiga. Los metales se transfieren a la superficie del material cerámico formando óxidos metálicos. Así el deslizamiento se produce verdaderamente entre el metal y la superficie de su óxido [47].

En muchas ocasiones, y con objeto de reducir la fricción y el desgaste entre dos superficies, se introduce un medio lubricante que consiste en una capa intermedia de un material o fluido situada entre las superficies en movimiento. Los lubricantes convencionales no influyen notablemente en el coeficiente de desgaste en los cerámicos [47,73].



6. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

Se define la acústica como la parte de la ciencia que estudia la generación, transmisión y recepción de energía en forma de ondas vibratorias en la materia y el efecto que esta energía produce [74]. Los fenómenos físicos que afectan la propagación del sonido se muestran a continuación:

La **absorción** es un fenómeno que afecta a la propagación del sonido. Cuando una onda sonora alcanza una superficie, la mayor parte de la energía se refleja, pero existe un porcentaje que es absorbida por el nuevo medio. La capacidad de absorción del sonido de un material es la relación entre la energía absorbida y reflejada por el material. Este valor varía entre 0 cuando toda la energía es reflejada y 1 si toda la energía es absorbida [75].

Existen numerosas clases de materiales absorbentes, entre los que se encuentran los materiales de tipo poroso, que son aquellos que constan de intersticios comunicados entre sí. Los materiales absorbentes porosos no actúan apenas sobre el sonido transmitido sino que dejan pasar la energía que les llega y que no absorben. De tal forma que los poros actúan transformando la energía acústica reflejada, en energía calorífica mediante procesos de fricción interna [76].

Hay factores que condicionan directamente la absorción acústica de los materiales absorbentes porosos. El coeficiente de absorción acústica dependerá de la rugosidad y especialmente de la porosidad, puesto que cuanto mayor sea la rugosidad y porosidad, mayor coeficiente de absorción. En general la absorción aumenta con la frecuencia, porque para frecuencias altas la longitud de onda es pequeña, lo que permite mayor efectividad en la disipación de la onda sonora en forma de calor.

La **reflexión** se produce cuando la onda sonora es reflejada en parte o totalmente por el medio sobre el que incide de manera que regresa al medio de origen.

En la **transmisión**, parte de la energía incidente en forma de ondas sobre un medio, es capaz de atravesarlo pasando al otro lado del medio



Mientras que la **refracción** es la desviación de la dirección que experimenta una onda al pasar de un medio a otro.

La **difracción** tiene lugar cuando el sonido encuentra un obstáculo en su dirección de propagación, por el que una pequeña parte del sonido sufre un cambio de dirección y puede seguir propagándose.

Por último, la **reverberación** es un fenómeno producido por la reflexión que consiste en una ligera permanencia del sonido después de que la fuente original ha dejado de emitirlo.

El sonido puede ser directo o se puede reflejar en un obstáculo. Cuando el sonido reflejado es inteligible por el ser humano como un segundo sonido se denomina eco, pero cuando debido a la forma de la reflexión o al fenómeno de persistencia acústica es percibido como una adición que modifica el sonido original se denomina reverberación [74].

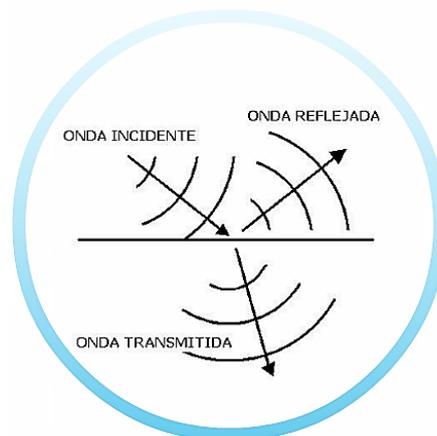


Figura 25. Interacción de la onda y un medio [77].

A continuación se detallan los valores de los coeficientes de absorción acústica en función de las distintas frecuencias de los materiales más habituales.



Tabla 4. Coeficientes de absorción acústica de algunos materiales para distintas frecuencias [78].

Materiales	Coeficientes					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Ladrillo, sin enlucir	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Revoque de cal y arena	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06
Placa de yeso	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Bloque de hormigón ligero poroso	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Suelo de hormigón o terrazo	0.01	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02
Madera	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Panel de madera aglomerada	0.47	0.52	0.50	0.55	0.58	0.63
Parquet	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Alfombra de goma de 0.5 cm de espesor	0.04	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10
Cortina 475 g/m ²	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
Espuma de poliuretano de 35 mm	0.11	0.14	0.36	0.82	0.90	0.97
Lana de vidrio de 35 kg/m ³ y 25 mm de espesor	0.20	0.40	0.80	0.90	1.00	1.00
Ventana de vidrio	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Pared de ladrillo enlucida con yeso	0.013	0.015	0.02	0.03	0.04	0.05
Puertas y ventanas abiertas	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL



CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	42
7. MATERIAS PRIMAS	44
7.1. SELECCIÓN DE LAS PROPORCIONES DE LOS CONSTITUYENTES MEDIANTE DIAGRAMAS TERNARIOS.....	44
8. MOLIENDA Y TAMIZADO	50
9. MÉTODO DE CONFORMADO	53
9.1. MEZCLA.....	54
9.2. PROCESO DE CONFORMADO POR MOLDEO MEDIANTE EL PROCESO STARCH.....	56
9.3. MECANIZADO DE LAS PROBETAS EN VERDE.....	58
9.4. PROCESO DE SINTERIZACIÓN.....	62
9.5. ADECUACIÓN SUPERFICIAL: DESBASTE Y PULIDO	65
10. COMPORTAMIENTO FRENTE AL DESGASTE	67
11. MICROSCOPIA ÓPTICA	69
12. ENSAYOS DE DUREZA	70
12.1. DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL.....	73
13. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO	75



7. MATERIAS PRIMAS

Para la realización del objeto del presente Proyecto Fin de Carrera se han utilizado residuos procedentes de la construcción (ladrillo) e industriales (escoria de soldadura o flux).

Los residuos de ladrillo utilizados para la elaboración de las probetas provienen de una mezcla de polvos procedentes al 50% de la empresa Inzamac de la provincia de Zamora y de la Escuela Politécnica Superior de Zamora. La finalidad de la mezcla fue la de minimizar la presencia de impurezas que podría tener el residuo proveniente de Inzamac [12]. Además, el material disponible para realizar el presente proyecto y sucesivos es escaso, por lo que se ha tratado de optimizar en la medida de lo posible el material.

En definitiva, se trata de un ladrillo convencional de arcilla cocida con una composición aproximada del 60% SiO_2 , 30% Al_2O_3 y 10% CaO [79].

Por otra parte, la escoria de soldadura o residuo de flux fue suministrado por la empresa Alstom Wind Altamira. El porcentaje aproximado de los componentes es 25% óxido de aluminio, 25% fluoruros, 3% hierro, 25% óxido de magnesio, 7% manganeso, 5% cuarzo y 10% silicatos [13].

7.1. SELECCIÓN DE LAS PROPORCIONES DE LOS CONSTITUYENTES MEDIANTE DIAGRAMAS TERNARIOS

Como se ha indicado anteriormente, los materiales utilizados fueron ladrillo y escoria de soldadura o flux. En las Tablas 5 y 6, se muestran los porcentajes de cada uno de los componentes de los materiales utilizados.

Tabla 5. Composición del ladrillo.

Ladrillo	
Componente	Porcentaje (%)
SiO_2	60
Al_2O_3	30
CaO	10



Tabla 6. Composición de la escoria de soldadura.

Escoria de soldadura "flux"		
Componente	Porcentaje (%)	
SiO ₂	5	
Al ₂ O ₃	25	
MgO	25	
Silicatos	10	
Otros	Manganeso	7
	Hierro	3
	Fluoruros	25
		45

Una vez que se han indicado las proporciones que tiene cada componente en función del tipo de material (ladrillo, escoria de soldadura o flux) es necesario definir las proporciones teóricas convenientes para cada una de las muestras.

En este trabajo, se han realizado las mezclas de las composiciones correspondientes al 2% de escoria de soldadura o flux denominada "L98FL2", 3%"L97FL3", 4%"L96FL4", 5%"L95FL5", 6%"L94FL6" y 8%"L92FL8" y el restante porcentaje de ladrillo respectivamente, como indica el nombre escogido para designar cada muestra. Calculando los porcentajes de los valores estimados de cada composición para cada uno de los componentes se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 7. Porcentajes de cada componente para todas las composiciones.

Componente	Porcentaje (%)					
	L98FL2	L97FL3	L96FL4	L95FL5	L94FL6	L92FL8
SiO ₂	58,9	58,35	57,8	57,25	56,7	55,6
Al ₂ O ₃	29,9	29,85	29,8	29,75	29,7	29,6
CaO	9,8	9,7	9,6	9,5	9,4	9,2
MgO	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	2,0
Otros	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,6



Se ha considerado un porcentaje denominado “otros” y no de manera independiente debido a que dichos elementos no son predominantes para el conjunto. Estos compuestos son “óxidos variados, fluoruros, etc.”.

A continuación, se decidió contrastar mediante diagramas ternarios la viabilidad o no de las mezclas elegidas. Debido a la complejidad que supondría realizar el estudio mediante un diagrama cuaternario, se decidió realizarlo mediante diagramas ternarios.

Se ha optado por utilizar los óxidos para la representación de los diagramas ternarios, puesto que éstos tienen gran afinidad entre sí y por tanto se producirán reacciones entre ambos, circunstancia que no se podría afirmar del resto.

En primer lugar, se han representado los diagramas ternarios $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ (Figura 26) si estuviésemos en una situación de un 100% de ladrillo y $\text{SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ (Figura 27) si fuese un 100% de escoria de soldadura o flux. Simplemente para observar la variación de la zona acotada que existe al realizar posteriormente las diferentes mezclas de ambos.

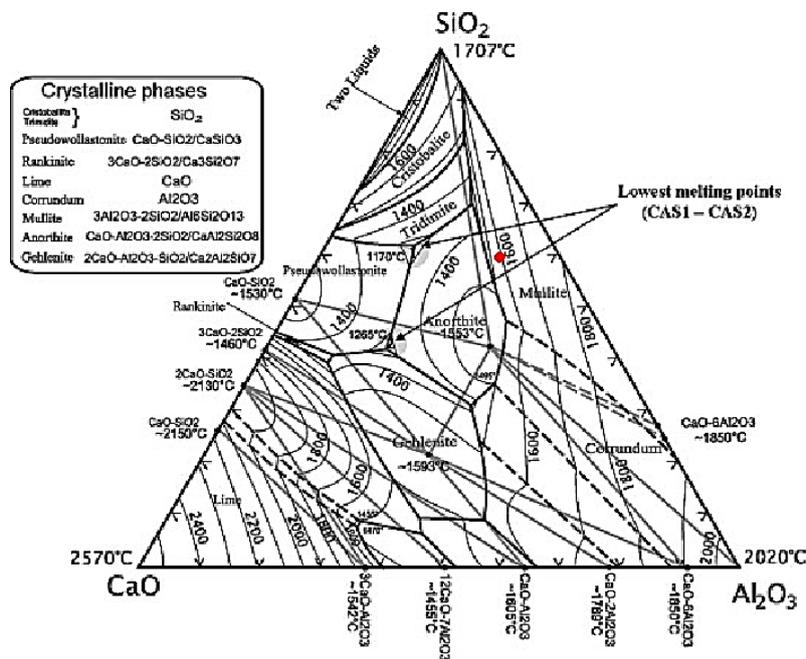


Figura 26. Diagrama ternario $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ con 100% de ladrillo.

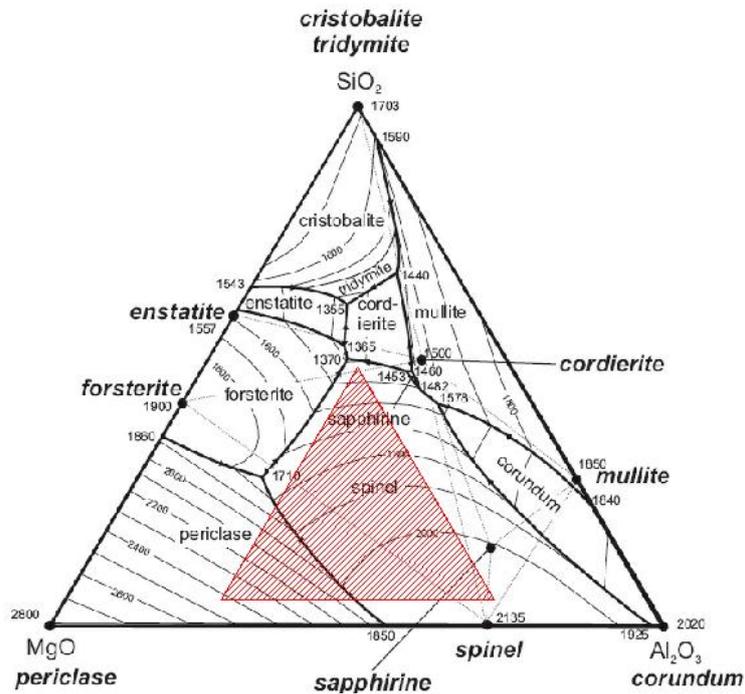


Figura 27. Diagrama ternario $\text{SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ con 100% de escoria de soldadura o flux.

En este diagrama ternario (Figura 27), se observa perfectamente que el triángulo de reparto abarca una extensa zona del diagrama. Este hecho se debe a que cuanto mayor composición existe de “otros” (en este caso 45%), el triángulo de reparto será de mayor tamaño.

Seguidamente, se han representado las composiciones de “L98FL2” y “L92FL8” por considerar que pueden ser las más representativas y en las que se puede apreciar el desplazamiento del triángulo acotado por el trazado de las rectas de reparto correspondientes.

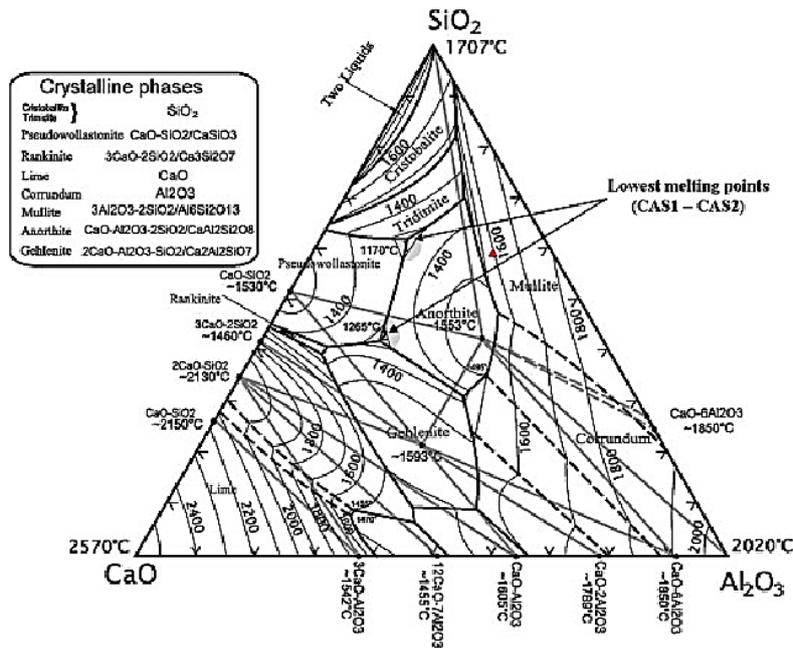


Figura 28. Diagrama ternario $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ de 98% de ladrillo y 2% de escoria de soldadura o flux.



Figura 29. Detalle de la zona donde se sitúa el triángulo de reparto del diagrama ternario $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ de 98% de ladrillo y 2% de escoria de soldadura o flux.

En las Figuras 28 y 29 se puede observar el triángulo de reparto del diagrama ternario $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ con una composición del 98% de ladrillo y 2% de escoria de soldadura. Claramente, se aprecia como el triángulo de reparto correspondiente se encuentra prácticamente en la misma zona donde se situaba cuando la composición correspondía a 100% de ladrillo. Esto se debe a que la cantidad de escoria de soldadura es muy pequeña.

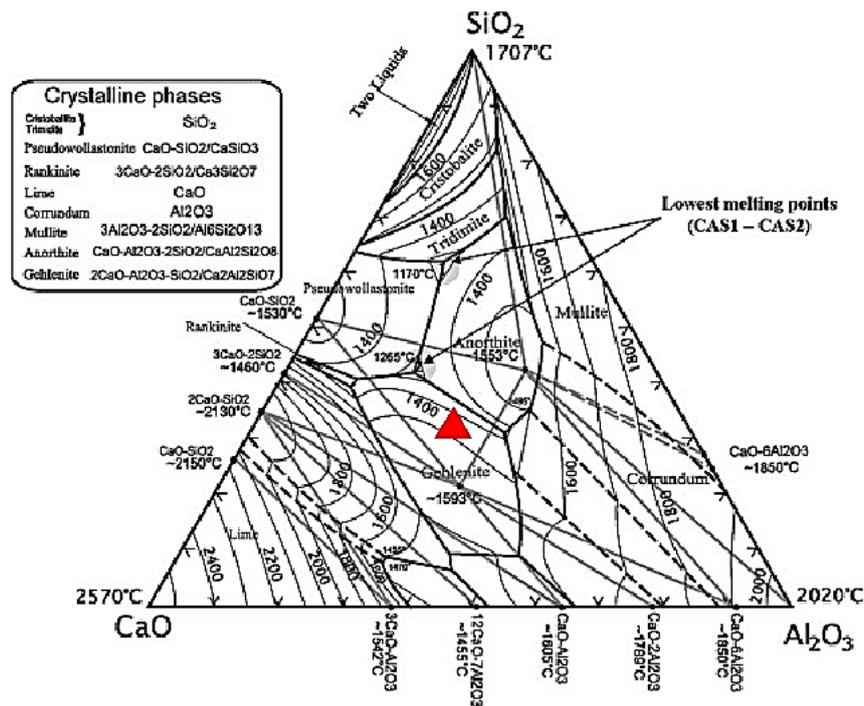


Figura 30. Diagrama ternario SiO₂-CaO-Al₂O₃ de 92% de ladrillo y 8% de escoria de soldadura o flux.

En la Figura 30, se representa el diagrama ternario SiO₂-CaO-Al₂O₃ con el correspondiente triángulo de reparto de composición de 92% de ladrillo y 8% de escoria de soldadura. Como era de esperar a la vista del triángulo de reparto de la Figura 26, en este caso se ha desplazado hacia la parte inferior e izquierda del diagrama ternario con respecto a la composición anterior, puesto que la cantidad de escoria de soldadura es mayor que en las Figuras 28 y 29.

Además, es importante advertir que la temperatura de fusión es menor a medida que aumenta el contenido de fundente. Por lo tanto, se puede predecir que la pieza con mayor contenido de escoria de soldadura, conseguirá sinterizar a menor temperatura que la muestra de menor cantidad de fundente. De esta manera, la temperatura de fusión de 98% de ladrillo y 2% flux se encontraría alrededor de los 1600°C. Mientras que en la composición 92% de ladrillo y 8% de escoria de soldadura, la temperatura corresponde a un valor comprendido de manera aproximada entre 1400°C y 1500°C. Si bien es cierto que son temperaturas de equilibrio muy altas hay que tener en cuenta que el proceso de sinterización de los residuos de ladrillo se realizará mediante sinterización con fase líquida y fuera de equilibrio. Se pueden prever la aparición de zonas puntuales de fusión incipiente debidas al flux, que ayuden a que el



proceso de sinterización se produzca a menores temperaturas. Estos diagramas nos pueden dar una idea del tipo de compuestos que podemos encontrarnos.

8. MOLIENDA Y TAMIZADO

Seleccionadas las materias primas que determinan los resultados del proceso experimental, se procedió a la adecuación del material de manera que se le sometió a molienda y tamizado. De este modo, se obtuvo una granulometría óptima para un correcto sinterizado, es decir, inferior a 0,063 milímetros.

Precedentemente al proceso de molienda, se separaron manualmente aquellos trozos de mayor tamaño de la escoria de soldadura o flux (Figura 31) para facilitar la molienda, y evitar problemas con la malla durante el tamizado en cuanto a posible rotura de la misma.



Figura 31. Trozos de escoria de soldadura.

La molienda tuvo lugar en un molino de bolas convencional en control de carga y número de vueltas.



Figura 32. Molino de bolas convencional.



Los parámetros de trituración han sido los necesarios para la obtención de un tamaño de partícula óptimo para el posterior sinterizado. Mediante la consulta de anteriores proyectos, se determinó que los parámetros para los materiales utilizados fueran los siguientes:

Tabla 8. Parámetros utilizados en el molino de bolas [14].

Material	Masa Material (Kg)	Masa bolas (Kg)	Nº vueltas
Ladrillo	6	3	1000
Flux	3	5	500



Figura 33. Bolas de acero utilizadas en molienda.

A continuación, se realizó el tamizado del material a través de la serie de diferentes tamices de forma manual y en ocasiones mediante un tamizador de la marca CISA, modelo BA 200N para una mayor optimización del tiempo. De este modo, se seleccionó un tamaño de partícula inferior a 0,0063 milímetros siguiendo la norma UNE-EN 933-1:2012 [80].



Figura 34. Serie de tamices (izq.); Tamizador (dcha.).



Figura 35. Ladrillo y escoria de soldadura previo al tamizado (izq. dcha.).



Figura 36. Polvo de ladrillo y escoria de soldadura después de realizar el tamizado (izq. dcha.).

Una vez tamizado el material de escoria de soldadura fue necesario mediante un imán retirar la mayor parte de las partículas de hierro existentes, en la medida de lo posible,



mediante numerosas pasadas para evitar problemas que se pudiesen ocasionar posteriormente.



Figura 37. Partículas de hierro recogidas por el imán.

9. MÉTODO DE CONFORMADO

El método de conformado se determinó, como es obvio, en base a los recursos disponibles hasta el momento. Esto limita la elección a dos tipos de métodos de conformado: compresión uniaxial [81] o por moldeo mediante el proceso Starch [15]. No obstante, se tuvieron en cuenta otros factores que seguidamente se detallan para desechar una de las dos posibilidades.

En el método de conformado mediante compresión uniaxial, se aplica presión al polvo en una sola dirección obteniéndose piezas en verde con dimensiones y acabados precisos sin necesidad de añadir ningún tipo de ligante. Sin embargo, las piezas tienen una baja relación longitud/diámetro debido al gradiente de densidad que se produce en el centro de la pieza en las zonas cercanas al punzón, y además las piezas tienen formas muy simples.

Por estos aspectos negativos, se optó por el método de conformado por moldeo mediante el proceso Starch, puesto que se pretende un tipo de moldeo para la obtención de gran variedad de piezas complejas con diferentes formas y geometrías que puedan utilizarse en diferentes ámbitos de aplicación.

Para el proceso Starch fue necesario el uso de almidón de arroz químicamente puro diluido en agua destilada para que actuase de “pegamento” durante el moldeo y así aportar



manipulabilidad a la pieza en verde. Dicho almidón fue eliminado sin dificultad en pasos posteriores.

9.1. MEZCLA

Aunque el proceso de la mezcla de los dos residuos en polvo como la consecutiva mezcla con el almidón de arroz son etapas poco complejas, son unos de los pasos más importantes, ya que indirectamente determinan las propiedades que se obtienen y los resultados finales.

Primero, se colocó un vidrio de reloj sobre una balanza Kern ALS-220-4N (sensibilidad $\pm 0.0001\text{g}$) y una vez realizado el tarado, se dispuso el almidón de arroz para efectuar la pesada (Figura 38).

Seguidamente, se midió la cantidad de agua destilada necesaria por medio de un vaso de precipitados. La relación almidón/agua destilada se fijó utilizando como dato el que ya habían empleado otros proyectos con anterioridad [13]. En este estudio, la proporción de almidón/agua correspondió a 4,5g/100ml.

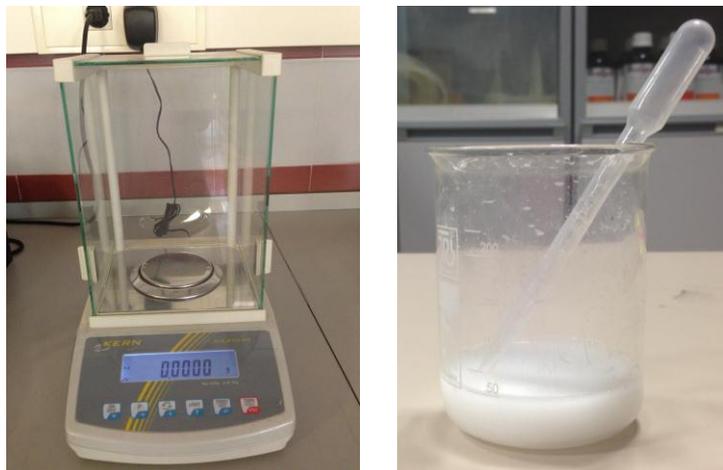


Figura 38. Balanza de precisión (izq.); Mezcla de almidón/agua (dcha.).

Una vez que el almidón se diluyó en el agua destilada, se realizaron las diferentes pesadas de escoria de soldadura o flux y del ladrillo ayudadas mediante el vidrio de reloj sobre la misma balanza de precisión. Se utilizó de nuevo la balanza de precisión debido a que en este proyecto, existe una diferencia entre composiciones muy pequeña y cualquier error en la



pesada podría dar lugar a que nos situásemos en una composición anterior o posterior y no en la que sería objeto. Es necesario advertir que la báscula debe permanecer encendida un periodo de tiempo suficientemente amplio como para que esté estabilizada completamente antes de realizar las sucesivas pesadas.

En este estudio se han realizado las mezclas de las composiciones correspondientes al 2%, 3%, 4%, 5%, 6% y 8% de escoria de soldadura o flux y el restante porcentaje de ladrillo, como se especificó en el apartado 7.1. “Selección de las proporciones de los constituyentes mediante diagramas ternarios”.

A continuación, se realizó la mezcla energética de los polvos de los materiales en un recipiente de vidrio a través de un embudo e incorporando en su interior un número de varillas metálicas que actuaron como “mezcladores”, de 40x2 milímetros, para evitar la acumulación de los polvos en una determinada zona del recipiente y ayudasen a la homogeneización de la mezcla (Figura 39). Este proceso se efectuó durante aproximadamente veinte minutos para cada una de las composiciones.



Figura 39. Vertido de la mezcla en el recipiente (izq.); Varillas dentro del recipiente con la mezcla (dcha.).

Tras mezclar los distintos polvos, se procedió a incorporar la disolución de almidón progresivamente a través de una pipeta graduada hasta conseguir una masa lo más homogénea posible mediante una espátula (Figura 40). La cantidad de disolución de almidón fue la que se observó que admitían los propios polvos de los materiales. En este caso, la media



correspondió a 9 mililitros de la mezcla de almidón con agua por 13 gramos de mezcla de polvos.



Figura 40. Vertido de la disolución de almidón (izq.); Mezcla de los polvos mediante la espátula (dcha.).

9.2. PROCESO DE CONFORMADO POR MOLDEO MEDIANTE EL PROCESO STARCH

Después de obtenida una masa homogénea, se llenaron los moldes. En este caso, se optó por moldes de teflón (PTFE) con tapón extraíble inferior de 30 milímetros de diámetro exterior.

Las ventajas de este material es que es inerte, no reacciona con otras sustancias químicas. Además, este tipo de moldes permite una mayor estanqueidad y soportan perfectamente las temperaturas de secado a las que se les sometió posteriormente. Asimismo, con el empleo de estos moldes, el material no se queda tan pegado en las paredes provocando fisuras y oquedades como sucedía al emplear moldes de redondo de acero con taladro interior de 30 milímetros [15].

La desventaja es que debido a la flexibilidad del material, las probetas que se obtienen tras el secado pueden no poseer una geometría perfectamente circular. Sin embargo, este error se ha paliado tomando tres medidas de cada una de las muestras [82]. No obstante, sería posible utilizar cualquier otro tipo de molde siempre que el material fuese capaz de soportar las temperaturas que se alcanzan en el horno de secado.



Anterior al llenado de los moldes, se aplicó vaselina para síntesis en las paredes y en el tapón del molde para evitar que la pasta se adhiriese excesivamente a las paredes y conseguir un buen desmolde.

Para llenar los moldes, se utilizó la espátula ayudándonos de pequeños y sucesivos golpes sobre una superficie para evitar posibles burbujas de aire y pasando la espátula alrededor de las paredes para una correcta unión a las mismas sin ningún tipo de irregularidades. Se determinó que para conseguir que los moldes estuviesen correctamente llenos eran necesarios aproximadamente 13 gramos de la mezcla (Figura 41).



Figura 41. Molde de teflón lleno con 13 gramos de mezcla.

Un método más idóneo para evitar, en la medida de lo posible, las burbujas de aire y porosidades que de forma común dan lugar a fallos en las medidas de las densidades, sería realizar el llenado mediante moldeo por inyección [83]. Sin embargo, el empleo de este proceso no fue posible por las limitaciones técnicas actuales.

En el siguiente paso se eliminó el agua de amasado, para ello se colocaron los moldes en un horno de secado MEMERT Modelo 100-800 a la temperatura de 110°C durante dos horas aproximadamente (Figura 42). Momento en el que se desmoldan y se giran 180° para conseguir que la pieza pierda la humedad de manera homogénea durante otras dos horas.



Figura 42. Horno de secado (izq.); Moldes de teflón con la mezcla dentro del horno de secado (dcha.).

Pasado este periodo de tiempo, las piezas en verde eran perfectamente manipulables sin ningún tipo de dificultad (Figura 43).

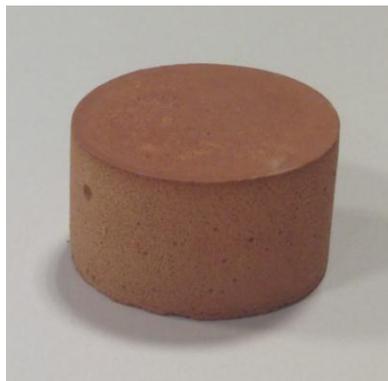


Figura 43. Pieza en verde tras su secado.

9.3. MECANIZADO DE LAS PROBETAS EN VERDE

Precedentemente a la sinterización, fue necesario acondicionar las probetas para que obtuviesen una apariencia lo más regular posible.

Para ello, lo primero fue lijar la cara superior de la muestra donde se formó una capa de almidón con forma irregular debido a que las partículas de almidón tienen una menor densidad que el resto de las partículas que conforman la pieza y tienden a flotar sobre el conjunto. A continuación, se lijó la cara inferior con menor dificultad debido al menor contenido en almidón, de manera que las caras quedasen lo más plano-paralelas posible para



obtener mejores medidas de su densidad en verde por su forma geométrica. Para este paso, se utilizó una lija de grano medio.



Figura 44. Lijado de las piezas en verde.

Sin embargo, aquellas probetas que debido a diferentes circunstancias (por su porosidad, rotura, etc.) no tenían una forma geoméricamente definida se procedió a calcular su densidad en verde mediante inmersión.

El modo operativo para el cálculo de la densidad por inmersión es el siguiente: se pesó la pieza, se le aplicó una pintura impermeabilizante (sellante) y se dejó secar aproximadamente veinticuatro horas cubriendo perfectamente todas las hendiduras para evitar que el agua entrase en sucesivos pasos (Figura 45).



Figura 45. Mitad de la pieza con pintura impermeabilizante.

Cuando la pieza estuvo completamente seca, se montaron todos los componentes del equipo medidor. El equipo de medida de densidad por inmersión se compone de un utensilio o platillo de pesaje sobre el que se apoya un soporte de copa sobre el que se dispone el vaso de



precipitados con 500 mililitros de agua en su interior. De la parte superior del utensilio, se coloca un elemento formado por un platillo de pesaje inferior donde se sitúa la muestra, un platillo de pesaje superior, unidos por un alambre (Figura 46).

Simplemente basta con colocar la muestra en el platillo superior para determinar el peso previamente a introducirla en el agua colocándola en el platillo inferior y volver a considerar el peso sumergido.

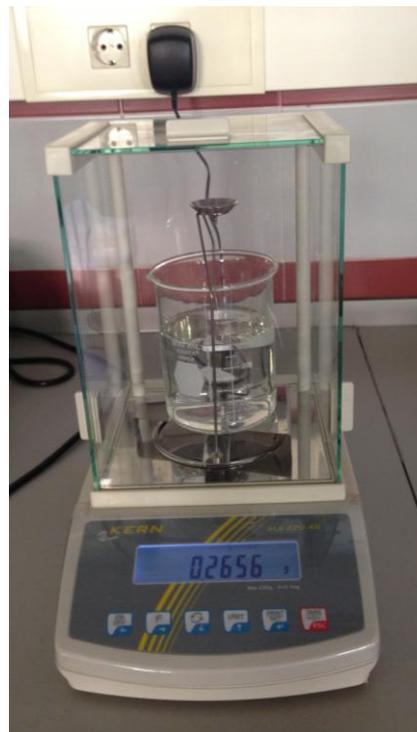


Figura 46. Equipamiento para la medida de la densidad por inmersión.

Finalmente, mediante la fórmula que se indica, se calculó la densidad requerida en cada caso.

$$\rho_{\text{pieza}} = \frac{P_{\text{pieza}}}{\left(\frac{P_{\text{material con sellante}} - P_{\text{material sumergido}}}{\rho_{\text{agua}}} \right) - \left(\frac{P_{\text{material con sellante}} - P_{\text{pieza}}}{\rho_{\text{sellante}}} \right)} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$\rho_{\text{sellante}} = 1,1 \text{ g/m}^3$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1 \text{ g/m}^3$$



Para las piezas en la que la geometría es cilíndrica no es necesario el cálculo de la densidad mediante inmersión, simplemente se procede a su corte y adecuación superficial (Figura 47). De este modo, se conseguían dos muestras a partir de un cilindro de mayor tamaño.

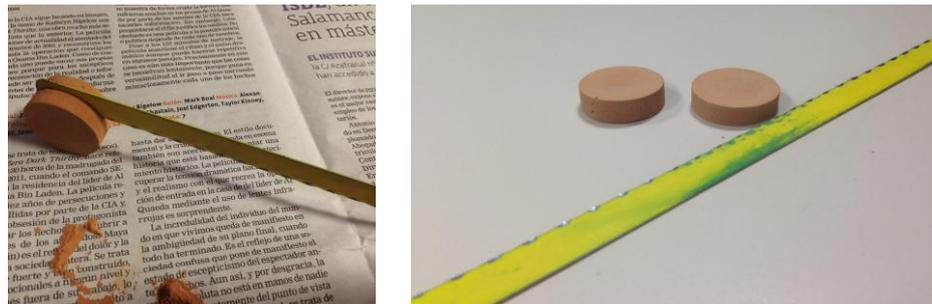


Figura 47. Corte de la pieza original mediante sierra (izq.); Nuevas piezas cortadas y lijadas (dcha.).



Figura 48. Comparativa de pieza en verde tras el horno de secado, lijada y cortada y lijada.

Clasificadas cada una de las probetas en verde con las diferentes composiciones en cada caso, se tomaron las medidas en cuanto a altura, diámetro y masa. Para determinar la altura y el diámetro, se tomaron tres medidas para evitar posibles errores como ya se había explicado con anterioridad. Para ello, se utilizó un calibre digital marca MITUTOYO modelo CD 6" (sensibilidad ± 0.01 milímetros). Y para determinar la masa se usó la báscula de precisión ya descrita.



Figura 49. Medida de pieza con calibre digital (izq.); Pesada de la pieza en báscula de precisión (dcha.).

En último lugar, se calcularon las diferentes densidades mediante la relación existente entre la masa y su volumen.

9.4. PROCESO DE SINTERIZACIÓN

Para el sinterizado de las piezas, se introdujeron en un horno MICROTTEST con controlador programable de temperatura Call 9500 P Process Controller (Figura 50) que puede alcanzar la temperatura máxima de 1400°C. El horno contiene un aislante refractario de un material cerámico y unas resistencias muy sensibles de SiC.



Figura 50. Horno para el sinterizado de las piezas.

Para la colocación de las piezas dentro del horno, sería necesario disponerlas sobre una solera cerámica refractaria resistente a altas temperaturas. Sin embargo, debido a la mala conservación de la misma, se decidió colocarlas sobre piezas presinterizadas de paval que



soportan perfectamente las temperaturas hasta un máximo de 1200°C. Temperatura suficiente puesto que en esta vía de investigación no fueron necesarias temperaturas superiores para lograr la sinterización de las piezas. La disposición de las muestras debe ser lo más simétrica posible con motivo de que el calor se distribuya uniformemente a través de la pieza y sintericen todas de igual manera (Figura 51).



Figura 51. Piezas de pavas colocadas dentro del horno.

La temperatura más baja escogida para elaborar las curvas de sinterabilidad ha sido 1000°C hasta un máximo de 1200°C con incrementos de 50°C entre ellas, a excepción de la temperatura de 1125°C y 1175°C, ya que tras observar las curvas obtenidas anteriormente, se predijo que estas temperaturas serían próximas a las de las piezas perfectamente sinterizadas.

En la Figura 52 se muestra el ciclo térmico al que fueron sometidas las piezas. Una vez que las probetas se ubicaron correctamente dentro del horno a la temperatura deseada, se produjo el proceso de eliminación del ligante (almidón de arroz) denominado “debinding” que tiene lugar cuando alcanzada la temperatura de 600°C, se mantiene dicha temperatura durante dos horas más, tiempo suficiente para conseguir eliminar el ligante [84].

El siguiente paso dentro del ciclo es el de incrementar la temperatura hasta 800°C durante una hora y llegado este punto, se produce nuevamente otra “meseta” durante otras dos horas. De este modo, se produce la presinterización.



Seguidamente, se inicia otra “rampa” hasta la temperatura final deseada con su correspondiente “rellano” a la temperatura escogida. Es donde finalmente, se origina la sinterización.

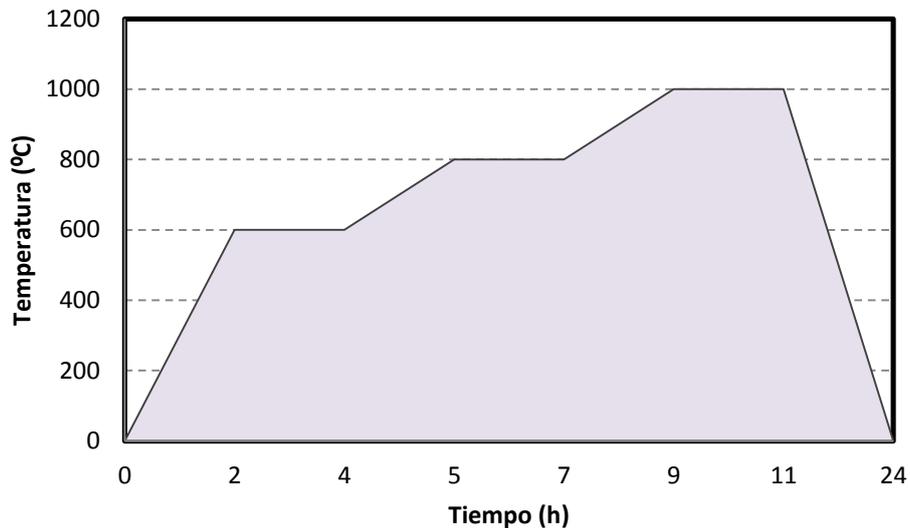


Figura 52. Ciclo del horno de sinterización.

Para evitar el posible deterioro del horno y que la pendiente de la última rampa del ciclo fuese excesivamente grande, provocando una subida enorme en un tiempo excesivamente corto, se optó por elegir otra pendiente. De este modo, el incremento de temperatura programado en el horno cuando la temperatura de sinterización correspondió con 1000°C y 1050°C fue de 100°C. Mientras que en el resto (1100°C, 1125°C, 1150°C, 1175°C y 1200°C) correspondió al valor de 150°C.

Por último, se deja enfriar hasta temperatura ambiente o como mínimo una temperatura inferior a 150°C, sin la apertura de la puerta del horno puesto que se podrían producir problemas (fracturas) de las probetas ensayadas, de las resistencias y del refractario del horno debido al choque térmico por la gran diferencia de temperaturas existente entre el interior y el exterior del horno. Este último paso dura aproximadamente 12 horas. Por lo que el proceso en su totalidad conlleva aproximadamente 23-24 horas.

Pasado este periodo de tiempo, se sacaron las probetas del horno para poder calcular las diferentes densidades tras la sinterización y así se compararon con las densidades en verde



para denotar su contracción. Además, se buscó la “ventana óptima de sinterización”, intervalo en el que se sitúa la temperatura de sinterización mínima a la cual las piezas alcanzan la densidad más alta siempre que a continuación la densidad no decaiga bruscamente.

Para optimizar el rendimiento del horno, éste se utilizó conjuntamente para sinterizar otras probetas de distintos materiales objeto de otras líneas de investigación que se estaban realizando paralelamente a este estudio, como se puede ver en la Figura 53.



Figura 53. Piezas de ladrillo y paval en verde (izq.); Piezas de ladrillo y paval tras el sinterizado (dcha.).

9.5. ADECUACIÓN SUPERFICIAL: DESBASTE Y PULIDO

En esta parte del proceso experimental, se realiza el desbaste y pulido de todas las piezas a las que posteriormente se les van a determinar las propiedades físicas de desgaste y dureza, así como la observación microestructural. Para este fin, se utilizó una pulidora automática Struers LaboPol-1 (Figura 54) a la que se le incorporaron lijas de carburo de silicio, comenzando por el tamaño de grano más grueso y terminando con el más fino para conseguir un buen acabado superficial (180#, 500# y 1000#). El objetivo fue la obtención de unas piezas con las caras lo más plano-paralelas posible sin ningún tipo de irregularidades o imperfecciones.



Figura 54. Pulidora automática con lija de carburo de silicio.

La forma de proceder fue deslizando la pieza a través de una fina capa de agua sobre la superficie de la lija con un movimiento realizado desde el extremo exterior al centro y girándola 90° hasta conseguir el acabado deseado con las diferentes lijas.



Figura 55. Lijado de la pieza sinterizada.

A continuación, se muestra en la Figura 56 la comparación de dos probetas de la misma composición a la temperatura de 1200°C. Se puede apreciar perfectamente como la pieza situada a la derecha, ha sufrido el desbaste y pulido. Mientras que a la otra pieza no se le ha realizado ningún tipo de tratamiento después de sinterizada.



Figura 56. Comparativa de la pieza sin/con desbaste y pulido.

10. COMPORTAMIENTO FRENTE AL DESGASTE

Para el estudio del comportamiento frente al desgaste se utilizó un tribómetro de la marca Microtest MT/60/NI (Figura 57). El tribómetro se compone por un disco de giro en el que se dispone la pieza a ensayar y sujeta al mismo mediante cuatro mordazas. El pin se coloca en un portapines que permite realizar la pista de desgaste. Para realizar el ensayo correctamente es necesario incorporar una carga, en este caso de 5N. El termopar es el encargado de realizar el contacto con el pin. También consta de un contrapeso, un posicionador y un micrómetro. Todo el sistema está conectado a un software que permite adquirir los distintos coeficientes de fricción frente a la distancia recorrida para cada muestra.

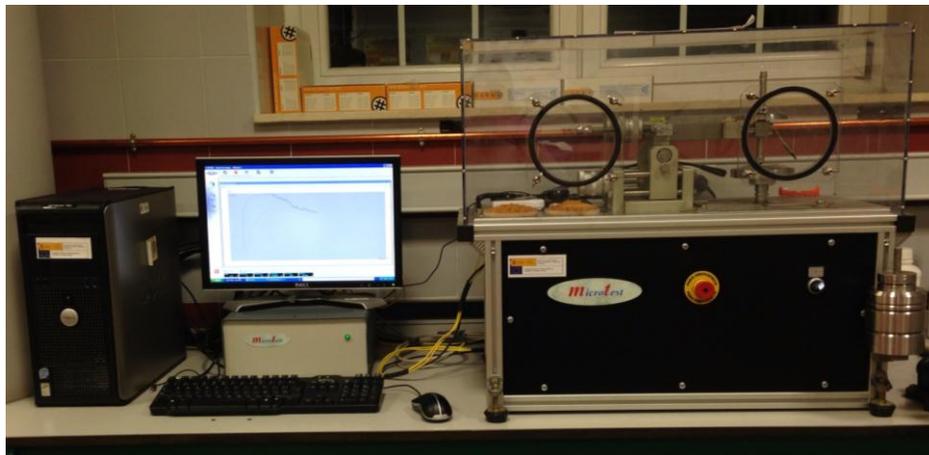


Figura 57. Tribómetro.

Para la realización del ensayo “pin on disk” se dispuso un higrómetro bajo la cabina de metacrilato para controlar los parámetros de temperatura y humedad relativa puesto que deben de ser inferiores a 30°C y al 30% siguiendo la norma ASTM G99-05 [85].



Tras comprobar que los parámetros son los adecuados y que todo está dispuesto correctamente se comenzó el ensayo (Figura 58).



Figura 58. Pin sobre la pieza realizando la pista de desgaste durante el ensayo.

Se tomaron los datos de temperatura y humedad al inicio, transcurrida media hora (ensayo completo una hora) y al final del ensayo, con objeto de ver la evolución de la temperatura ambiente y la humedad relativa durante el ensayo. Además, se realizó una pesada del pin y la muestra en el instante anterior al comienzo del ensayo para contabilizar el volumen perdido o ganado en el caso de que se trate de un comportamiento adhesivo de las propias muestras.

Se analizó el comportamiento frente al desgaste de las muestras más idóneas para ello, puesto que ya se había conseguido su sinterizado, es decir, toda la serie de piezas de la temperatura de 1200°C, 1175°C y 1150°C.

Se puede observar en la Tabla 9, cada una de las condiciones generales utilizadas para realizar los ensayos de desgaste.



Tabla 9. Condiciones generales utilizadas en el ensayo tribológico.

Condiciones generales	
Parámetros	Valores
Diámetro de fricción	120 mm
Velocidad de rotación	320 rpm
Velocidad lineal	0,2 m/s
Distancia recorrida	720 m
Carga	5N
Material	Ladrillo-Flux
Pin	Acero
Diámetro de la bola	60 mm
Lubricación	No
Humedad	<30%
Temperatura	<30°C
Duración	1h

11. MICROSCOPIA ÓPTICA

Después de finalizar cada uno de los diferentes ensayos frente al desgaste, se observaron las muestras microscópicamente para examinar con mayor exactitud la pista de desgaste y cualquier otra apreciación importante de la pieza que no se pudiese apreciar macroscópicamente, para poder concluir el análisis de las piezas frente al desgaste con una mayor precisión.

Para realizar el proceso se empleó un microscopio óptico Zeiss Axiovert 100A (Figura 59), que lleva incorporado un binocular de 10x y con cuatro objetivos de 4x, 10x, 20x y 50x. Mientras que con la combinación del conjunto se obtienen los aumentos de 40x, 100x, 200x y 500x. Además, éste soporta una cámara digital Moticam 2300 que conecta con el ordenador mediante un software de tratamiento de imágenes. También, se realizó un barrido de cada



una de las pistas de desgaste de las piezas de mayor temperatura (1200°C) para poder observar la microestructura de las zonas más alejadas de la pista y las más próximas.



Figura 59. Microscopio óptico.

12. ENSAYOS DE DUREZA

El propósito de este ensayo es el de medir la dureza basada en la penetración de un indentador sobre las muestras a analizar. La dureza influye notablemente sobre el comportamiento frente al desgaste.

Un método cualitativo de clasificar la dureza es la escala de Mohs (Desde 1 el talco hasta 10 el diamante). Sin embargo, existen numerosas técnicas cuantitativas de durezas que se basan en un penetrador de pequeño tamaño que produce una huella sobre la superficie de material a ensayar con una determinada carga y velocidad de aplicación de la carga. Las durezas obtenidas son relativas y no absolutas por lo que es necesario prestar atención al comparar distintas durezas adquiridas mediante diferentes técnicas [86].

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga	Fórmula para el número de dureza ^d
		Vista lateral	Vista superior		
Brinell	Esfera de 10mm de acero o de carburo de tungsteno			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Microdureza Vickers	Pirámide de diamante			P	$HV = 1,854 P / d^2$
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante			P	$HK = 14,2 P / l^2$
Rockwell y Rockwell superficial	Cono de diamante Esferas de acero de $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ pulgadas de diámetro			$\left. \begin{array}{l} 60 \text{ kg} \\ 100 \text{ kg} \\ 150 \text{ kg} \end{array} \right\} \text{Rockwell}$ $\left. \begin{array}{l} 15 \text{ kg} \\ 30 \text{ kg} \\ 45 \text{ kg} \end{array} \right\} \text{Rockwell superficial}$	

Figura 60. Clasificación de los ensayos de dureza [86].

Las técnicas Knoop y Vickers se utilizan para el ensayo de materiales frágiles como las cerámicas [86]. La medida de la dureza Vickers se realiza con un penetrador de diamante de pequeño tamaño y de geometría piramidal (Figura 61) forzado en la superficie de la muestra. Las cargas aplicadas son menores que las técnicas de Brinell y Rockwell. La marca resultante se puede observar al microscopio y se procede a realizar su medición, es por ello, que se hace necesario un perfecto pulido de la muestra. Algunos aparatos pueden hacer la medición de la dureza mediante ultrasonidos, caso de este proyecto, aunque siempre se hace necesaria una correcta adecuación superficial de las muestras.

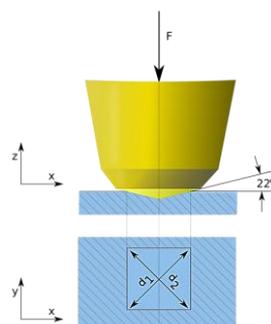


Figura 61. Ensayo Vickers [87].



Como se ha comentado anteriormente, la dureza es una de las propiedades más influyentes en el comportamiento tribológico de los materiales. Aquellas piezas que se sometieron al ensayo de desgaste y posteriormente se analizaron microscópicamente, se les realizó un estudio para cuantificar su dureza. Para el estudio de la dureza se utilizó un durómetro de la marca Krautkrämer Brason Mod MicroDurII (Figura 62).



Figura 62. Durómetro.

Tras la calibración del aparato, se colocó la pieza objeto del ensayo en la base del portamuestras y se le aplicó una fuerza perpendicular de 5Kgf mediante el penetrador durante un instante. Y se observó el resultado en la escala Vickers mediante un visualizador conectado al penetrador. Aunque el durómetro expresa la dureza en otro tipo de escalas, se consideró que los valores de dureza iban a ser lo suficientemente elevados como para tener que cambiar de escala.

Se tomaron 20 medidas de cada probeta, porque una sola medida no sería precisa, puesto que no se sabe con exactitud si estamos realizando el ensayo en un poro o en cualquier tipo de partículas cuyas durezas no sean representativas de la dureza del conjunto. Usando como propiedad clave esta variable (dureza) se evaluó la fiabilidad de los resultados a través de la determinación de su módulo de Weibull.



12.1. DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

Cuando se efectúan ensayos a un material, sus resultados normalmente presentan una dispersión, de manera significativa en los resultados relativos a sus propiedades mecánicas. La fiabilidad de un ensayo consiste en la precisión con la que el sistema mide una variable determinada. Y se mide en forma de probabilidad [88]. Un resultado es más fiable cuanto menor número de valores anormales tuviera o el intervalo de los valores obtenidos fuese el menor posible [31].

Con el fin del estudio de la fiabilidad se emplean leyes probabilísticas, siendo las principales la ley normal o de Gauss, la ley exponencial o de Poisson y la distribución de Weibull [31]. La distribución de Weibull se distingue entre uno de los más empleados en estudios de ingeniería, tanto para determinar la vida de un producto como para comparar la fiabilidad de sus diseños, así como para ver la variabilidad de una propiedad.

La función de distribución acumulativa de Weibull se obtiene mediante la integración de la función de densidad.

$$f(x) = 1 - e^{-(x/\alpha)^\beta} \quad \text{Ecuación (2)}$$

x = Parámetro de posición

α = Parámetro de escala

β = Parámetro de forma o módulo de Weibull

La función de densidad de la distribución de Weibull se puede transformar en una recta del tipo “ $y = mx + n$ ” mediante operaciones matemáticas [89].

$$\ln \left\{ \ln \left[\frac{1}{1 - f(x)} \right] \right\} = \beta \ln x - \beta \ln \alpha \quad \text{Ecuación (3)}$$

Concretamente, lo que se pretende es obtener las ecuaciones de las rectas mediante la conversión de la función de densidad de la distribución a través de los diferentes estimadores.



Aunque existen gran variedad de estimadores, los utilizados en este proyecto han sido empleados en otras líneas de investigación [13, 15, 89]. Los estimadores elegidos han sido los siguientes:

$$F_{j1} = \frac{j}{(n+1)} \quad \text{Ecuación (4)} \quad F_{j2} = \frac{(j-0,3)}{(n+0,4)} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$F_{j3} = \frac{(j-0,5)}{n} \quad \text{Ecuación (6)} \quad F_{j4} = \frac{(j-(3/8))}{(n+0,25)} \quad \text{Ecuación (7)}$$

j = Rango del experimento

n = Número total de experimentos

La representación de estas rectas aplicando los distintos estimadores generará rectas de regresión que también aportarán datos al estudio de la fiabilidad [90]. Cuando el valor del coeficiente de correlación " R^2 " de cada una de las rectas es próximo a 1, la recta se ajusta de forma más precisa a los datos que se pretenden estudiar. Además, dicha ecuación proporciona el valor de la pendiente. De esta manera, cuando el valor de la pendiente es elevado se traduce en que los datos son similares y existe poca dispersión.

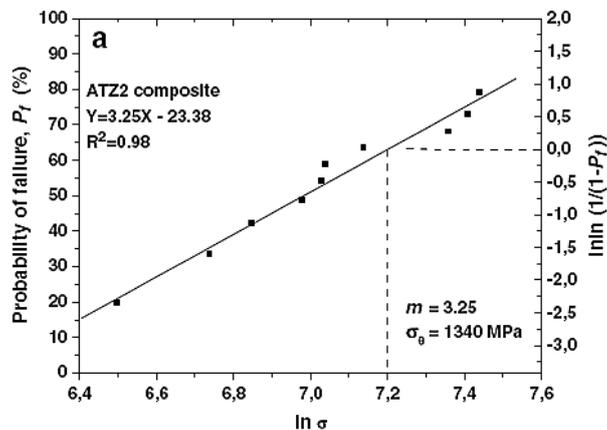


Figura 63. Distribución de Weibull [90].

En la Figura 63, se puede observar que el coeficiente de correlación " R^2 " tiene un valor muy próximo a uno. Por lo tanto, la recta se ajusta de manera óptima a los datos. No obstante, el valor de la pendiente es bajo, indicando que la variabilidad es elevada.



13. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

Se analizó el comportamiento acústico de aquellas piezas que tenían menor dureza pero con la consistencia suficiente como para no liberar polvo, según establece la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 “Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia” [91]. Lo que nos reduce el ensayo a toda la serie de piezas sinterizadas a la temperatura de 1050°C y 1100°C.

Para realizar el ensayo se utilizó un tubo de impedancia acústica de la marca MICROTEST modelo ACAB3000 y con un amplificador BWSA (Figura 64). El tubo está conectado a un software que recoge los datos obtenidos durante el ensayo entre los que está el coeficiente de absorción acústica. Esto se consigue mediante dos micrófonos que alternan sus posiciones para evitar posibles errores de medición. El conjunto del equipo realiza un barrido de frecuencias que se sitúan entre los 800 y 6300 Hz.



Figura 64. Tubo de impedancia acústica.

Se generan unas ondas estacionarias en el interior del tubo que se dirigen hacia la zona opuesta donde se ha colocado la muestra a analizar dentro de un portamuestras. De esta forma, la pieza absorbe o varía las condiciones de reflexión de la onda estacionaria obteniéndose, gracias a los micrófonos, una serie de parámetros.

Previamente a la realización del ensayo, se encendió el equipo durante 10 minutos para que la membrana se adaptase, y pasado el periodo de tiempo se calibraron los micrófonos con un emisor estanco con tono puro de 114 dB y 1000Hz. Posteriormente, se colocan en las posiciones.

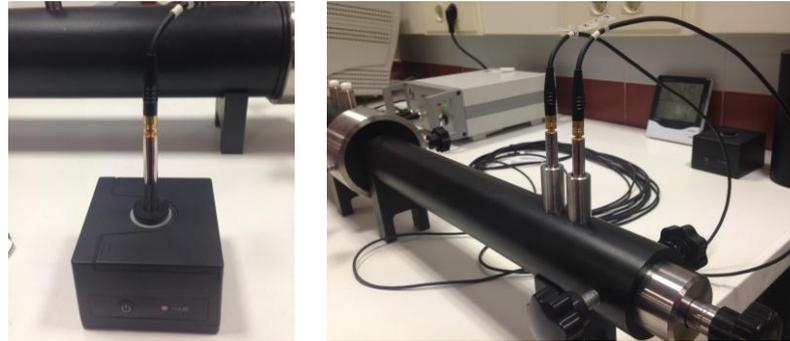


Figura 65. Calibrado de micrófonos (izq.); Tubo de impedancia con micrófonos en sus posiciones (dcha.).

A continuación, se colocó la probeta en el portamuestras. Debido a que las piezas tenían un diámetro ligeramente inferior al del portamuestras y según la norma citada es necesario que la muestra se encuentre en condiciones perfectamente estancas, se procedió a colocar esparadrapo en su perímetro hasta su perfecto ajuste en el portamuestras.



Figura 66. Colocación del esparadrapo en la muestra.



Figura 67. Pieza con esparadrapo (izq.); Pieza dentro del portamuestras (dcha.).

En el software de toma de datos se introdujeron los parámetros de temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica mediante un higrómetro y los datos de presión proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología AEMET [92], para que éste ajuste de forma óptima el valor de la velocidad del sonido. Con todo esto, se procedió a iniciar el ensayo con una duración aproximada de 5 minutos. Y transcurridos dos minutos y medio del inicio se procedió al intercambio de los micrófonos. Los resultados se obtienen de forma continua a través del software asociado.



CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN



CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
14. DIFRACCIÓN DE RAYOS X	79
15. PRESENCIA DE PARTÍCULAS DE HIERRO DE LA ESCORIA DE SOLDADURA	81
16. DENSIDADES EN VERDE	82
17. CURVAS DE SINTERABILIDAD	84
17.1. CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA	89
18. DUREZA	92
18.1. DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL.....	93
19. COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO.....	100
20. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO	131



14. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Como ya se ha especificado con anterioridad, en este estudio se ha trabajado con materiales derivados de la actividad industrial y los generados en la construcción y demolición. Es por ello que se desconoce la composición exacta de los materiales empleados en este proyecto. Con el objeto de verificar que la composición mineralógica tanto del ladrillo como de la escoria de soldadura o flux corresponden de manera aproximada con las que se consideraron previamente en el apartado 7.1. “Selección de las proporciones de los constituyentes mediante diagramas ternarios”, se empleó la técnica de Difracción de Rayos X para caracterizar de forma somera los residuos de los que se partía para este proyecto. Los difractogramas que se presentan a continuación, fueron proporcionados por el Servicio de Difracción de Rayos X de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca.

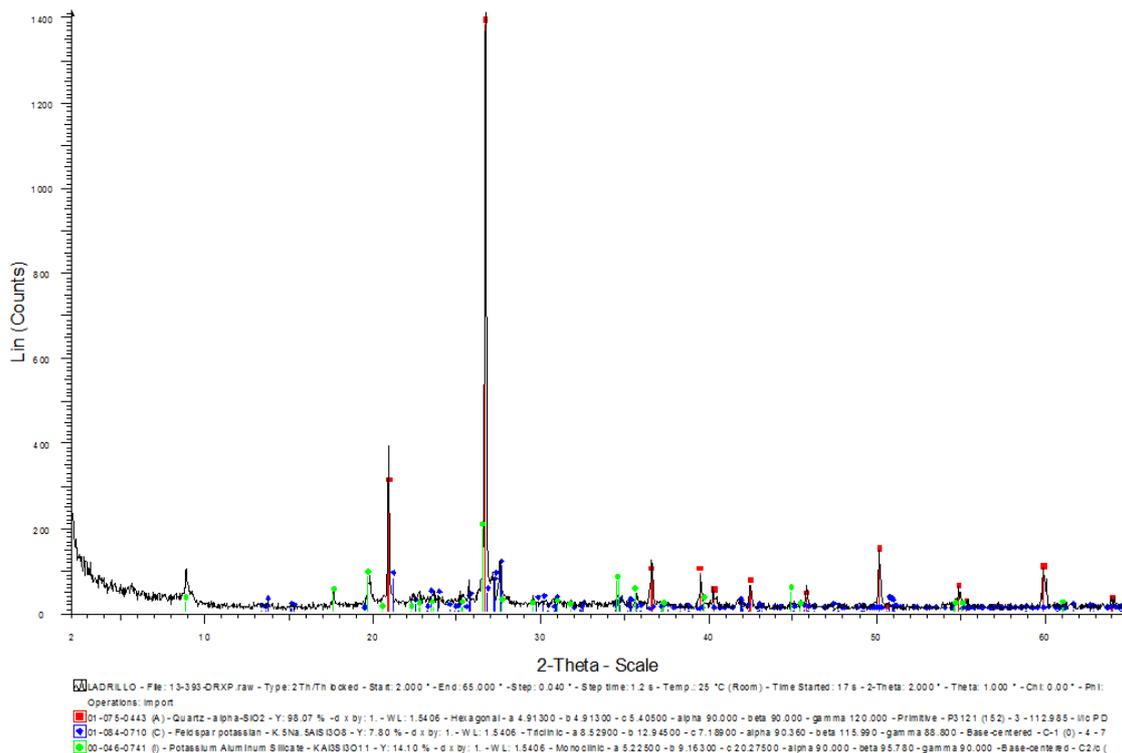


Figura 68. Difractograma del polvo de ladrillo.

En la Figura 68, se puede observar el difractograma correspondiente al ladrillo utilizado en el presente estudio. Se aprecia como el mayor pico y más destacable del difractograma



pertenece al SiO_2 , tal y como se había estimado con anterioridad (un 60% aproximadamente de la composición por óxidos). Y como el resto de picos correspondientes a los demás componentes se caracterizan por su baja intensidad. Por otro lado la presencia de Al_2O_3 (un 30% aproximadamente de la composición del ladrillo) está en forma, básicamente, de silicoaluminatos.

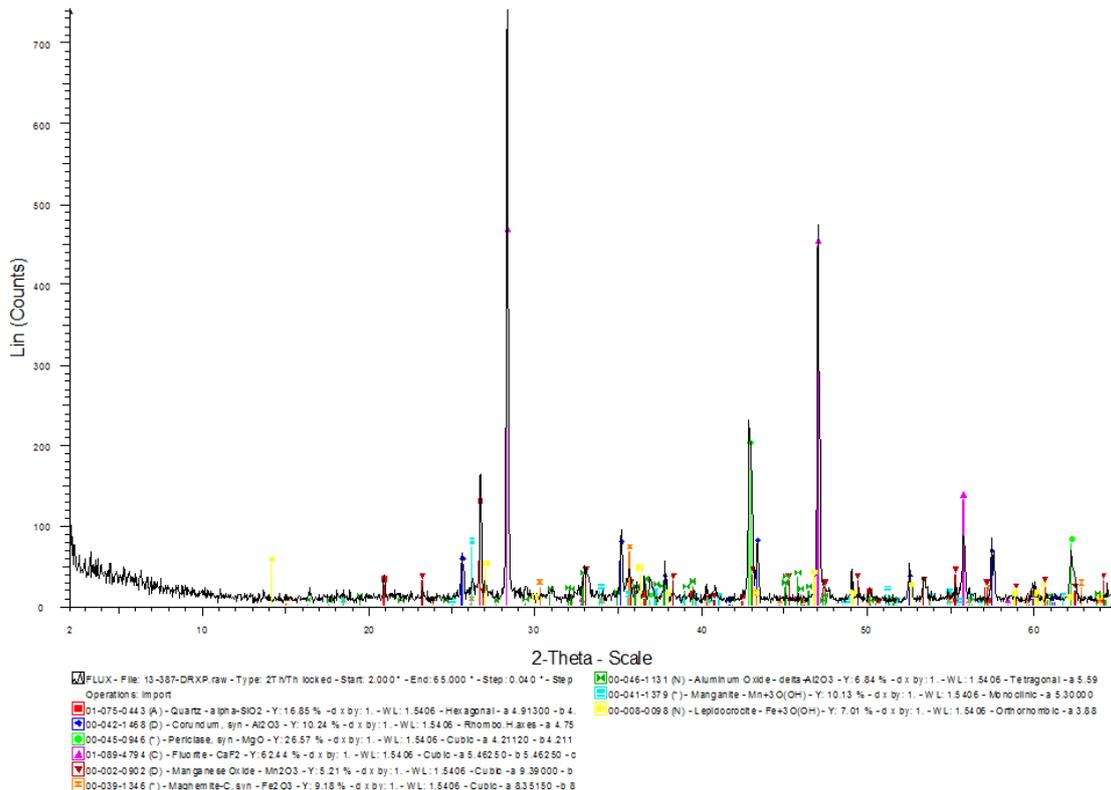


Figura 69. Difractograma del polvo de escoria de soldadura o flux.

La Figura 69 muestra el difractograma representativo de la escoria de soldadura. En este caso, los componentes que aparecen en el difractograma corresponden de manera notoria con la ficha técnica del propio fabricante. Es por ello, que en primer lugar, el pico de mayor intensidad corresponde al CaF_2 y queda en un segundo lugar el MgO . El Fe_2O_3 también hace su aparición en el difractograma aunque con menor intensidad, motivo por el que durante el proceso experimental fue necesaria la eliminación del hierro mediante un imán.



15. PRESENCIA DE PARTÍCULAS DE HIERRO DE LA ESCORIA DE SOLDADURA

En anteriores estudios [13], se pudo observar que la presencia de partículas de hierro podría interferir de forma negativa en la fabricación de los materiales sinterizados. Con este precedente se intentó eliminar, en la medida de lo posible, la cantidad en materia férrea de la mezcla de polvos. De forma paralela se intentó cuantificar su contenido.

Cuando se realizó el tamizado de la escoria de soldadura, ésta se encontraba impurificada con partículas de hierro y por tanto, se efectuaron sucesivas pasadas con un imán para separarlas del resto de los polvos (<0,063 mm) con el objetivo de evitar defectos posteriores. El material de flux que no pasó por la malla del tamiz, se colocó en un lugar diferente al resto, y de este modo, se reutilizó en sucesivas repeticiones del proceso de molienda y tamizado; y se contabilizó la masa de hierro y polvo de flux obtenido. Así, se elaboraron las siguientes gráficas:

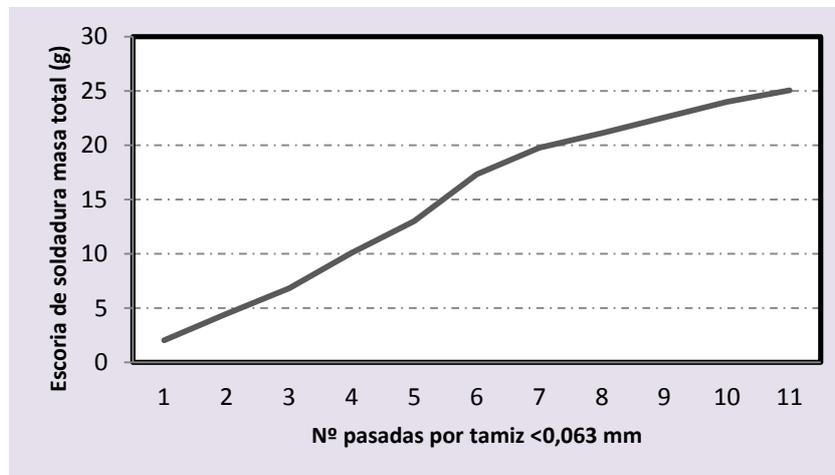


Figura 70. Masa total acumulada de la escoria de soldadura en función del número de pasadas.

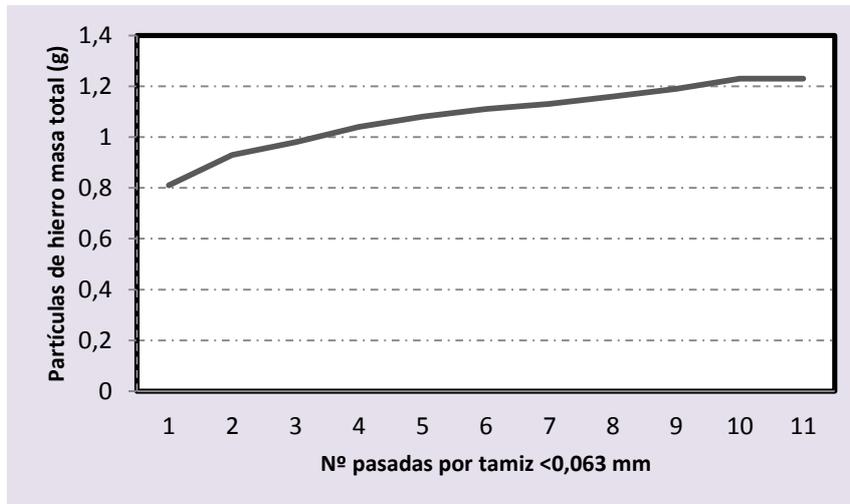


Figura 71. Masa total acumulada de partículas de hierro en función del número de pasadas.

Mientras que en la gráfica correspondiente a la Figura 70, aumenta considerablemente la masa de flux obtenido, como era de esperar, en el caso de la cantidad de partículas de hierro atrapadas por el imán no se aprecia apenas diferencia entre los sucesivos tamizados. Este hecho se atribuye a que las partículas de hierro tienen un gran peso y una vez molido y tamizado el conjunto de escoria de soldadura con las impurezas de hierro, la mayor parte de estas partículas férricas pasaron a través de la malla del tamiz y se separaron con el imán tras la primera criba. Por ello, en el resto de pasadas del material a través del tamiz la proporción de partículas de hierro eliminada fue inapreciable.

En cada operación de separación magnética efectuada después de cada criba, se realizaron tres pasadas con un imán ferromagnético con objeto de separar la mayor parte del material férreo. Al igual que en estudios anteriores [13] se concluyó que a partir de la tercera pasada con el imán sobre el polvo no se conseguía separar más material férreo.

16. DENSIDADES EN VERDE

Tras poner en práctica lo descrito en la parte del proceso experimental en lo referente a la obtención de las piezas, los primeros datos que se obtuvieron durante el estudio fueron las distintas medidas de las muestras después de su acondicionamiento. Debido a que se trata de un proceso manual y que es completamente imposible lograr que todas las piezas reúnan las mismas características con relación al diámetro, altura y masa, se decidió medir cada una de



las piezas por separado. Además, para lograr una mayor exactitud, se tomaron tres medidas de cada una de ellas, para que los resultados obtenidos tuviesen una mayor fiabilidad.

Se consideraron como valores no válidos para la densidad, aquellos que se encontraban excesivamente alejados de la media y se utilizaron para el presente estudio, el resto de las probetas. A continuación, se muestra un gráfico de la media de las distintas densidades en verde de las muestras donde figuran las desviaciones de sus valores extremos.

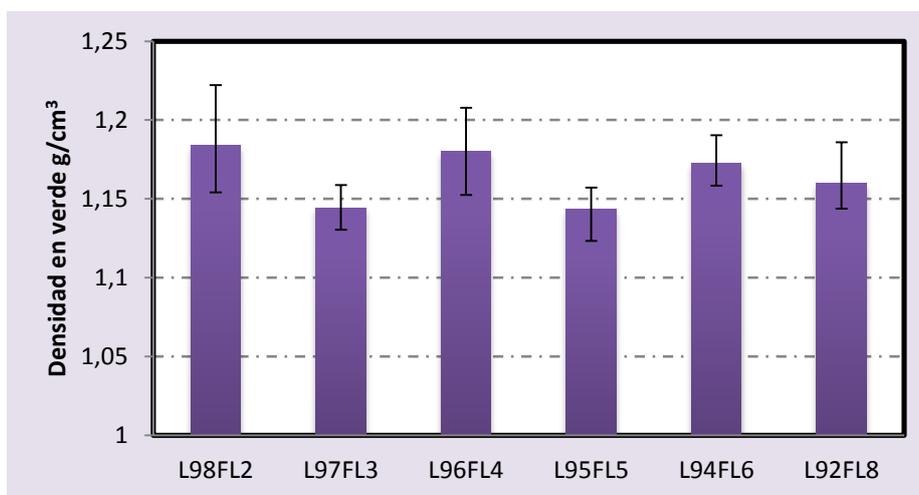


Figura 72. Representación de las densidades medias en verde.

Si se observa detenidamente la gráfica (Figura 72), las probetas de “L98FL2”, “L96FL4”, “L94FL6” y “L92FL8” tienen una densidad que desciende conforme aumenta la cantidad de flux. En el caso de las muestras “L97FL3” y “L95FL5” sucede de manera análoga aunque sea inapreciable en la representación, 1,144 y 1,143 g/cm³ respectivamente. El motivo de que sigan una secuencia lógica pero no de manera global, se debe a que dichas probetas se realizaron en dos tandas diferentes. Por tanto, se piensa que pudo existir algún cambio en cuanto a los pasos previos de obtención de los polvos de ladrillo y flux y en la elaboración de las piezas debido a que se efectúa de forma manual. En resumen, la tendencia general sería una ligera disminución de la densidad en verde cuando aumenta el contenido en flux en el intervalo estudiado.

Es importante reseñar que en algunas de las probetas obtenidas se percibieron unas grietas en la parte superior tras sacarlas del horno de secado, como se puede observar en la



Figura 73. Se llegó a la conclusión de que este efecto se debe a que el almidón con el que se elaboró la pieza posee un coeficiente de dilatación diferente. Por ello, cuando existe un cambio brusco de temperatura, la parte del almidón que se sitúa en la zona de arriba por causa de su densidad, contrae a una velocidad distinta que el resto de la pieza, reflejándolo en forma de grietas. Cuanto mayor sea el exceso de almidón con respecto al polvo o la falta de homogeneidad de la mezcla, mayor será la zona afectada por el agrietamiento. Por otro lado, al ser un proceso completamente manual es complicado mezclar de forma homogénea la suspensión de almidón-agua con el polvo de residuo, haciendo que en algunos casos (no en todos) suceda lo descrito.



Figura 73. Pieza agrietada debido al almidón situado en la parte superior.

17. CURVAS DE SINTERABILIDAD

El siguiente paso consistió en la fase de sinterizado. En esta etapa, las muestras se sometieron a ciclos de temperatura como se explicó en el proceso experimental, para obtener una contracción volumétrica y una disminución de la porosidad; junto con un aumento de la densidad. En la Figura 74, se pueden observar las distintas tonalidades que adquirieron cada una de las piezas tras el sinterizado a las distintas temperaturas.

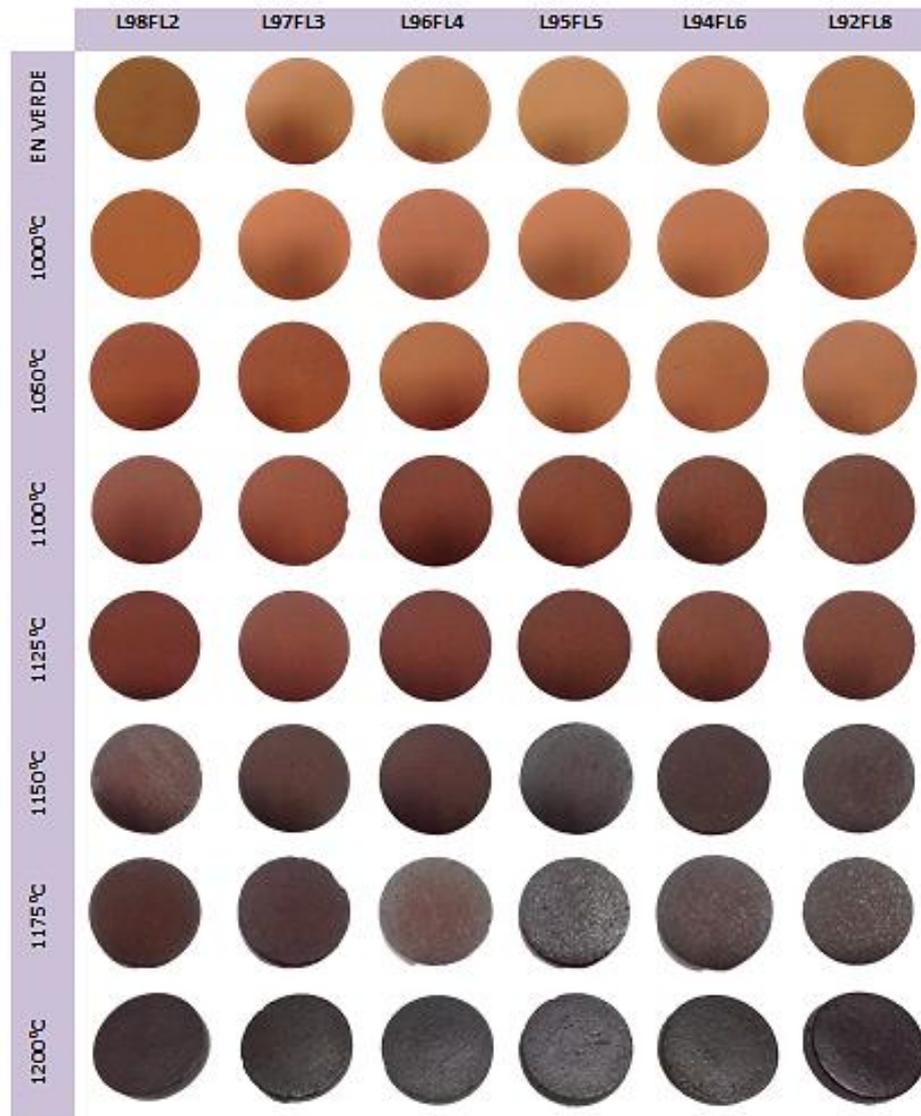


Figura 74. Apariencia de las piezas en función de la composición y la T^{ra} de sinterización.

A medida que la temperatura es mayor y el contenido de flux es más alto, la pieza adquiere una tonalidad cada vez más oscura. Además, en las piezas sometidas a la temperatura de 1175°C se comienza a apreciar indicios de una fase líquida que deja en la pieza tras su solidificación, un aspecto más brillante que el resto de piezas (vitrificación superficial). En la serie de 1200°C se puede observar de manera más notoria este efecto (Figura 75).

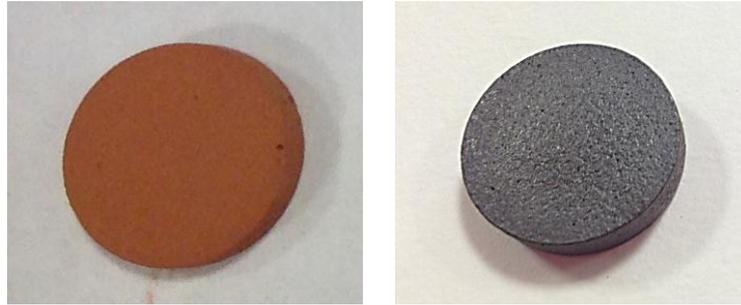


Figura 75. Muestra sinterizada a 1000°C (izq.); Muestra sinterizada a 1200°C (dcha.).

Cuando se crea un exceso de fase líquida a elevada temperatura se pueden producir reacciones no deseadas. Es por esto, que se crea fase líquida mientras permanece la pieza en el horno, y durante su enfriamiento se solidifica conjuntamente la pieza con la placa de paval situada bajo la misma. En la siguiente imagen (Figura 76) se puede percibir como quedó la pieza tras su enfriamiento.



Figura 76. Pieza sinterizada con restos de paval adheridos en su base.

En la Figura 77, se puede distinguir para cada una de las composiciones “L98FL2”, “L97FL3”, “L96FL4”, “L95FL5”, “L94FL6” y “L92FL8” las diferentes densidades de sinterizado que se han obtenido y que dan lugar a sus curvas de sinterización o de sinterabilidad. Mediante éstas, se buscó la “ventana óptima de sinterización”, que aludiendo a lo explicado en el presente proyecto es el intervalo en el que se encuentra la temperatura de sinterización mínima a la cual las piezas alcanzan la máxima densidad.

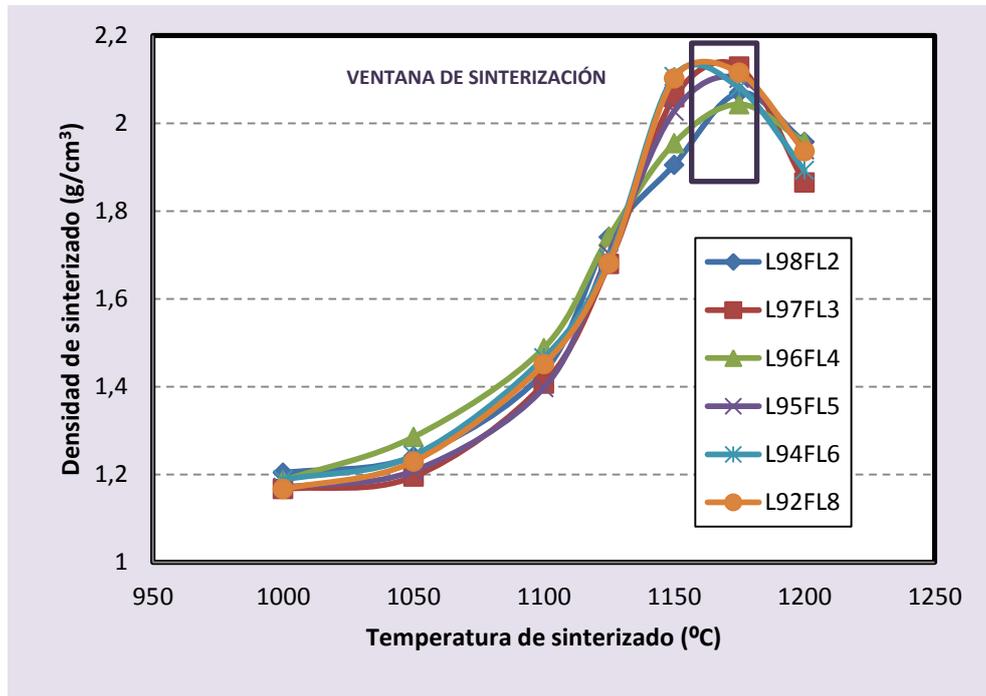


Figura 77. Curvas de sinterabilidad de los distintos materiales.

En base a esto, se ha establecido que la temperatura de sinterización óptima corresponde a 1175°C, es decir, es la temperatura de sinterización con la que se consigue mayor densidad. Si realizamos una comparativa de la temperatura de sinterizado óptima en este estudio con otras líneas de investigación realizadas en el laboratorio [13], se puede observar que no existen incoherencias con los resultados obtenidos en el presente proyecto.

Además, se ha conseguido el objetivo fundamental de este trabajo que consiste en disminuir la temperatura a la que sinteriza el ladrillo mediante un aporte de fundente para conseguir un ahorro energético, que a su vez, se traduce en un ahorro económico.

Este hecho, se puede distinguir en la siguiente gráfica donde se representan las curvas de sinterabilidad de la máxima y mínima composición de escoria de soldadura para este proyecto.

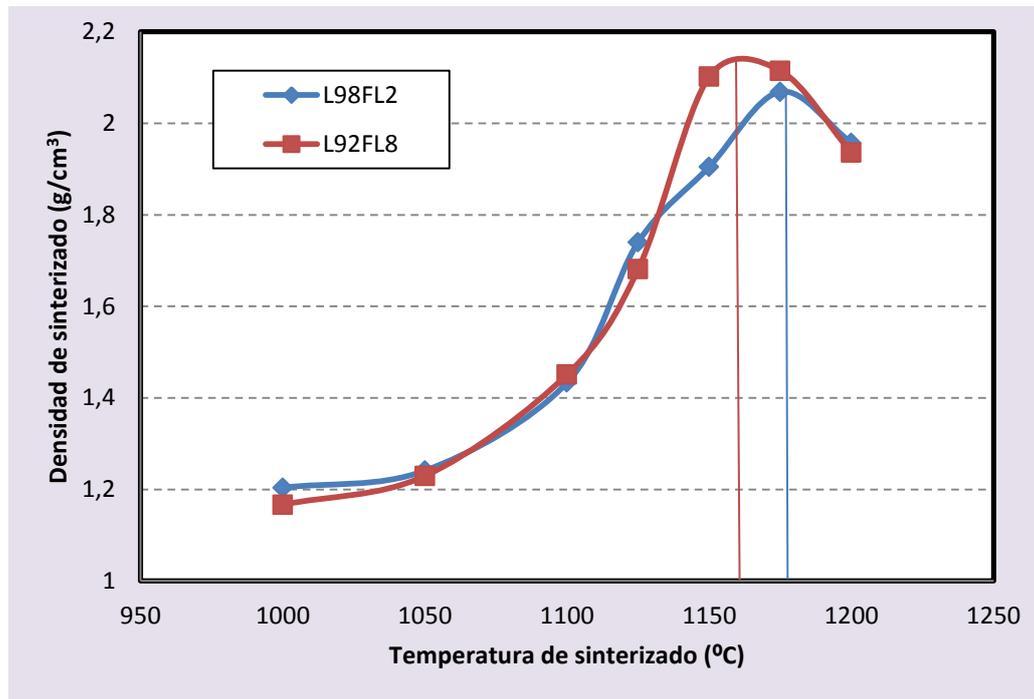


Figura 78. Comparativa de la pieza L98FL2 con L92FL8.

A la vista del gráfico, el máximo de la curva de sinterizado a medida que aumenta el contenido de fundente de escoria de soldadura, se desplaza hacia la izquierda lo que provoca que la temperatura a la cual sinteriza la muestra sea cada vez más baja, además de obtener una mayor densidad.

Cabe reseñar que durante la preparación superficial de la muestra L98FL2_1125, se observó un hecho significativo. Como se puede advertir en la Figura 79, a medida que se realizaba el pulido de la pieza, se iba eliminando la capa más superficial de color más oscuro y ligeramente vitrificada. Su aspecto exterior indicaba que estaba sinterizada (denotando una ligera sobresinterización o quemado), pero al eliminar la primera capa apareció un tono más rojizo. Esto refleja que a pesar de que la pieza superficialmente parecía que había sobresinterizado, este efecto no tuvo lugar en el interior de la misma. Es por ello, que se puede reafirmar lo expuesto anteriormente mediante las curvas de sinterización, es decir, que la temperatura óptima de sinterización (respecto a la densidad) no se puede estimar que corresponda a 1125°C.



Figura 79. Aspecto de la pieza L98FL2 a la temperatura de 1125°C durante el pulido.

No obstante, no sólo se puede considerar una única temperatura óptima de sinterización, ya que esta consideración dependerá de las funciones que vaya a desempeñar el material. Es por ello que si se busca un material resistente, será necesario que sea el más denso, dentro de lo posible. Un aumento de la densidad, mejora las propiedades mecánicas y el comportamiento frente al desgaste.

Sin embargo, si lo que se pretende es obtener un material con buenas propiedades como aislante acústico, es necesario que presente cierta porosidad, que no se puede conseguir sinterizando a elevadas temperaturas. Es por todo esto que la temperatura óptima de sinterización para obtener materiales con buen comportamiento acústico se podrá encontrar entre las temperaturas de 1050°C y 1100°C, para las que se consiguen piezas porosas y sin pérdidas de polvo.

17.1. CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA

Como se advirtió anteriormente, el proceso de la sinterización no provoca solamente un cambio en la densidad, sino que va asociado con una contracción volumétrica debido al cambio de porosidad que experimentan cada una de las piezas.

En la Figura 80, se representa la contracción de cada muestra en forma de porcentaje.

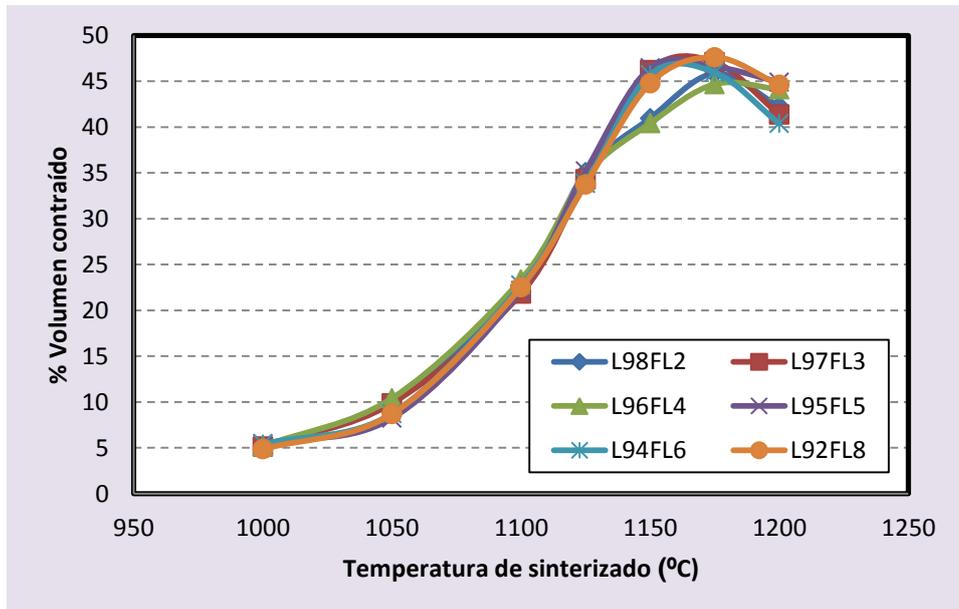


Figura 80. Contracción volumétrica frente a la temperatura de sinterización.

Dicha contracción está íntimamente ligada con la densidad alcanzada. Por ello, se observa que sigue la misma tendencia que la gráfica de la Figura 77. Por tanto, hasta llegar a la temperatura óptima de sinterización las muestras sufren una contracción que aumenta con la temperatura. A partir de este punto, la contracción de volumen es menor.

En las Figuras 81 y 82, se representan los valores medios de la disminución de volumen sufrido por las muestras “L98FL2” y “L92FL8” respectivamente.

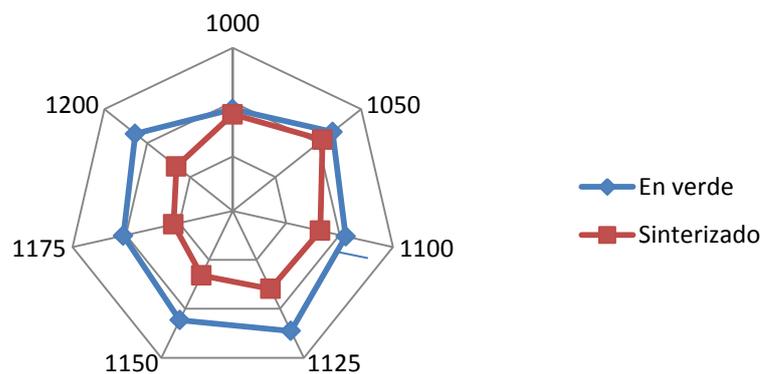


Figura 81. Comparación de los volúmenes en verde y de sinterizado para el L98FL2.

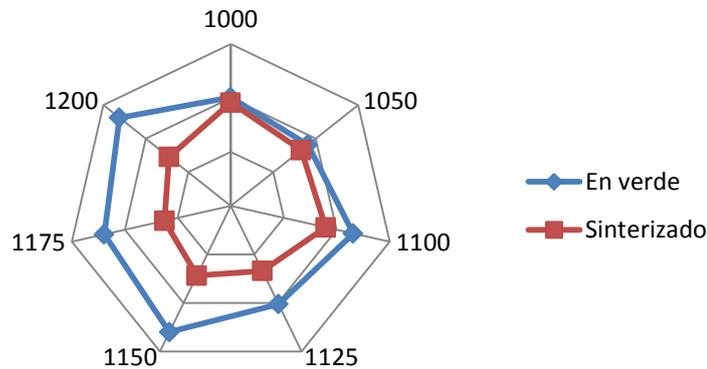


Figura 82. Comparación de los volúmenes en verde y de sinterizado para el L92FL8.

En ambas representaciones gráficas, sucede de manera análoga, el volumen en verde y sinterizado de las dos piezas es prácticamente el mismo en la temperatura de 1000°C. Por tanto, los puntos que representan ambos volúmenes quedan superpuestos. Sin embargo, no sucede lo mismo para la temperatura de 1200°C, ya que se puede ver una enorme diferencia de volumen antes y después del sinterizado.

En cuanto a la contracción de volumen que sufren las piezas atendiendo al porcentaje de fundente, existe un decremento ligeramente mayor en la muestra de contenido de escoria de soldadura más alto respecto al resto de piezas. Sin embargo, esta variación es insignificante. Por ello, hay una diferencia más notoria en cuanto a la variación de temperatura que mediante los diferentes porcentajes de escoria de soldadura o flux de las muestras.

El grado de contracción de las piezas se debe a varios factores entre los que se encuentra el tipo de arcilla que compone el ladrillo. Puesto que cuando la pieza se somete a elevadas temperaturas, se elimina el ligante y como consecuencia, se produce una reducción de volumen. Así pues, según la cantidad de aglutinante que haya absorbido la pieza, dependerá la contracción de volumen.

Al someter las probetas a mayor temperatura de sinterización, se producen una serie de reacciones entre las partículas debidas a la difusión. Esto provoca la unión entre ellas mediante la formación de cuellos, que produce una mayor densificación, disminuyendo a la vez la porosidad de los materiales y como consecuencia, el volumen.



18. DUREZA

A pesar de que en el proceso experimental se decidió realizar el ensayo de dureza posteriormente al ensayo de desgaste. Se ha determinado que para una mejor comprensión de los resultados que se van a presentar más adelante, es necesario conocer la dureza de cada una de las piezas con anterioridad, debido a que tanto la dureza como la densidad son parámetros fundamentales que influyen de forma directa en el estudio tribológico de las probetas. Sólo se realizaron medidas de dureza de los materiales estudiados a 1150°C, 1175°C y 1200°C, puesto que estas son las temperaturas a las que se obtiene una mayor densidad. En base a esto los valores de dureza también serán más elevados.

Seguidamente se muestran todos los resultados obtenidos para cada una de las piezas. Estos resultados consisten en la media realizada de 20 medidas de cada material.

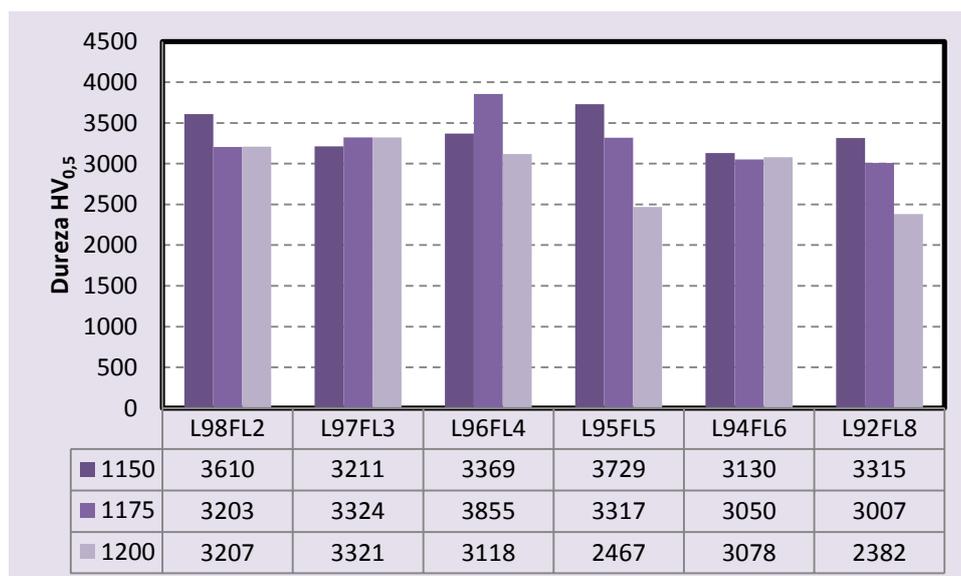


Figura 83. Durezas $HV_{0,5}$ de la serie de piezas de las temperaturas de 1150°C, 1175°C y 1200°C.

Como se puede comprobar en la Figura 83, los valores obtenidos en las temperaturas de 1150°C y 1175°C están muy próximos, del mismo modo que sucedía con los valores de sus densidades de sinterizado. De forma general, se deduce que cuando la temperatura de sinterización de la pieza es menor, se presenta una mayor dureza. Además, cuando la pieza tiene un mayor contenido de fundente adquiere una menor dureza. Esto podría ser debido a la



presencia de fases más duras, como por ejemplo Al_2O_3 , que cuando aumenta la temperatura se combinan con el resto de los componentes (como silicoaluminatos, más blandos) haciendo que decaiga la dureza media. Esto es coherente con la presencia de una mayor cantidad de fase líquida (fundente) que hace que las reacciones que se puedan producir se realicen a menor temperatura y con más rapidez.

Si comparamos los resultados obtenidos de dureza con los de otras líneas de investigación [12] en los valores referentes al ladrillo L10, se observa que los valores de dureza que se presentan son muy similares a pesar de que en su caso se tratase de ladrillo 100%. Además, si se continúa comparando los resultados de otros estudios de materiales análogos [16], también presenta unos valores de dureza semejantes a los alcanzados en el presente proyecto.

18.1. DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

Una forma de determinar la fiabilidad de un material es ver la dispersión de alguna de sus propiedades, como puede ser la dureza, a través de la determinación del módulo de Weibull. Así mismo, para verificar que los resultados obtenidos de dureza de las piezas de la temperatura de $1175^{\circ}C$ (la más óptima con respecto a la densidad) presentan una correcta fiabilidad, se ha realizado el ajuste mediante una distribución de Weibull.

Para realizar la distribución de Weibull, es necesaria la utilización los estimadores indicados anteriormente [13, 15, 89]:

$$F_{j1} = \frac{j}{(n+1)} \quad \text{Ecuación (4)} \quad F_{j2} = \frac{(j-0,3)}{(n+0,4)} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$F_{j3} = \frac{(j-0,5)}{n} \quad \text{Ecuación (6)} \quad F_{j4} = \frac{(j-(3/8))}{(n+0,25)} \quad \text{Ecuación (7)}$$



MUESTRA L98FL2_1175

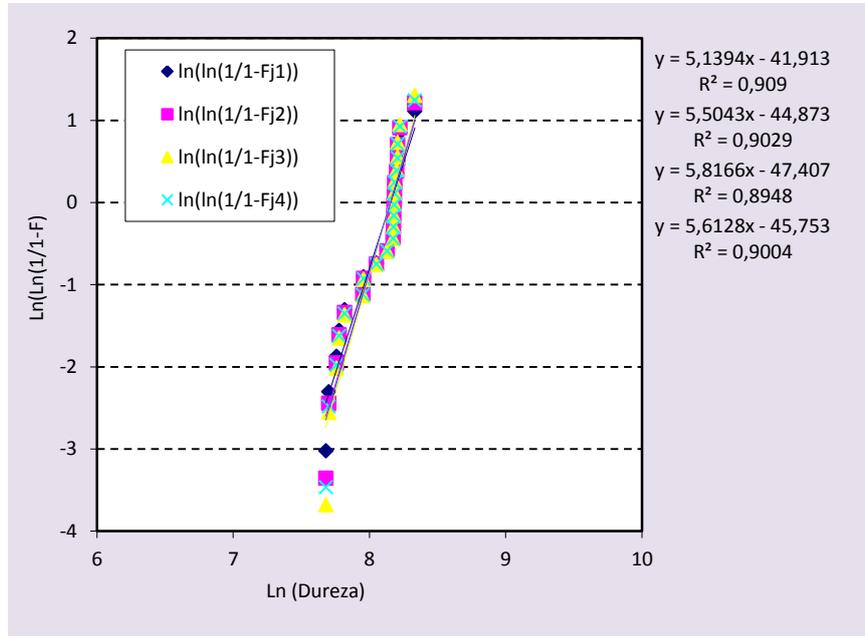


Figura 84. Representación gráfica de las aproximaciones lineales para la determinación del módulo de Weibull para la dureza de la pieza L98FL2_1175.

En el caso del material L98FL2_1175 (Figura 84), las ecuaciones derivadas del empleo de los cuatro estimadores se muestran en la misma figura. Debajo de cada una, se observa el valor correspondiente al coeficiente de correlación “ R^2 ” de cada una de las rectas. Cuanto más cercano se encuentre este valor de 1, la recta se ajustará de forma más precisa a los valores de dureza. En este caso, todos los valores se encuentran alrededor de 0,90.

En lo referente a las pendientes de las rectas de los estimadores, éstas indican el grado de dispersión de los datos obtenidos. Si la pendiente es elevada, los datos son parecidos, y por tanto, existe poca variabilidad. A la vista de la gráfica y del valor de la pendiente o módulo de Weibull que se sitúa en torno a 5 (el valor de las cerámicas convencionales), se puede estimar que el grado de dispersión es bastante adecuado. Además, los resultados guardan similitud con otras líneas de investigación [13].



MUESTRA L97FL3_1175

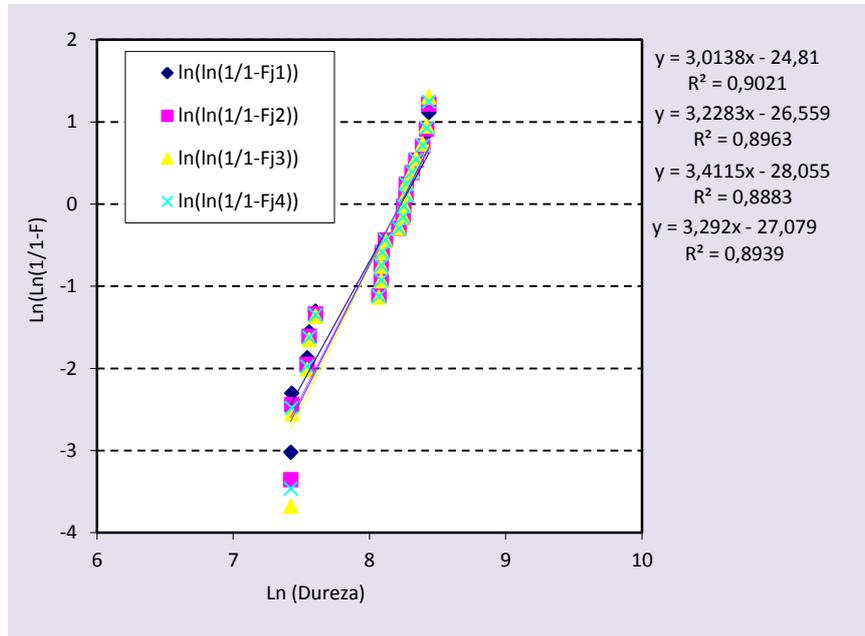


Figura 85. Representación gráfica de las aproximaciones lineales para la determinación del módulo de Weibull para la dureza de la pieza L97FL3_1175.

En la Figura 85, se muestra la representación gráfica de las aproximaciones lineales para la determinación del módulo de Weibull en cuanto a la dureza para la pieza L97FL3_1175. Si se realiza una comparativa con la muestra anterior, se observa que los valores del coeficiente de correlación lineal de cada una de las rectas también se sitúan en valores alrededor de 0,90.

Sin embargo, en este caso las pendientes de las rectas de los estimadores tienen un valor menor, cercano a 3. Como se puede observar en la gráfica, se presenta el caso de dos tramos lineales dispares, esto puede ser debido al aumento de la cantidad de fundente que hace que aparezcan nuevas fases con dureza distinta que aumenten la dispersión del conjunto y por lo tanto el módulo de Weibull y la fiabilidad asociada.



MUESTRA L96FL4_1175

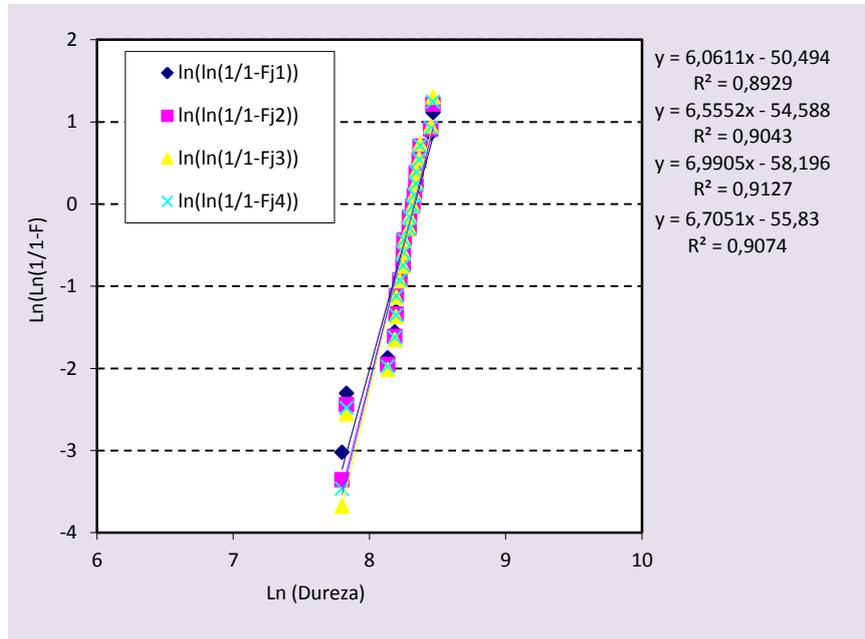


Figura 86. Representación gráfica de las aproximaciones lineales para la determinación del módulo de Weibull para la dureza de la pieza L96FL4_1175.

En la Figura 86, con respecto al módulo de Weibull se produce un aumento comparado con los dos casos anteriores, al presentar unos valores de pendiente, entre 6-7 respectivamente. No obstante, los valores del coeficiente de correlación lineal de cada recta se sitúan en una franja entre 0,89 y 0,91 de manera similar al resto de materiales ya analizados.



MUESTRA L95FL5_1175

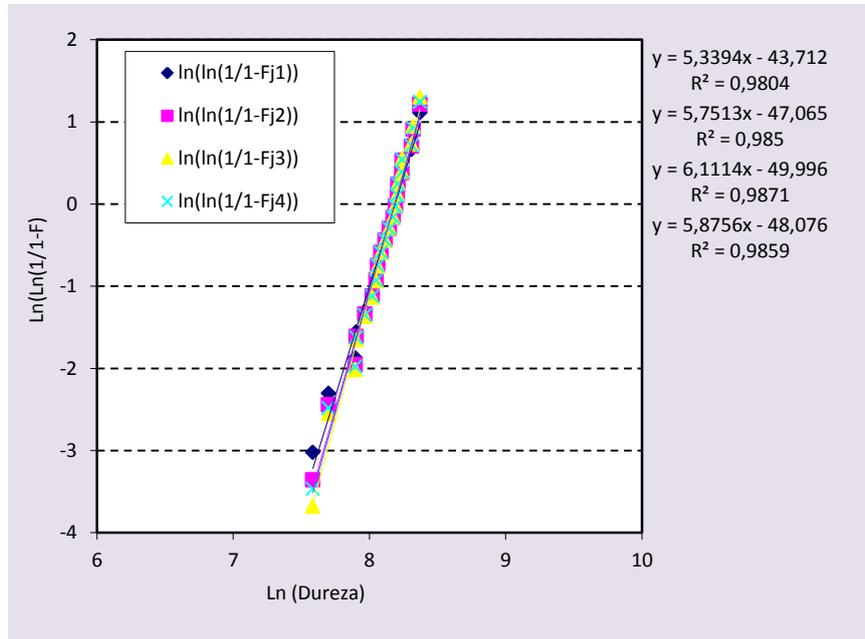


Figura 87. Representación gráfica de las aproximaciones lineales para la determinación del módulo de Weibull para la dureza de la pieza L95FL5_1175.

En este caso (Figura 87), los valores de la pendiente de cada recta se encuentran entre 5,3 el valor más bajo y 6,1 el mayor valor, similares a los obtenidos en la Figura 86. Sin embargo, los valores del coeficiente de correlación lineal de cada una de las piezas son superiores al del resto de muestras analizadas previamente. Todos los valores del coeficiente de correlación se sitúan en un valor superior a 0,98. En conclusión, la regresión R^2 se ajusta correctamente, aunque el módulo de Weibull disminuye ligeramente con respecto al caso anterior.



MUESTRA L94FL6_1175

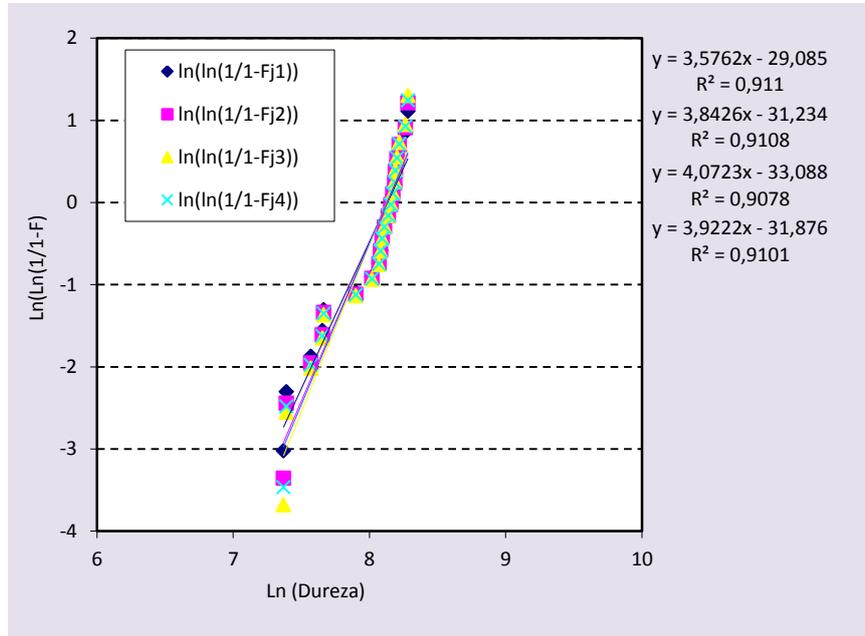


Figura 88. Representación gráfica de las aproximaciones lineales para la determinación del módulo de Weibull para la dureza de la pieza L94FL6_1175.

La Figura 88, permite observar unos valores del coeficiente de correlación y de la pendiente que se alejan bastante de los obtenidos en la muestra anterior. Ésta guarda una mayor similitud con la pieza L97FL3_1175. Los valores del coeficiente de correlación se ubican entre 0,90 y 0,91 y la pendiente está entre 3-4. Aunque no alcanza los valores que se conseguían con la anterior muestra. Por otro lado se observa que existen dos tendencias: una con una elevada pendiente y otra donde están los valores más alejados de la vertical. Esto podría ser debido a la presencia de nuevas fases con distinta dureza que hace que aumente la dispersión y disminuya el módulo de Weibull.



MUESTRA L92FL8_1175

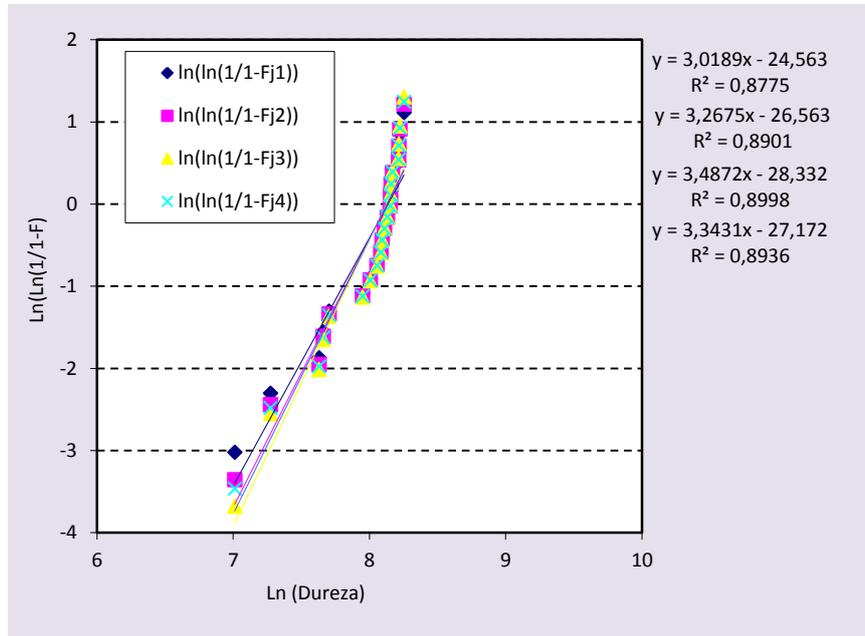


Figura 89. Representación gráfica de las aproximaciones lineales para la determinación del módulo de Weibull para la dureza de la pieza L92FL8_1175.

Por último, se realizó una representación gráfica de las aproximaciones lineales para determinar el módulo de Weibull de la probeta L92FL8_1175. Los valores del coeficiente de correlación lineales se localizan en una zona entre 0,87-0,89 y la pendiente de las rectas en un valor cercano a 3. Como en el caso anterior se aprecian dos tendencias debido a la aparición de una fase más blanda, que hace que aumente la dispersión y disminuya el módulo de Weibull. Como se ha comentado anteriormente, la alúmina (más dura) puede combinarse durante la sinterización y con ayuda de una mayor cantidad de fundente para convertirse en silicoaluminatos de carácter más blando. Aunque todos los estimadores son los más bajos de todas las piezas analizadas, igual que sucede en el caso de las pendientes, el estimador que funciona ligeramente mejor corresponde al F_{j3} .

En conclusión a la fiabilidad de todos los materiales analizados, el más fiable es el L96FL4_1175 con un módulo de Weibull cercano a 7 y un R^2 en torno a 0,90.



19. COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO

Los materiales sinterizados que mostraban un aparente mejor comportamiento frente al desgaste en función de su dureza y densidad, eran aquellos que se habían sinterizado a mayor temperatura, haciéndoles susceptibles de ser empleados como elementos resistentes frente al desgaste (pavimentos, etc.). A continuación se muestran los resultados obtenidos en los diferentes ensayos tribológicos de las piezas que se sometieron a las temperaturas de 1150°C, 1175°C y 1200°C.

Para conocer los coeficientes de desgaste del material y del contramaterial, en este caso una bola de acero, es necesario aplicar la siguiente fórmula matemática [93]:

$$K \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{N} \cdot \text{m}} \right) = \frac{\text{masa perdida (g)}}{\text{densidad} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \cdot \text{carga (N)} \cdot \text{distancia (m)}} \cdot 1000 \quad \text{Ecuación (8)}$$

MUESTRA L98FL2_1150

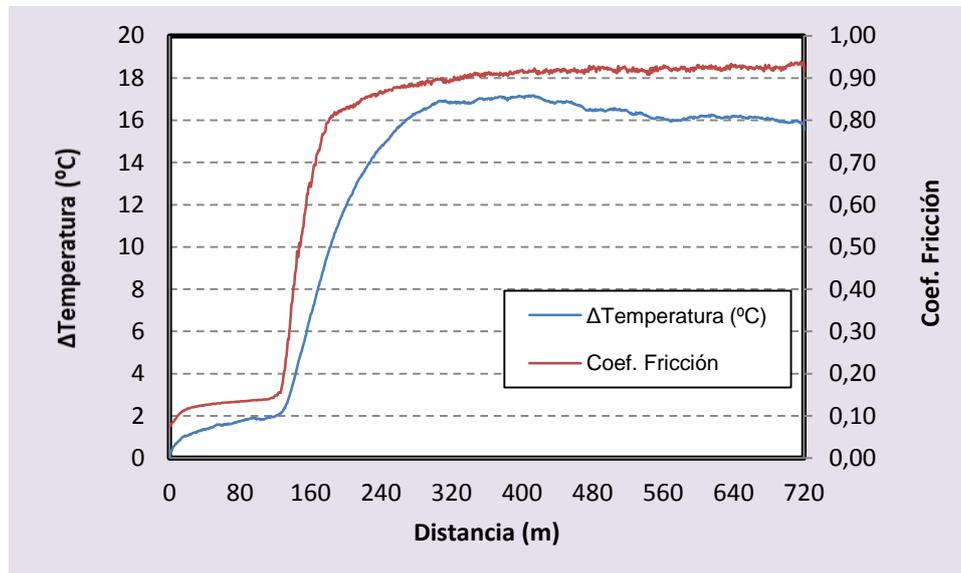


Figura 90. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L98FL2_1150.

En la Figura 90, se observa la evolución del coeficiente de fricción y la variación de temperatura de la muestra L98FL2_1150. Al inicio se presenta una etapa de deslizamiento y ajuste de ambas superficies, que tiene una duración aproximada de ciento cuarenta metros. A



continuación, salta la primera partícula y se produce la abrasión entre los dos materiales, hasta que aparece a partir de los cuatrocientos metros, una zona de mayor estabilidad en la propia gráfica que indica que el mecanismo de desgaste es abrasivo-adhesivo y sucede hasta finalizado el ensayo. El coeficiente de fricción aumenta hasta un valor máximo de 0,94.

Respecto a la evolución de la temperatura, se observa que en el punto donde inicia el desgaste abrasivo-adhesivo, coincidiendo con el máximo de la curva a 17°C, comienza a descender ligeramente. Este fenómeno es debido a la deposición del material metálico procedente del pin que queda adherido a la pista de desgaste, favoreciendo la disipación del calor.

MUESTRA L97FL3_1150

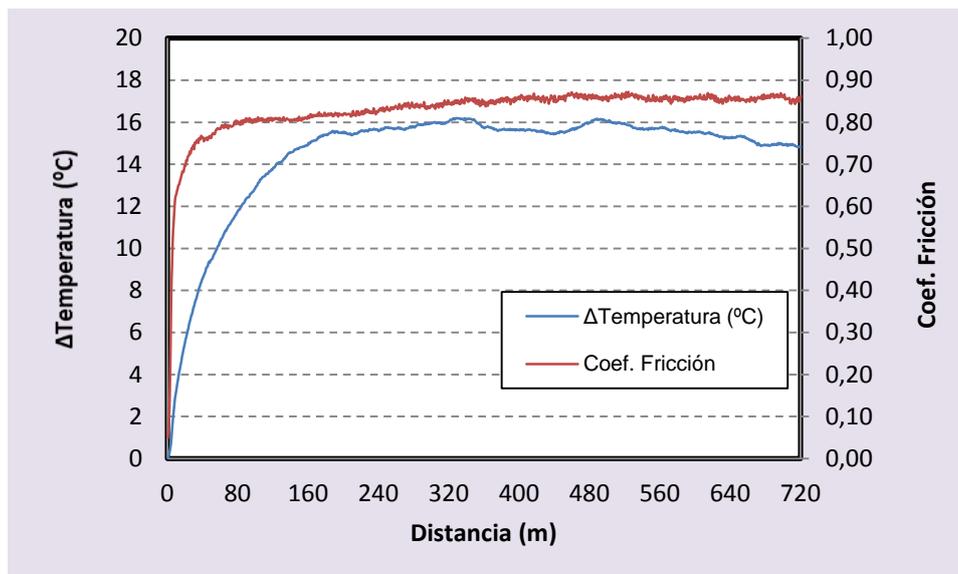


Figura 91. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L97FL3_1150.

En la Figura 91, se aprecia la evolución del coeficiente de fricción y la variación de temperatura de la pieza L97FL3_1150 en la que no existe etapa de deslizamiento, a diferencia de lo que sucedía en el caso anterior. En la pieza se comienza a producir abrasión desde el primer momento del ensayo. En los poros existentes, se deposita el metal del contramaterial y por tanto, el comportamiento pasa de ser abrasivo al inicio, a convertirse en abrasivo-adhesivo debido al material metálico. El coeficiente de fricción aumenta hasta alcanzar un valor máximo



que se sitúa en 0,87. Mientras que la temperatura alcanza su máximo en 16°C aproximadamente.

MUESTRA L96FL4_1150

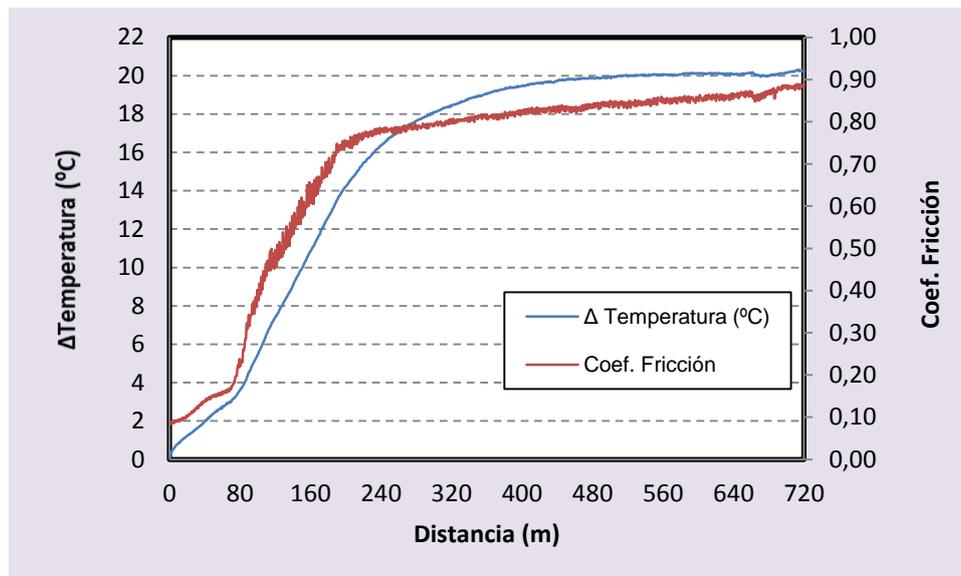


Figura 92. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L96FL4_1150.

En la Figura 92, se aprecia que en los primeros ochenta metros aproximadamente, se produce una etapa de deslizamiento en la que las superficies del material y el contramaterial se están acomodando. A partir de este punto, el coeficiente de desgaste comienza a aumentar aunque con ciertos altibajos, fenómeno que tiene lugar debido a que se arrancan las primeras partículas que permanecen en la pista. Así, puesto que el ensayo continua, dichas partículas se terminan convirtiendo en polvo, motivo por el que la curva tiene menos oscilaciones a partir de aproximadamente doscientos metros.

Una vez llegado a seiscientos sesenta metros, en la curva de la temperatura se observa un salto en el que aumenta la temperatura, la causa es que el material metálico depositado en la pista se ha oxidado. Y por tanto, el óxido no disipa sino que almacena el calor. El mayor coeficiente de fricción tiene un valor correspondiente a 0,89.

MUESTRA L95FL5_1150

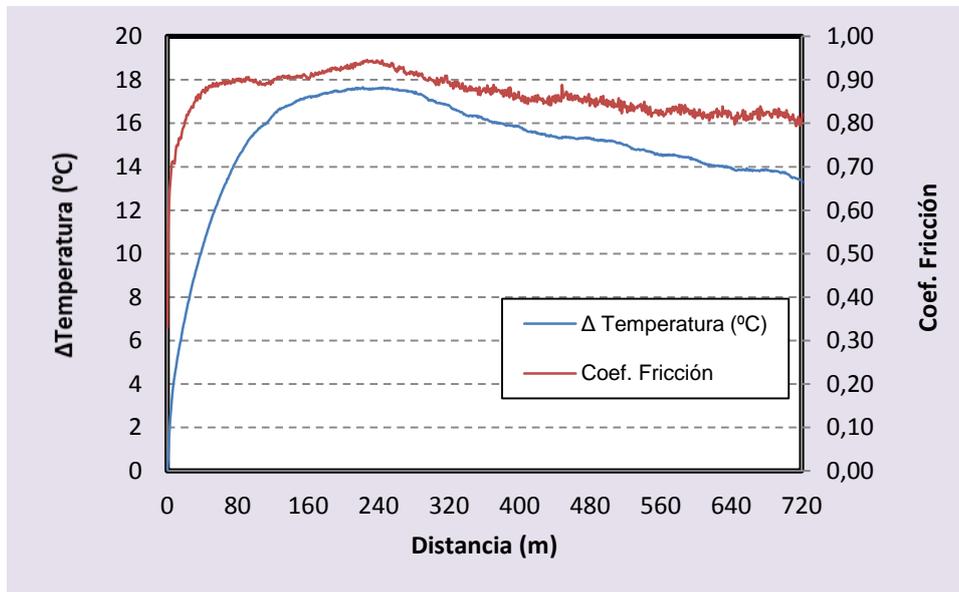


Figura 93. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L95FL5_1150.

En esta figura, se observa un aumento repentino del coeficiente de fricción con un comportamiento abrasivo. No se presenta la etapa de deslizamiento, sino que desde el inicio empieza a producirse abrasión. Alrededor de los trescientos metros, se forman microsoldaduras que provocan las fluctuaciones que se aprecian en la curva. Como consecuencia, la pieza tiene un comportamiento abrasivo-adhesivo hasta finalizado el ensayo. El valor más alto del coeficiente de fricción se sitúa en 0,95, recorridos doscientos cuarenta metros aproximadamente.

El máximo de la curva del coeficiente de fricción coincide con el que se produce en la curva de la temperatura. La posterior disminución de la temperatura se debe a la citada deposición del material metálico procedente del contramaterial que queda adherido a la pista de desgaste y a los poros, provocando una eliminación de calor más rápida, puesto que el metal disipa con mayor rapidez el calor.



MUESTRA L94FL6_1150

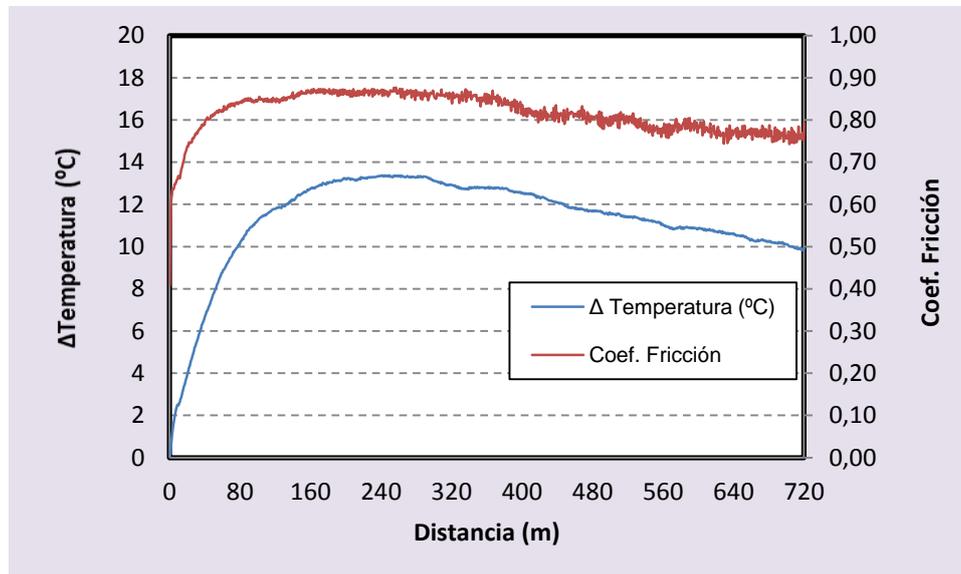


Figura 94. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L94FL6_1150.

En esta gráfica se observa la variación de la temperatura y del coeficiente de fricción de la muestra L94FL6_1150. Existen importantes similitudes con la pieza L95FL5_1150. Se refleja claramente como sucedía en el caso anterior, una ausencia de deslizamiento, por lo que existe un aumento del coeficiente de fricción muy brusco.

Este comportamiento abrasivo se produce porque las primeras partículas arrancadas de la pieza contribuyen a un mayor desgaste de la muestra. Una vez que se ha producido el máximo del coeficiente de fricción con un valor de 0,88, el coeficiente desciende pero describiendo una pendiente más suave, por lo que en este tramo se produce un desgaste abrasivo-adhesivo aunque con muchas oscilaciones por las microsoldaduras formadas en la pista de desgaste.

Respecto a la temperatura, aumenta de manera progresiva hasta alcanzar un total de 13,5°C aproximadamente. A partir de este punto, se produce una disminución de la temperatura por la deposición del material metálico procedente del pin que se sitúa en los poros existentes y en la pista de desgaste produciendo una eliminación de calor más rápida.

MUESTRA L92FL8_1150

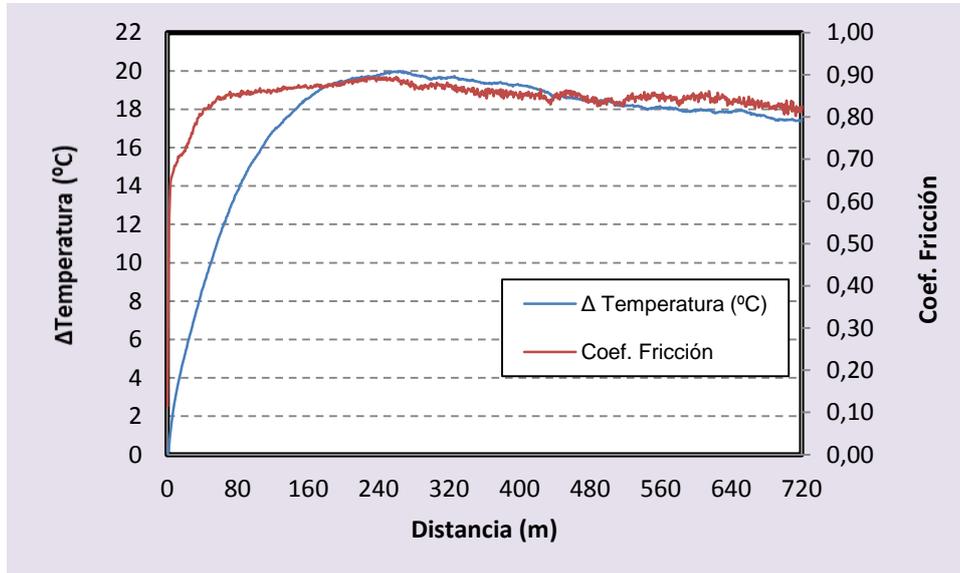


Figura 95. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L92FL8_1150.

En la Figura 95, se puede observar la variación del coeficiente de fricción y de la temperatura durante el ensayo tribológico de la muestra L92FL8_1150. En lo referente al coeficiente de fricción, desde el principio, de manera análoga a la muestra anterior, aumenta bruscamente desde los primeros metros recorridos dejando ver un comportamiento abrasivo.

A partir de los doscientos cuarenta metros el comportamiento comienza a ser abrasivo-adhesivo hasta el final del ensayo. Los diferentes altibajos que además se observan, se producen porque se han formado microsoldaduras durante esta etapa del ensayo.

Si se observa la curva de la temperatura, desde los primeros metros hasta los doscientos ochenta metros aproximadamente, la temperatura incrementa de forma progresiva hasta los 20°C. A partir de este momento, comienza a bajar hasta los 17,5°C donde finaliza el ensayo. En este descenso de temperatura, se producen las deposiciones metálicas en la pista de desgaste que favorecen la disipación del calor que se ha generado, indicando un desgaste abrasivo-adhesivo.

COMPARATIVA DE LOS MATERIALES A LA TEMPERATURA DE 1150°C

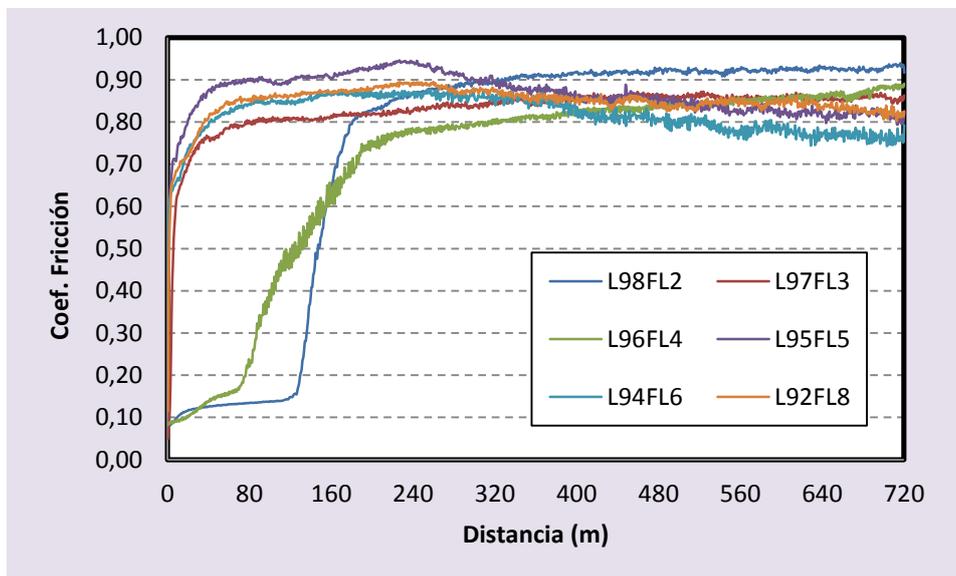


Figura 96. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura de los materiales a 1150°C.

En la Figura 96, se muestra la evolución del coeficiente de fricción de toda la serie de piezas a la temperatura de sinterización de 1150°C. El coeficiente de fricción máximo de todas las muestras se sitúa en una franja de valores entre 0,87 y 0,95. Sin embargo, en el instante previo a la finalización de los ensayos, los coeficientes de fricción toman unos valores entre 0,79 y 0,92.

El comportamiento de las muestras es muy similar en todos los casos, el coeficiente de fricción aumenta bruscamente en los primeros metros recorridos dando lugar a un comportamiento abrasivo. Más adelante, el comportamiento pasa a ser abrasivo-adhesivo hasta el final del ensayo con diferentes altibajos por la formación de microsoldaduras. No obstante, las piezas L98FL2_1150 y L96FL4_1150 tienen un comportamiento diferente al resto. Cuando se inicia el ensayo, se observa una etapa de deslizamiento y ajuste de ambas superficies. A continuación, salta la primera partícula y se produce el comportamiento abrasivo entre los dos materiales, hasta que el comportamiento cambia de abrasivo a abrasivo-adhesivo.

En los materiales con mayor contenido en fundente (5%, 6% y 8%) se produce el fenómeno de abrasión más rápidamente que en los de menor porcentaje (2%, 3% y 4%), a



pesar de que en los últimos metros del ensayo los materiales con menos cantidad de flux sean los que presenten mayor coeficiente de fricción. Esto se explica debido a que en la gama de mayor flux al igual que se producen más rápido los fenómenos de abrasión, también tiene lugar con anterioridad un comportamiento abrasivo-adhesivo, lo que provoca que el coeficiente de fricción llegue a disminuir más que para la otra gama, debido a que se ha producido durante más recorrido del ensayo un desgaste abrasivo-adhesivo.

Seguidamente, en la Figura 97, se presentan los datos que se han obtenido al calcular la tasa de desgaste tanto para el material como para el pin mediante la Ecuación (8) que se detalla al principio de este apartado.

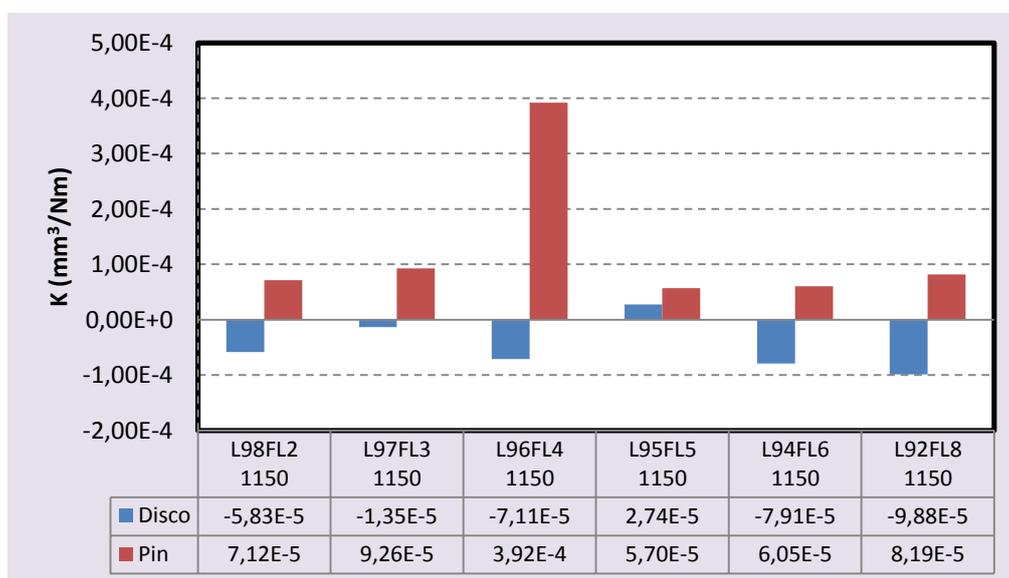


Figura 97. Coeficientes de desgaste del pin y de los materiales a 1150°C.

Se observa que en la mayoría de los casos el coeficiente de desgaste es negativo, esto es debido a la ganancia de masa que presentan las muestras a la hora de realizar el ensayo. El desgaste que se produce en el pin hace que, dichas partículas se vayan introduciendo en los poros que tiene la muestra. Con esto, lo que se está depositando es un acero de una densidad de $7,8 \text{ g/cm}^3$. Mientras que durante el ensayo se pierde material de las muestras, que tienen una densidad media de $2,0 \text{ g/cm}^3$. Al depositarse más material que el que pierde, y a la vez la diferencia de densidades es tan notable, que produce esa ganancia de masa y con ello, el valor negativo del coeficiente.



Por otro lado el pin no muestra ningún valor negativo. Esto es debido a que el disco no ha dejado material en él, y aunque esto fuera así, el valor de las densidades y su gran diferencia hace prácticamente imposible que tuviéramos una ganancia de masa.

MUESTRA L98FL2_1175

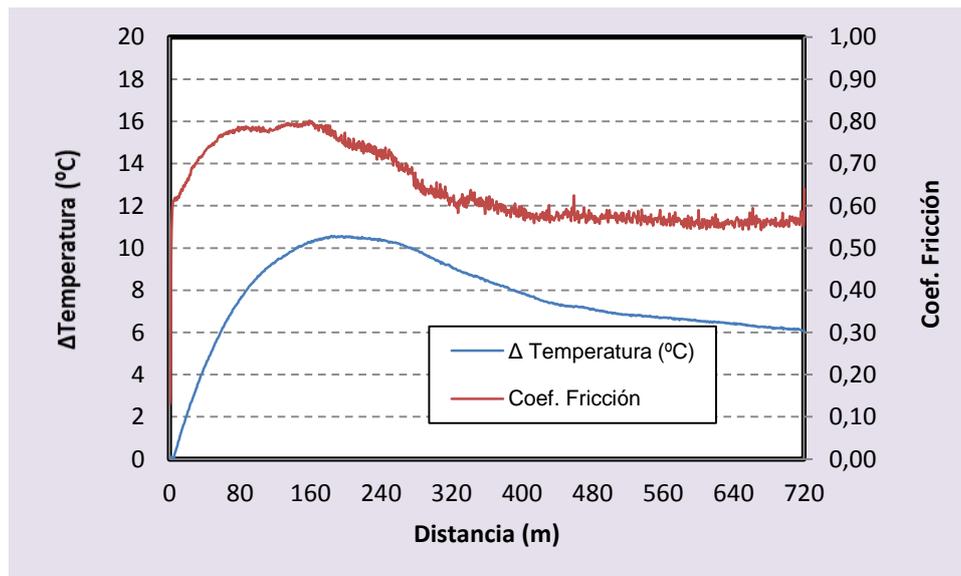


Figura 98. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L98FL2_1175.

En la Figura 98, se aprecia un comportamiento abrasivo nada más comenzar el ensayo. A partir de los ciento sesenta metros comienzan a crearse microsoldaduras, por lo que empieza el comportamiento abrasivo-adhesivo. A partir de los trescientos metros, se ha creado una capa de metal debido a la deposición de material del pin en la pista de desgaste. Por ello, tiene lugar un descenso en el coeficiente de fricción al producirse el desgaste del metal y no sólo de la propia pieza como sucedía anteriormente. Debido a esta capa de metal que se ha formado, el calor se disipa, por lo que la curva de temperatura desciende mucho más que en el resto de los ensayos analizados previamente.

MUESTRA L97FL3_1175

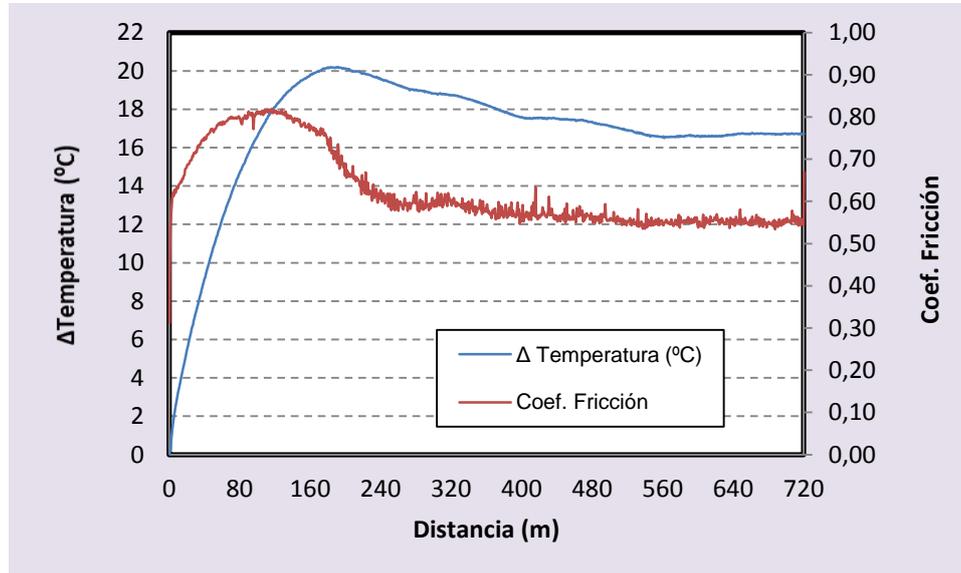


Figura 99. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L97FL3_1175.

En la Figura 99, también se representa la manera en que evoluciona el coeficiente de fricción y de temperatura de la pieza L97FL3_1175. Se produce un comportamiento abrasivo nada más comenzar el ensayo. A partir de los doscientos metros empieza la formación de microsoldaduras, que provocan el comportamiento abrasivo-adhesivo. A partir de los trescientos veinte metros, se deposita material del contramaterial en la pista de desgaste. Este es el motivo de que se produzca un descenso en el coeficiente de fricción. El metal que se va despositando poco a poco forma una capa de metal, y el calor que se genera se desprende rápidamente, lo que se traduce en un descenso de la curva de la temperatura. El máximo valor del coeficiente de fricción corresponde a un valor de 0,82. Sin embargo, la temperatura máxima de alrededor de los 20°C se produce a los doscientos metros.



MUESTRA L96FL4_1175

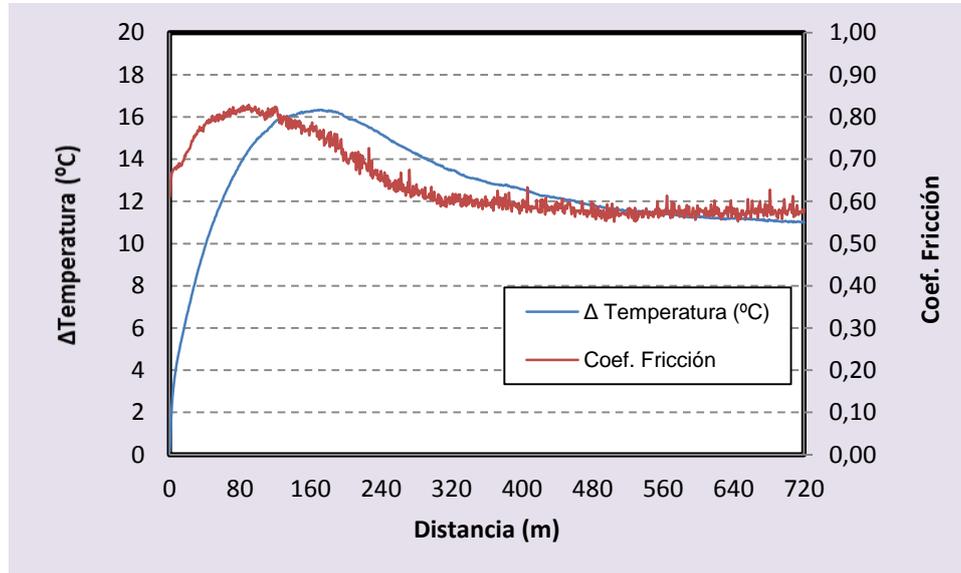


Figura 100. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L96FL4_1175.

En esta gráfica el comportamiento de la pieza es muy similar al que se obtuvo con la muestra L97FL3_1175. En un primer momento el ensayo se encuentra en régimen abrasivo, reflejado en la gráfica a través del aumento repentino del coeficiente de fricción. La caída progresiva tanto del coeficiente de fricción como de la temperatura indica, como en los casos anteriores, el depósito de metal que se acumula en la pista de desgaste y que provoca una rápida disipación del calor que se genera. Además de evidenciar el comportamiento abrasivo-adhesivo que se produce hasta finalizado el ensayo. El máximo de la curva del coeficiente de fricción se sitúa a 0,83, mientras que el máximo valor de la temperatura es ligeramente superior a los 16°C.

MUESTRA L95FL5_1175

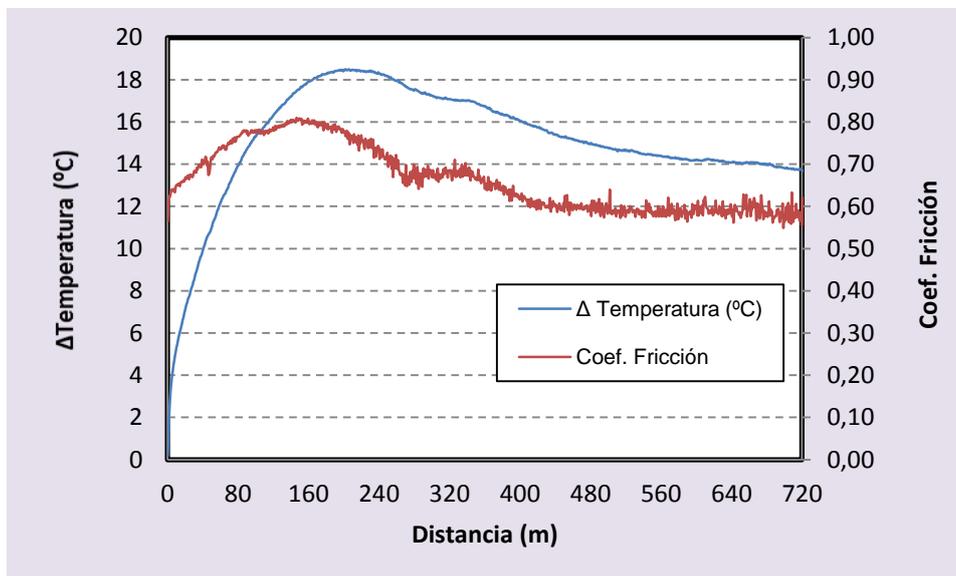


Figura 101. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L95FL5_1175.

El primer tramo de la Figura 101, corresponde con un comportamiento totalmente abrasivo y por ello se aprecia un ascenso repentino del coeficiente de fricción. Se produce un salto a los sesenta metros, que puede ser debido a que ha saltado una capa de material de la pista de desgaste.

Además, se puede apreciar entre los doscientos cuarenta y trescientos veinte metros, un tramo horizontal, este hecho que no se había observado con anterioridad, se debe a un movimiento que ha podido sufrir la pieza durante el ensayo, por lo que la pista se ha desplazado. Es el único hecho destacable, puesto que el resto del ensayo la pieza se comporta de forma similar a probetas anteriores con un comportamiento abrasivo-adhesivo. De manera que se producen microsoldaduras que provocan las diversas oscilaciones de la curva y un descenso en la curva de la temperatura porque el calor se elimina con rapidez.

MUESTRA L94FL6_1175

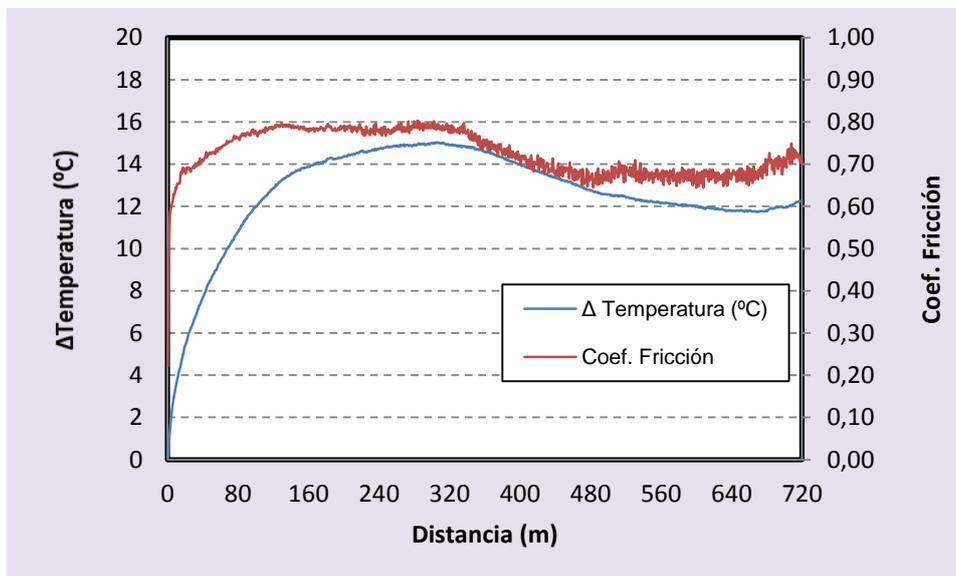


Figura 102. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L94FL6_1175.

En la Figura 102, se presentan dos curvas que corresponden a la temperatura y el coeficiente de fricción que experimenta la pieza L94FL6_1175 durante el ensayo tribológico. El comportamiento abrasivo se evidencia desde el inicio hasta los trescientos veinte metros. Seguidamente, el comportamiento pasa a ser abrasivo-adhesivo debido a la formación de microsoldaduras, que provocan numerosas fluctuaciones en la curva y un claro descenso en la temperatura, ocurriendo este fenómeno a una distancia recorrida mayor que para el resto de muestras. En el último tramo del ensayo, aproximadamente a los seiscientos ochenta metros, se observa una oxidación de la pista de desgaste que se manifiesta con un aumento tanto de la temperatura como del coeficiente de fricción. El máximo valor que alcanza la curva del coeficiente de fricción es 0,80. Sin embargo, el valor máximo de la temperatura se sitúa en 15°C.



MUESTRA L92FL8_1175

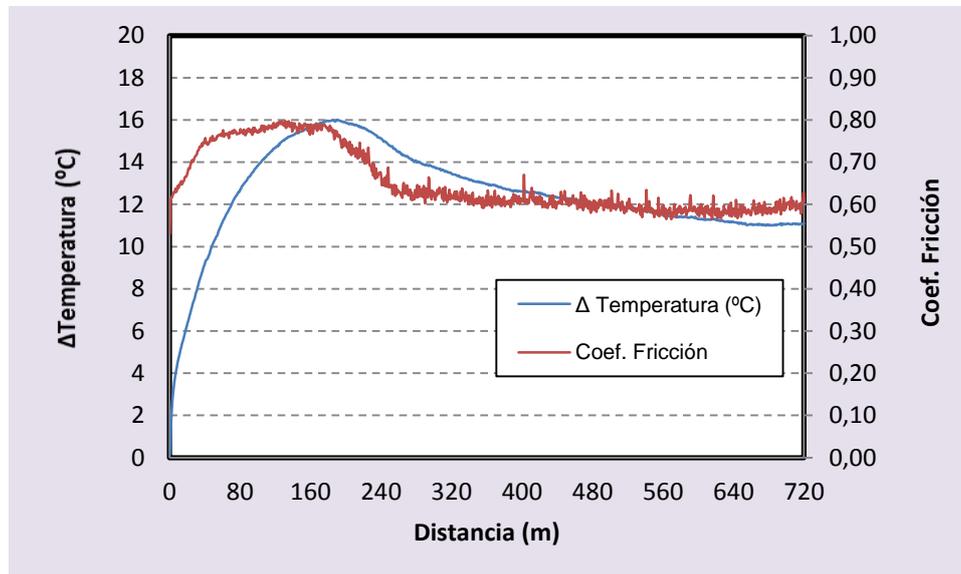


Figura 103. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L92FL8_1175.

En la Figura 103, inicialmente el ensayo muestra un régimen abrasivo. Alrededor de los doscientos metros, se deposita metal procedente del contramaterial que se acumula en la pista de desgaste y el calor que se ha producido se disipa de tal manera que desciende la temperatura.

Las distintas oscilaciones que se aprecian en la curva del coeficiente de fricción se producen porque la superficie de la pieza deja de ser plana y el contramaterial durante su recorrido se encuentra con obstáculos procedentes de las microsoldaduras que se han depositado en la pista. Una vez que aparecen éstas, el comportamiento pasa de ser abrasivo a ser abrasivo-adhesivo.



COMPARATIVA DE LOS MATERIALES A LA TEMPERATURA DE 1175°C

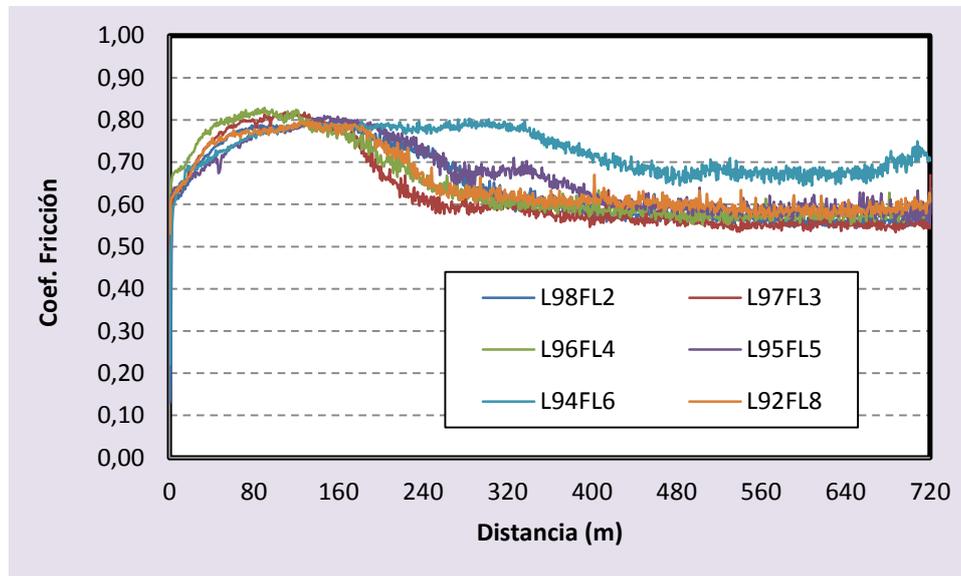


Figura 104. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura de los materiales 1175°C.

La Figura 104 presenta la evolución del coeficiente de fricción de todas las muestras de la temperatura de sinterización de 1175°C. En estos casos, el coeficiente de fricción máximo de todas las piezas se sitúa en una zona de valores entre 0,80 y 0,83. No obstante, en el instante donde la distancia recorrida corresponde a setecientos veinte metros, todos los coeficientes de fricción se encuentran entre 0,54 y 0,62, a excepción de la pieza L94FL6_1175 en la que el coeficiente de fricción alcanza el valor de 0,71.

Sin embargo, el comportamiento de todas las piezas es básicamente el mismo. Se produce un comportamiento abrasivo nada más comenzar el ensayo. Transcurridos pocos metros comienza la formación de microsoldaduras, que provocan el comportamiento abrasivo-adhesivo. Se deposita metal del contramaterial en la pista de desgaste, por lo que se produce un gran descenso en el coeficiente de fricción.

Las únicas piezas que además de sufrir el comportamiento descrito en el párrafo anterior, tienen alguna peculiaridad con respecto al resto son la muestra L94FL6_1175 y L95FL5_1175. La primera comienza con un comportamiento abrasivo-adhesivo a una distancia recorrida mayor que para el resto de materiales. Además, se observa un aumento del coeficiente de fricción metros antes de finalizar el ensayo, lo que indica que se ha producido



una oxidación de la pista de desgaste. Mientras que en la pieza L95FL5_1175 se observa una fluctuación a pocos metros del comienzo del ensayo que indica que se ha arrancado una capa de material y un tramo horizontal que indica que la pista se ha duplicado por un movimiento de la pieza. Aunque este último hecho, se podría haber producido en cualquiera de ellas.

En la Figura 105, se muestran los resultados que se han obtenido al calcular los coeficientes de desgaste para el material y el contramaterial.

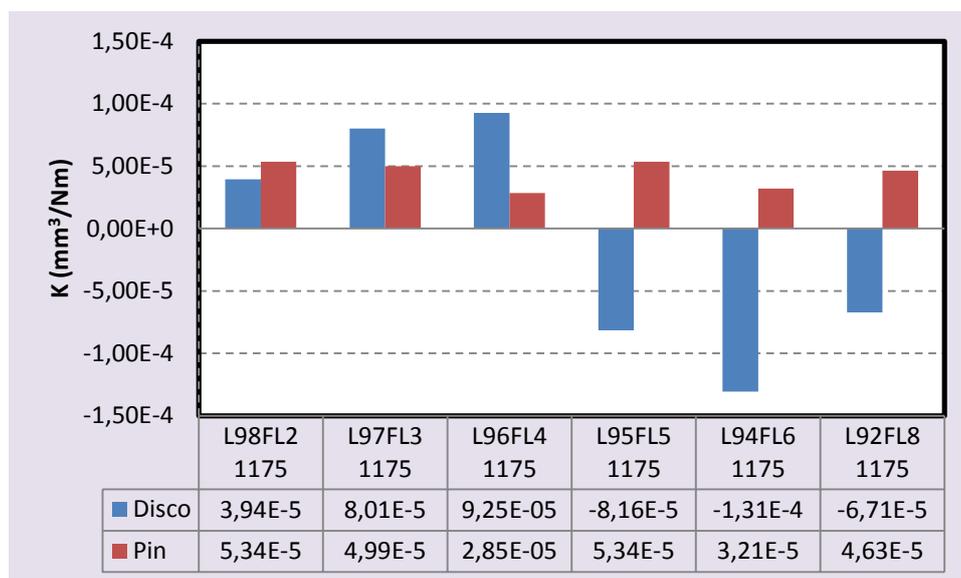


Figura 105. Coeficientes de desgaste del pin y de los materiales a 1175°C.

Para la serie de piezas de menor contenido de escoria de soldadura, el coeficiente de desgaste es positivo con unos valores que se sitúan en torno a 10^{-5} , por lo que estaríamos en un desgaste medio, ya que los valores típicos del coeficiente de desgaste para las cerámicas estructurales con desgaste suave son del orden de 10^{-6} , mientras que los valores para desgaste severo serían de 10^{-3} [93]. Sin embargo, la gama de mayor contenido de fundente presenta unos coeficientes de desgaste negativos que indican la adhesión de partículas metálicas procedentes del pin en los materiales ensayados, explicándose este fenómeno por la diferencia tan notoria de densidades entre el material y el contramaterial. Del mismo modo que los coeficientes de desgaste del pin son en todos los casos positivos.



MUESTRA L98FL2_1200

A las muestras sinterizadas a 1200°C, además de realizarse el ensayo tribológico, se observaron mediante microscopía óptica con el objeto de analizar sus pistas de desgaste. Se decidió realizar la microscopía de esta temperatura ya que es en la que mejor se aprecian los efectos. Sin embargo, las conclusiones que se expondrán guardan similitud con el resto de piezas a las que se les realizó el ensayo tribológico.

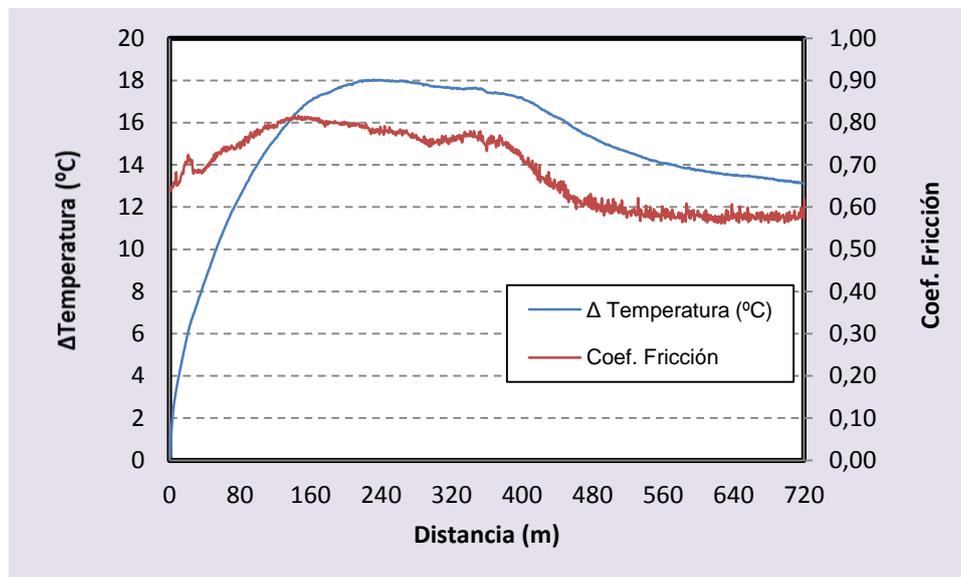


Figura 106. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L98FL2_1200.

La Figura 106 muestra los resultados del ensayo tribológico de la probeta L98FL2_1200 mediante una gráfica, donde una de las curvas representa la variación del coeficiente de fricción y la otra, de la temperatura. Al comenzar el ensayo, se puede apreciar un gran aumento del coeficiente de desgaste que denota su comportamiento abrasivo.

Transcurridos sólo varios metros, se observa un salto en la gráfica debido a que se ha arrancado una capa de material procedente de la pista de desgaste. A partir de los doscientos metros, la pieza se desplaza y por tanto se crea una nueva pista de desgaste. Una vez que llega a los trescientos sesenta metros recorridos, el comportamiento pasa a ser abrasivo-adhesivo creándose microsoldaduras y una capa de material metálico que disipa el calor, razón por la que la temperatura desciende.



El mayor valor alcanzado por el coeficiente de fricción en esta pieza es de 0,82. Y en cuanto la temperatura, se incrementa hasta llegar a los 18°C.

A continuación, se realiza un análisis de la pista de desgaste del material L98FL2_1200. En la Figura 107, se muestra la imagen macroscópica de dicha pista, que tiene un tono rojizo debido a la oxidación que ha sufrido el metal depositado, como consecuencia del tiempo que ha transcurrido entre la realización del ensayo tribológico y la observación de la pieza al microscopio. Es importante reseñar que la pista de desgaste es bastante homogénea y regular. Igualmente, su grosor no produce variaciones.



Figura 107. Pieza L98FL2_1200 con su pista de desgaste.

La Figura 108, presenta un barrido de la pieza L98FL2_1200 realizado mediante microscopía óptica a 10x aumentos. La pieza tiene mayor porosidad si hacemos una comparativa con el resto de composiciones de igual temperatura, aunque se trata de una porosidad angular. Además, la deposición metálica está presente en la pista de desgaste, existiendo zonas importantes de depósitos metálicos que hacen que disminuya la temperatura en la zona de contacto (aunque menos que en otros casos).

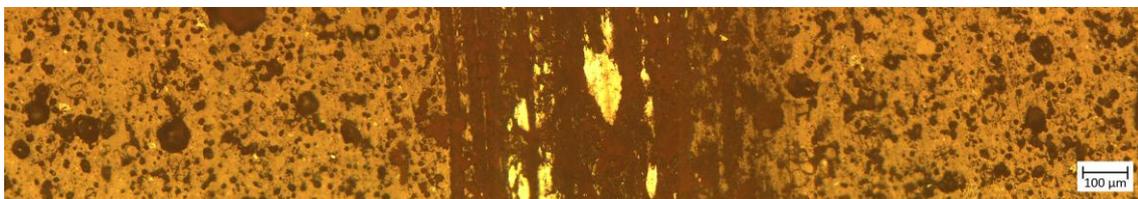


Figura 108. Barrido microscópico de la pista de desgaste L98FL2_1200.

Como se puede observar la microestructura que presenta la muestra a 1175°C (Figura 109) es bastante similar a la que se consigue con 1200°C. Aunque si se observa detenidamente



la porosidad de ambas, se aprecia que es ligeramente mayor para el material sinterizado a menor temperatura.

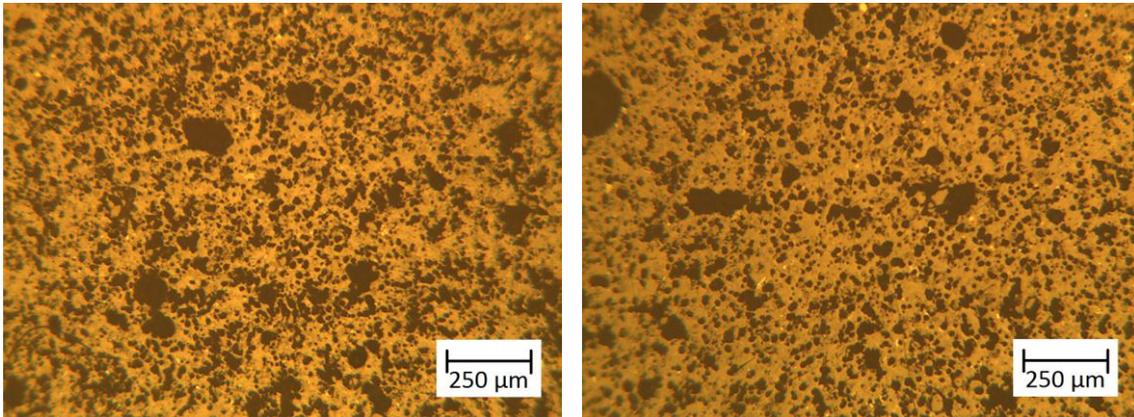


Figura 109. Detalle del material L98FL2_1175 (izq.); Detalle del material L98FL2_1200 (dcha.)

Si se realiza una comparativa macroscópica entre las pistas de desgaste de ambas piezas, L98FL2_1200 (Figura 107) y L98FL2_1175 (Figura 110), se deduce que ambas pistas guardan similitudes, aunque hay que destacar que la pista de desgaste de la pieza L98FL2_1175 tiene un menor espesor. No obstante, este hecho es fácilmente explicable. En la gráfica correspondiente a la muestra L98FL2_1200 se explicó previamente que existía una zona en la que la pieza se había movido ligeramente. Sin embargo, la otra pieza no sufrió ningún tipo de movimiento durante el ensayo. Por lo tanto, este es el motivo del menor espesor que caracteriza a la pieza L98FL2_1175.



Figura 110. Pieza L98FL2_1175.

En la Figura 111, se puede observar las características de la pista de desgaste del material L98FL2_1175. Se tomó la imagen de una zona de la pista en la que hay metal depositado, donde las zonas más oscuras corresponden al metal oxidado.

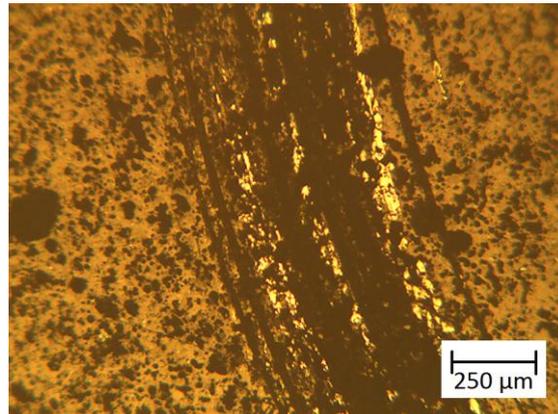


Figura 111. Microscopia de la pista de desgaste del material L98FL2_1175.

MUESTRA L97FL3_1200

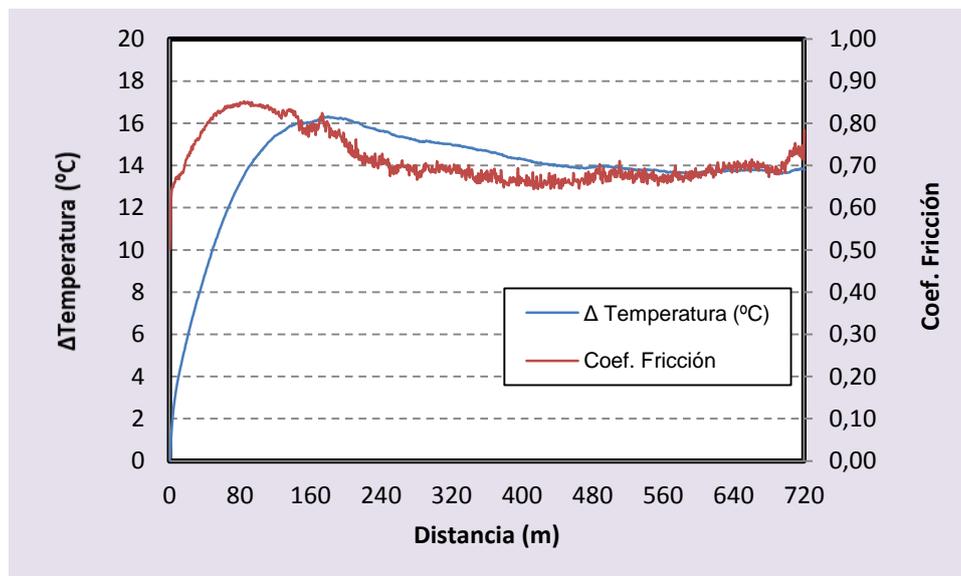


Figura 112. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L97FL3_1200.

En esta gráfica, análogamente a lo que sucedía con la pieza anterior, en los ciento sesenta metros se observa un pico de caída en la curva del coeficiente de fricción debido a que se ha desprendido material procedente de la pista de desgaste. Desde el principio el comportamiento es claramente abrasivo, hasta que se forman microsoldaduras en la pista generada y pasa a tener un comportamiento abrasivo-adhesivo.

Pocos metros antes de finalizar el ensayo se observa un aumento tanto de la temperatura como del coeficiente de fricción, como sucedía con la pieza L94FL6_1175. Este



hecho se atribuye a que se ha producido una oxidación de la pista de desgaste. Como se puede apreciar en este caso, la máxima temperatura que se adquiere en el ensayo corresponde a un valor de alrededor de 16°C y el coeficiente de fricción máximo es de 0,85.

Mediante el análisis macroscópico de la pista de desgaste del material L97FL3_1200, se observa que tiene un tono rojizo debido a la oxidación que ha sufrido el metal depositado. Al examinar la pista de desgaste microscópicamente, se observa una gran cantidad de material desgastado oxidado, que ha rellenado los poros superficiales del material adquiriendo esa tonalidad marrón-rojiza (Figura 113 dcha.).

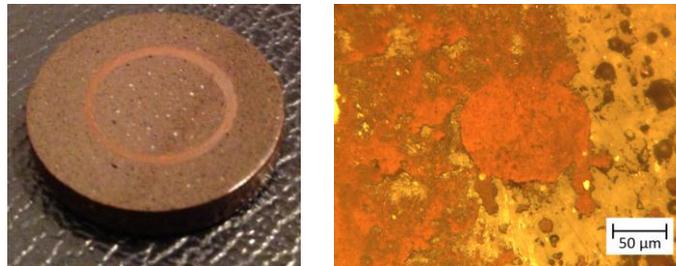


Figura 113. Pieza L97FL3_1200 (izq.); Microscopia del material L97FL3_1200 en una zona próxima a la pista de desgaste (dcha.).

La Figura 114 muestra el aspecto que posee la pista de desgaste del material L97FL3_1200. Hay excesiva deposición metálica oxidada en la pista. En cuanto a la porosidad, es más redondeada que la anterior. Este hecho se presenta claramente en el caso del poro rellenado por restos metálicos oxidados (Figura 113 dcha.).

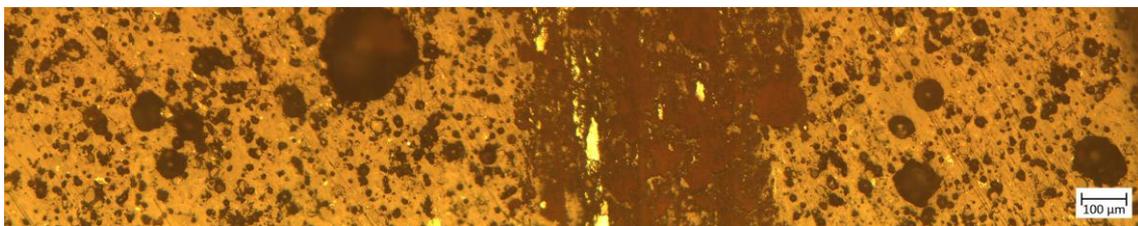


Figura 114. Barrido microscópico de la pista de desgaste L97FL3_1200.

MUESTRA L96FL4_1200

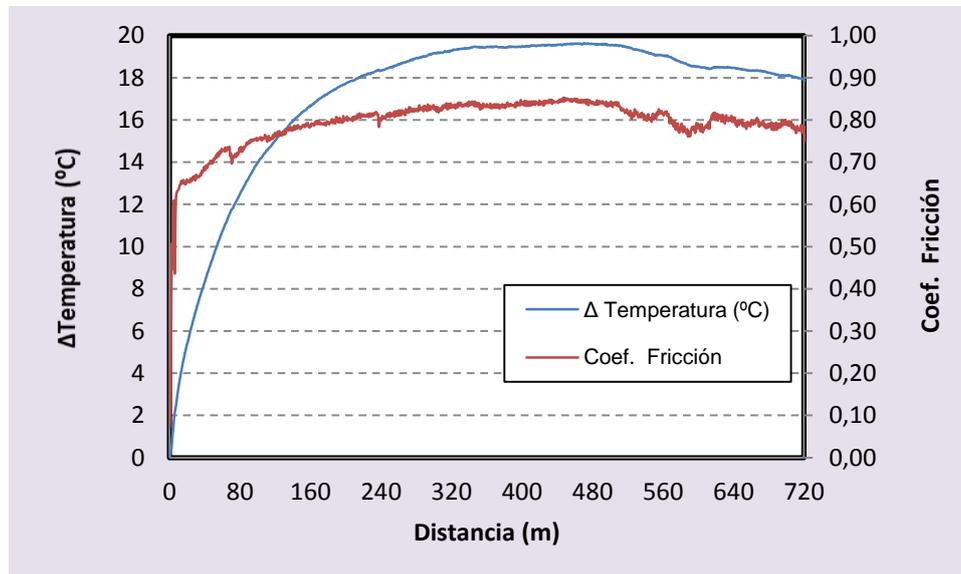


Figura 115. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L96FL4_1200.

En la Figura 115, se observa el comportamiento de la curva de fricción y de temperatura de la muestra L96FL4_1200. El máximo coeficiente de fricción fue 0,85. Sin embargo, la máxima temperatura presentó un valor cercano a los 20°C.

Desde el inicio la pieza muestra un comportamiento abrasivo con un ascenso repentino de la curva del coeficiente de fricción. Alrededor de los ochenta metros, se produce una oscilación que se observa claramente en la curva y se repite de nuevo a los doscientos sesenta metros. Simplemente se ha producido el levantamiento de una de las capas de material provocando un descenso brusco del coeficiente de fricción.

A partir de los quinientos veinte metros aproximadamente, se forman microsoldaduras en la pista y el comportamiento cambia a abrasivo-adhesivo. En ese mismo punto, la pieza se desajusta por el movimiento y la pista de desgaste se desplaza dejando una pista ligeramente desdoblada. Este hecho se puede apreciar en la Figura 116, donde se observa la pieza macroscópicamente.



Figura 116. Pieza L96FL4_1200.

La Figura 117, muestra un barrido microscópico de la pista de desgaste del material L96FL4_1200. Al igual que el resto de piezas analizadas microscópicamente presenta gran cantidad de material metálico depositado que se ha oxidado. Los poros existentes se han rellenado de material desgastado que se ha oxidado y por lo tanto, no ha tenido lugar una disipación de calor excesiva, como se observa en la gráfica de fricción (Figura 115).

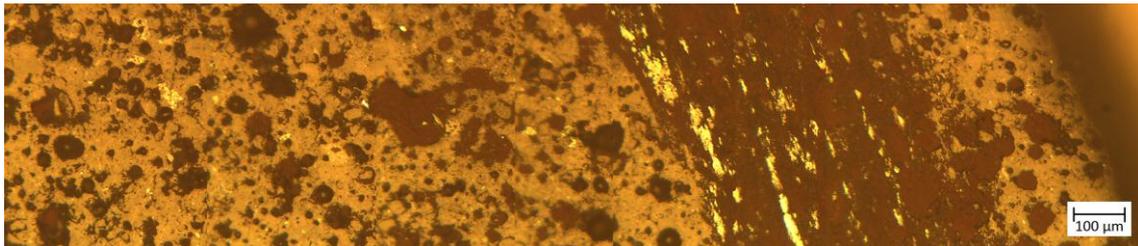


Figura 117. Barrido microscópico de la pista de desgaste L96FL4_1200.

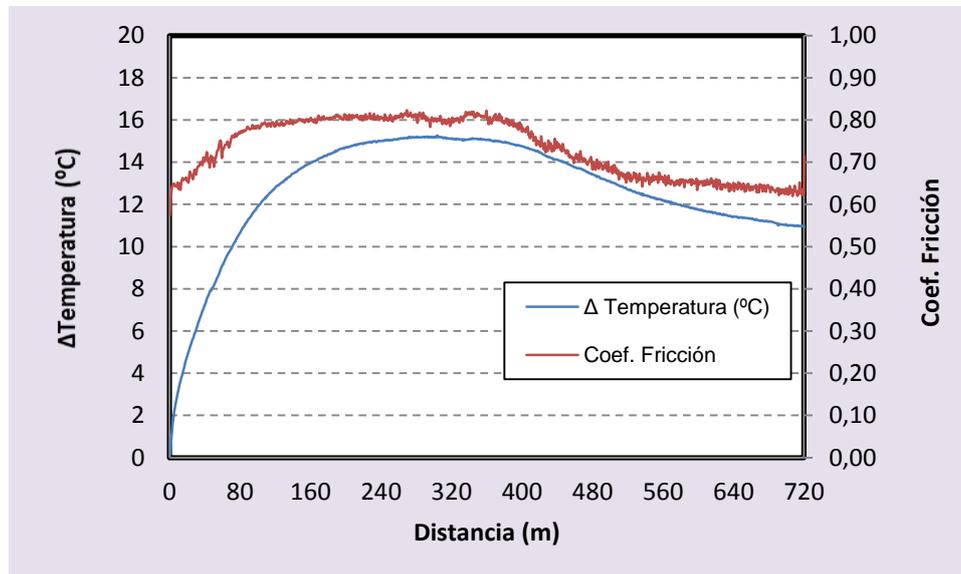
MUESTRA L95FL5_1200

Figura 118. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L95FL5_1200.

El ensayo comienza con un comportamiento abrasivo (Figura 118). A partir de los trescientos sesenta metros se forman microsoldaduras, que desencadenan un comportamiento abrasivo-adhesivo. Además, se ha creado una capa de metal en la pista de desgaste, por lo que tiene lugar un descenso en el coeficiente de fricción al producirse el desgaste del metal. Así, el calor se disipa rápidamente, lo que conlleva a que la curva de temperatura también produzca un descenso.

El coeficiente de fricción más elevado que se ha detectado en este ensayo ha sido de 0,82. Mientras que la máxima temperatura se ha situado en un valor próximo a los 15°C.

El análisis macroscópico de la pieza muestra que el ensayo tribológico ha dejado una pista bastante homogénea y regular. A pesar de que las pistas han estado aisladas del exterior antes de realizar la microscopía óptica es posible que parcialmente se haya oxidado parte del material metálico que se depositó durante el ensayo. Este es el motivo de que la pista haya adquirido una tonalidad rojiza.



Figura 119. Pieza L95FL5_1200.

Lo mencionado en el párrafo anterior coincide con lo que se observa también a nivel microscópico. Existe gran cantidad de deposición metálica, que es la causante del descenso tanto en el coeficiente de fricción como en la temperatura (Figura 118). Sin embargo, esta deposición metálica se ha oxidado como se observa en el barrido microscópico de la Figura 120. También se puede ver como la porosidad cada vez es más redondeada según se va aumentando la cantidad de fundente del material.



Figura 120. Barrido microscópico de la pista de desgaste L95FL5_1200.

MUESTRA L94FL6_1200

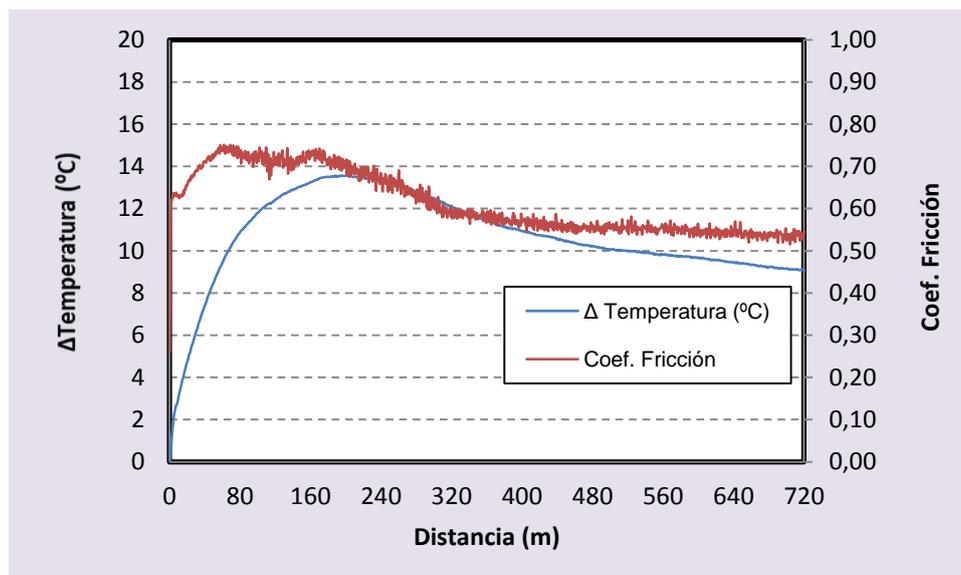


Figura 121. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L94FL6_1200.



En la Figura 121, se observa al principio una gran fluctuación que puede ser la causa de la eliminación de material que permanece en la pista de desgaste y poco a poco se va desgastando y por ello, convirtiéndose en polvo. Coincidiendo con el máximo de la temperatura sobre los ciento sesenta metros, se producen microsoldaduras. Aunque inicialmente el comportamiento era abrasivo pasa a convertirse en abrasivo-adhesivo. Y debido al metal depositado en la pista, se disipa rápidamente el calor tomando la curva una tendencia descendente.

En esta ocasión, el mayor valor del coeficiente de fricción y de la temperatura corresponden a 0,75 y 13,6°C respectivamente.

En el análisis de la pista de desgaste, se observa a simple vista una gran diferencia en el color con respecto al resto de pistas estudiadas previamente. En este caso la pista de desgaste de la Figura 122 (izq.), presenta un tono gris-marrón, que indica que se ha producido deposición de material metálico mezclado con el material de la pieza, sin que apenas se haya producido la oxidación del metal. La pista de desgaste carece de homogeneidad y su grosor es variable. En la Figura 122 (dcha.), se puede apreciar lo que sucede durante el mecanismo abrasivo-adhesivo, donde el metal depositado recientemente empieza a agrietarse y deformarse debido al paso del pin sobre él.

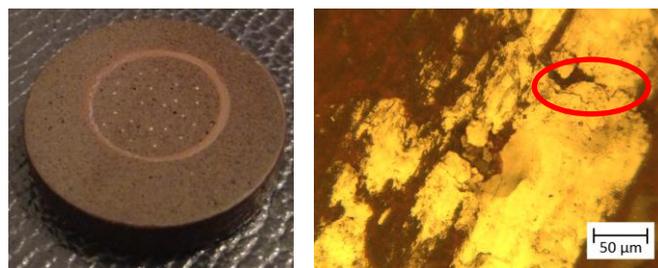


Figura 122. Pieza L94FL6_1200 (izq.); Imagen de la pista desgaste del material L94FL6_1200 (dcha.).

En la Figura 123, se observa el barrido microscópico de la pieza L94FL6_1200 en las zonas próximas a la pista de desgaste. Existen gran cantidad de zonas brillantes puesto que el metal se ha oxidado sólo en la zona exterior de la pista. Además, se puede ver como los poros son bastante redondeados lo que nos indica que en esta composición la pieza está sobresinterizada.

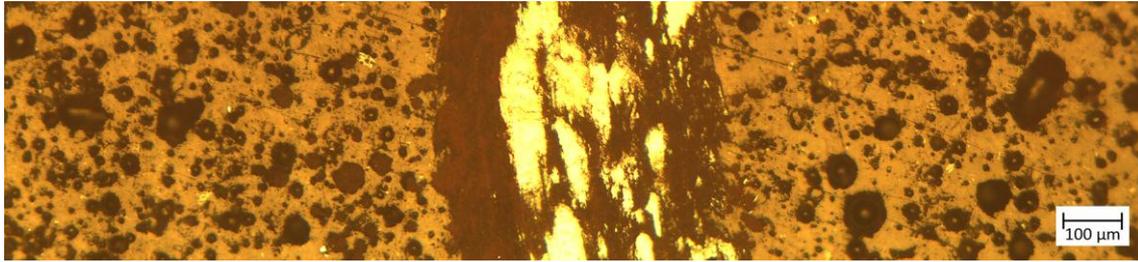


Figura 123. Barrido microscópico de la pista de desgaste L94FL6_1200.

MUESTRA L92FL8_1200

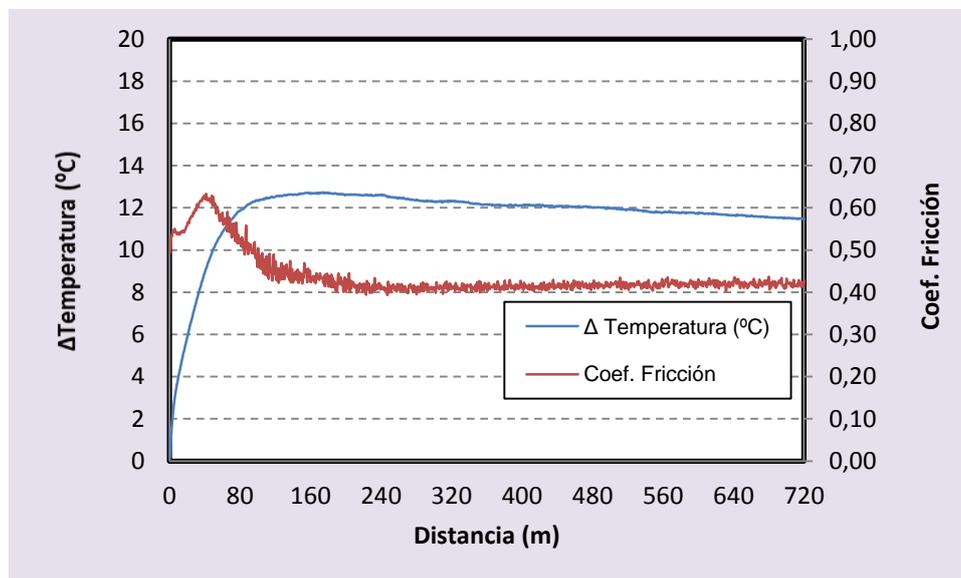


Figura 124. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura del material L92FL8_1200.

Como sucedió en la mayoría de los casos examinados con anterioridad, inicialmente el comportamiento es abrasivo. Sin embargo, rápidamente transcurridos pocos metros del inicio del ensayo, se forman microsoldaduras de manera que se deposita una capa de metal bastante grande en la pista. Debido a este espesor de la capa de metal y a la temprana formación de ésta, en comparación con el resto de los ensayos realizados, no existe suficiente tiempo como para que se consiga que la temperatura alcance valores altos. Por este motivo, el máximo valor de temperatura registrado correspondió a 12,7°C aproximadamente. Y con respecto al coeficiente de fricción, el valor obtenido fue de 0,63.

Macroscópicamente, se observa la deposición metálica existente en la pista de desgaste, al presentar un color gris-marrón debido a que no se ha oxidado el metal. Sin



embargo, la pista es bastante heterogénea y de grosor variable e irregular. Además se ve mayor cantidad de partículas de hierro que en el resto de las muestras, es un hecho lógico, puesto que es la pieza que contiene mayor cantidad de fundente y como consecuencia mayor probabilidad de que hayan quedado restos de partículas férricas.

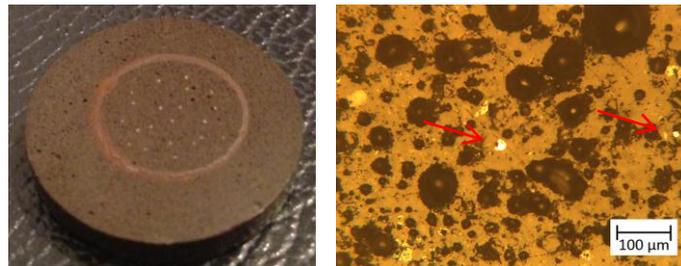


Figura 125. Pieza L92FL8_1200 (izq.); Detalle de la pieza L92FL8_1200 con presencia de partículas férricas (dcha.).

La Figura 126, muestra la pista de desgaste de la pieza L92FL8_1200. Se distinguen poros muy redondeados lo que nos indica que en esta composición la pieza se encuentra sobresinterizada. En cuanto a la pista de desgaste, se aprecia un gran depósito de material metálico brillante. Como se predijo a la vista de su gráfica del ensayo tribológico, se forma una capa de metal de gran espesor en la pista.

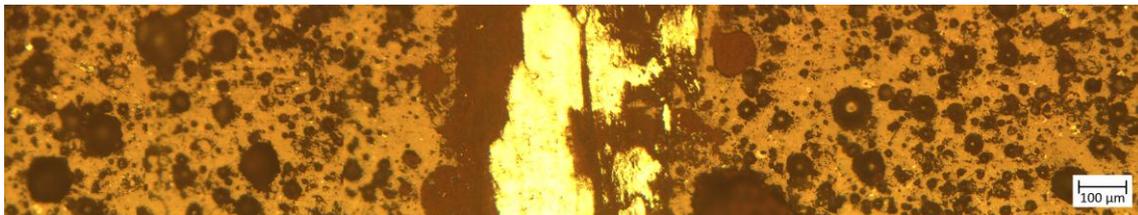


Figura 126. Barrido microscópico de la pista de desgaste L92FL8_1200.

Seguidamente, en la Figura 127, se muestran las curvas del coeficiente de fricción para la probeta L92FL8_1200 durante un ensayo de una hora a una velocidad lineal de 0,2 m/s y dos horas de duración a 0,1 m/s.

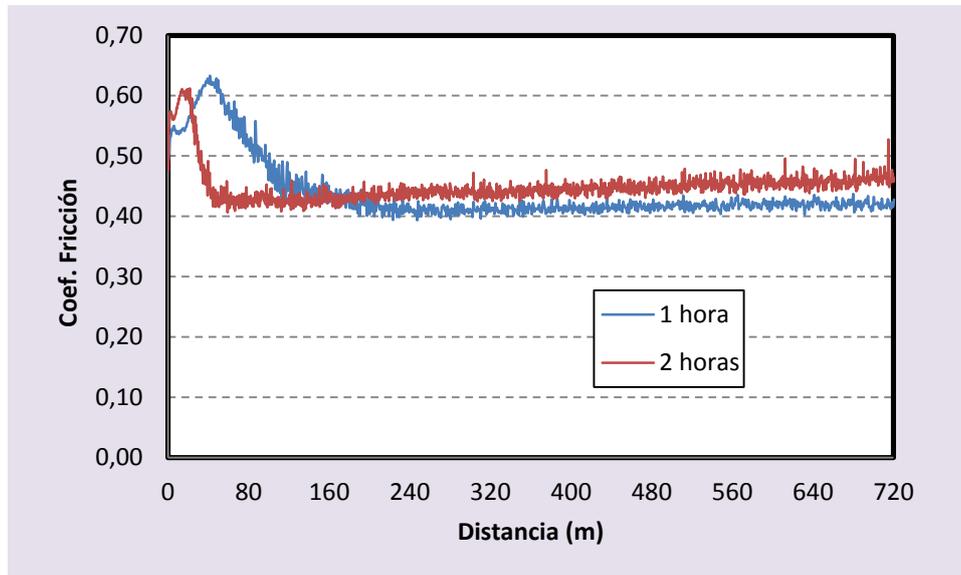


Figura 127. Variación del coeficiente de fricción L92FL8_1200.

Como se puede comprobar, los resultados obtenidos son similares y las curvas siguen la misma tendencia. El radio de la pista y el tiempo de ensayo tienen poca influencia puesto que el comportamiento del material es semejante. Por lo tanto, se decidió realizar el ensayo tribológico de una hora de duración, puesto que se consideró que era tiempo suficiente para determinar los resultados procedentes del desgaste.

COMPARATIVA DE LOS MATERIALES A LA TEMPERATURA DE 1200°C

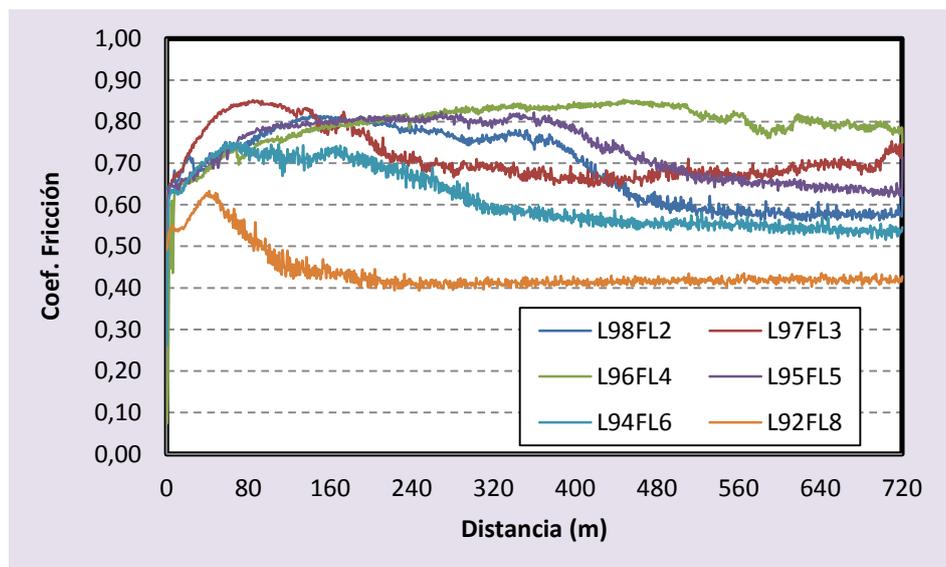


Figura 128. Variación del coeficiente de fricción y de la temperatura de los materiales a 1200°C.



La Figura 128, muestra la evolución del coeficiente de fricción de todos los materiales de la temperatura de sinterización de 1200°C. El coeficiente de fricción máximo de las piezas se encuentra entre los valores entre 0,85 y 0,63.

En lo referente a los valores del coeficiente de fricción recorridos setecientos veinte metros desde el inicio del ensayo, se encuentran entre 0,55 y 0,79. Con la excepción de la muestra L92FL8_1200 que adquiere un valor del coeficiente de fricción de 0,43 que lo convierte en el más bajo de todas las muestras y temperaturas estudiadas.

En todas las piezas los ensayos comienzan con un comportamiento abrasivo. A continuación se forman microsoldaduras, que desencadenan un comportamiento abrasivo-adhesivo. La capa de metal que se crea en la pista desgaste, da lugar a un descenso en el coeficiente de fricción mientras se produce el desgaste del metal.

Las piezas L98FL2_1200, L97FL3_1200 y L96FL4_1200, que se consideran la gama baja de composición de fundente, presentan valores mayores del coeficiente de fricción que la serie de elevado contenido en escoria de soldadura, en los últimos metros del ensayo. Este fenómeno ya observó en los materiales ensayados a 1150°C.

A continuación, en la Figura 129 se muestran los coeficientes de desgaste del material y el pin, calculados tras la realización de los ensayos tribológicos.

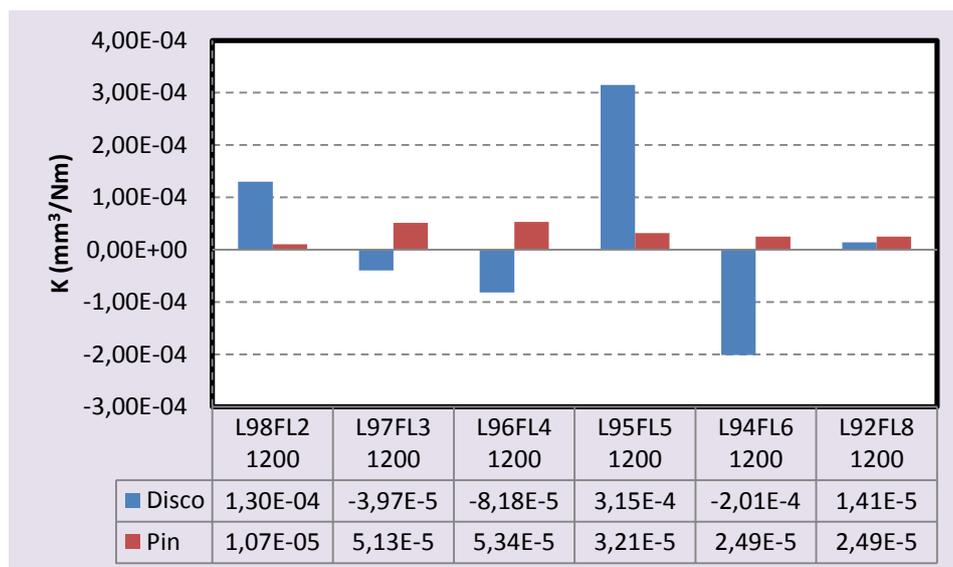


Figura 129. Coeficientes de desgaste del pin y de los materiales a 1200°C.



Se puede observar que en las piezas L97FL3_1200, L96FL4_1200 y L94FL6_1200 se produce adhesión del metal depositado por el pin, originándose en esta última una mayor deposición con respecto al resto. Mientras que para la pieza L95FL5_1200 sucede un desgaste prácticamente severo al situarse muy próximo al orden de 10^{-3} . Por otro lado el material L98FL2_1200 presenta un desgaste medio. Y por último, para la muestra L92FL8_1200 el desgaste se puede considerar suave al encontrarse muy cercano al orden de 10^{-6} .

Respecto al desgaste del pin, al igual que en todos los casos, nos encontramos con valores del coeficiente de desgaste positivos alrededor de 10^{-5} .

COMPARATIVA DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN MEDIOS

A modo resumen de todos los ensayos tribológicos realizados, se presentan en la Figura 130, los coeficientes de fricción medios para cada material.

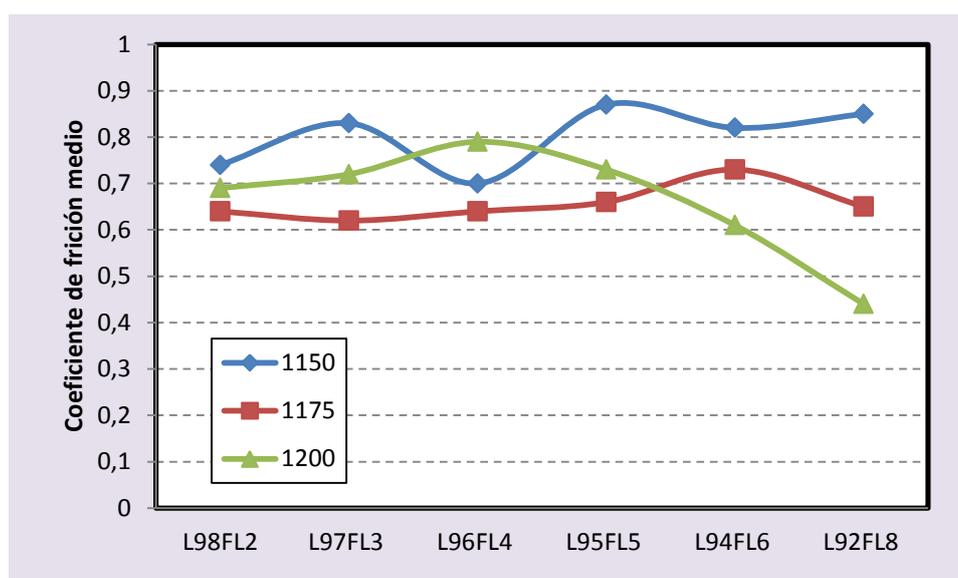


Figura 130. Variación de los coeficientes de fricción medios.

Se puede observar que los materiales sinterizados a 1150°C, en general, son los que presentan los coeficientes de fricción medios más elevados. En el material L95FL5_1150, se ha alcanzado el máximo valor del coeficiente de fricción medio de todos los materiales y temperaturas ensayados.



Cuando comienzan a observarse indicios de sobresinterización, fenómeno que ocurre en los materiales de mayor temperatura y mayor contenido en fundente (L95FL5_1200, L94FL6_1200, L92FL8_1200), los coeficientes de fricción medios tienden a disminuir con respecto al resto.

Se deduce que para cada temperatura, cuando aumenta el contenido de fundente se consiguen materiales con un coeficiente de fricción medio cada vez más elevado, exceptuando la temperatura de 1200°C debido a la sobresinterización que ya se ha mencionado.

20. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

Si en el caso del comportamiento tribológico dos de los factores que más influyen son la dureza y la densidad; en el caso de la absorción acústica uno de los factores más importantes es la porosidad, y no tanto la porosidad aislada o redondeada sino la porosidad más irregular y con carácter interconectado.

Debido a lo anterior se eligieron para este ensayo las muestras que una vez sinterizadas se observó que presentaban una contracción menor que el resto de piezas, que poseían más porosidad al estar menos sinterizadas, pero cuya consistencia era suficientemente adecuada, es decir, no desprendían polvo. Por ello, se decidió someter a ensayo acústico toda la serie de piezas que correspondían a las temperaturas de 1050°C y 1100°C.

Para cada una de las piezas se realizaron tres ensayos acústicos. Los resultados que a continuación se presentan mediante gráficas, corresponden a la media de los tres ensayos.



MUESTRA L98FL2_1050

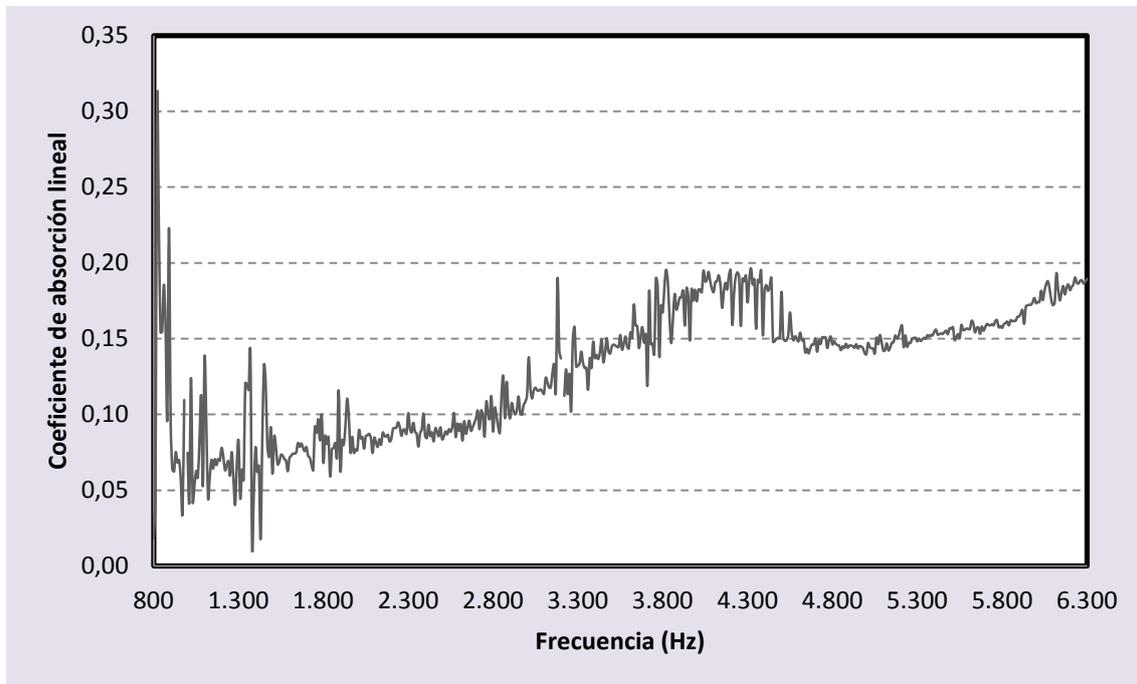


Figura 131. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L98FL2_1050.

En la Figura 131, se puede observar que en las frecuencias de menor valor, el coeficiente de absorción lineal sufre grandes variaciones. Esto se debe a que el tubo de impedancia está tratando de estabilizarse. Por este motivo, se ha considerado despreciar los valores anteriores a la frecuencia de 1800 Hz aproximadamente.

La gráfica representativa de esta muestra posee dos máximos. El primero se sitúa alrededor de la frecuencia de 4200 Hz y alcanza un coeficiente de absorción lineal de 0,20. Mientras que el otro máximo, se encuentra en la frecuencia de 6300 Hz aunque adquiere el mismo valor de absorción lineal que el anterior.



MUESTRA L97FL3_1050

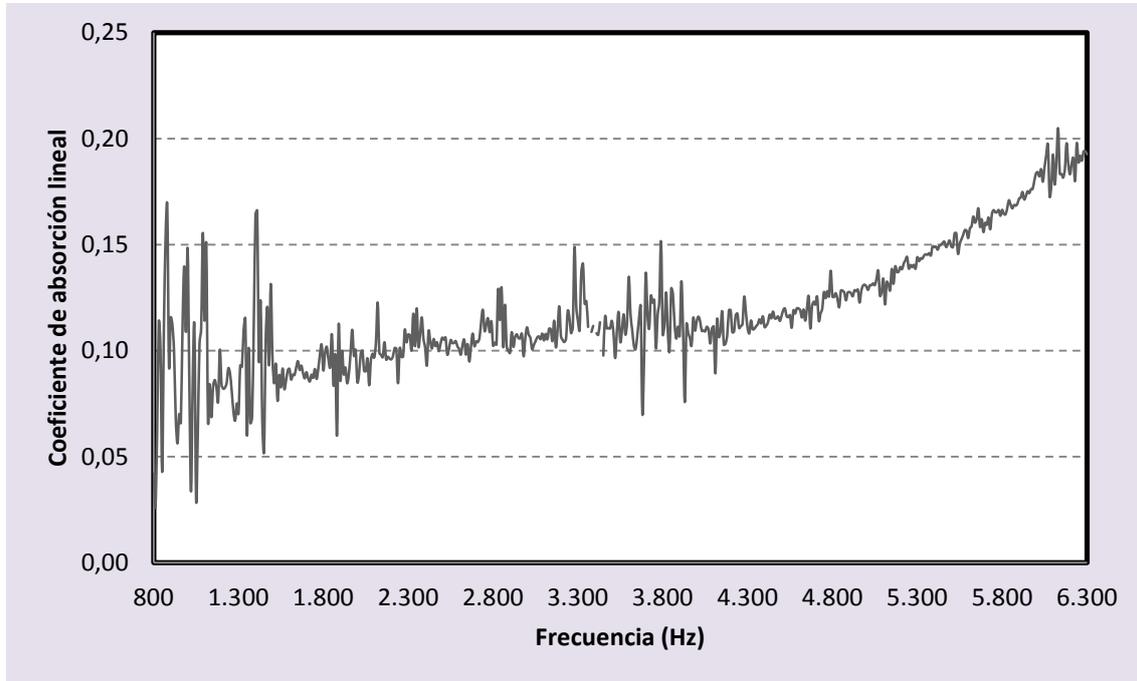


Figura 132. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L97FL3_1050.

En la Figura 132, se aprecia el coeficiente de absorción lineal para cada una de las frecuencias. En este caso, la pieza opta por un comportamiento similar al anterior en lo referente a los valores que adquiere. Este hecho se atribuye a que el cambio de composición en comparación, es tan sólo del 1% de escoria de soldadura. Es por ello, que el comportamiento acústico no puede sufrir apenas variaciones. Sin embargo, la diferencia radica en que sólo presenta un máximo a 6300 Hz en torno a un valor de 0,20, resultado muy similar al de la pieza anterior.



MUESTRA L96FL4_1050

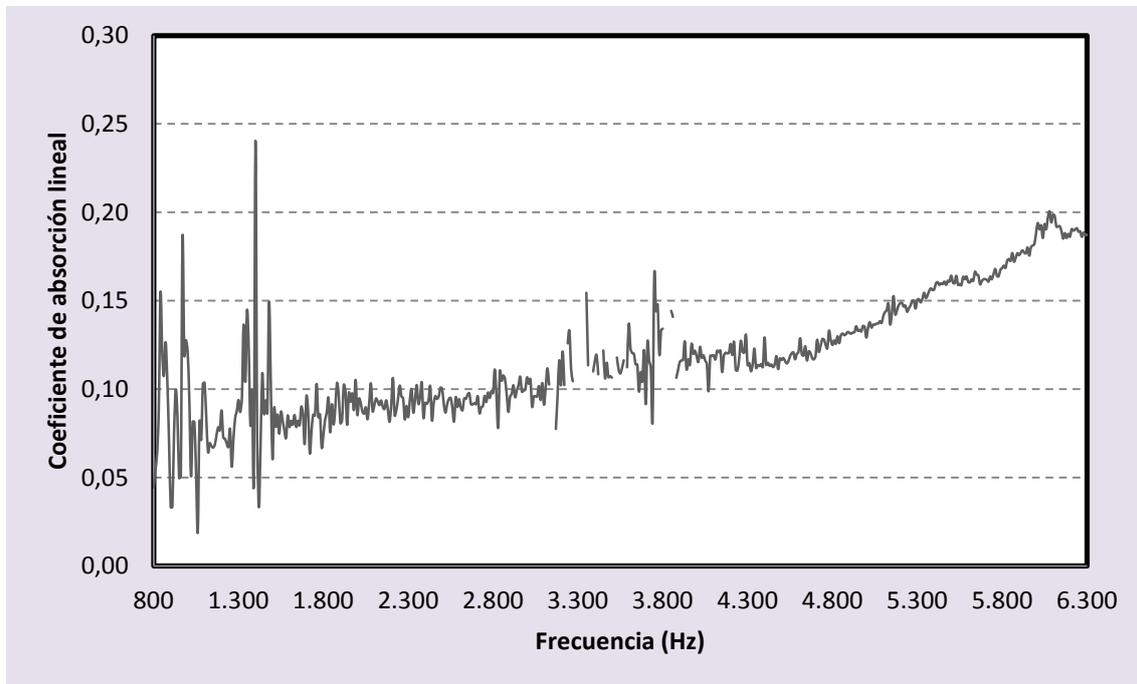


Figura 133. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L96FL4_1050.

La Figura 133 sigue la misma tendencia que la pieza anterior. En este caso, el tubo de impedancia no logró estabilizarse hasta la frecuencia de 1500 Hz aproximadamente.

Además, se puede ver claramente como existen algunas medidas que tuvieron que ser desechadas debido a que los valores comprendidos en la franja entre 3000 y 4100 Hz, no eran fiables porque eran negativos, ya que es imposible que la pieza tenga valores del coeficiente de absorción negativos. Estos valores, se deben a un error del programa, puesto que el tubo no es capaz de indicar que la reflexión ha cambiado. Por tanto, tenemos un material que aunque es poroso no muestra una gran absorción acústica.

Se aprecia un máximo en la frecuencia de 6000 Hz con un coeficiente de absorción lineal de un valor cercano a 0,20.



MUESTRA L95FL5_1050

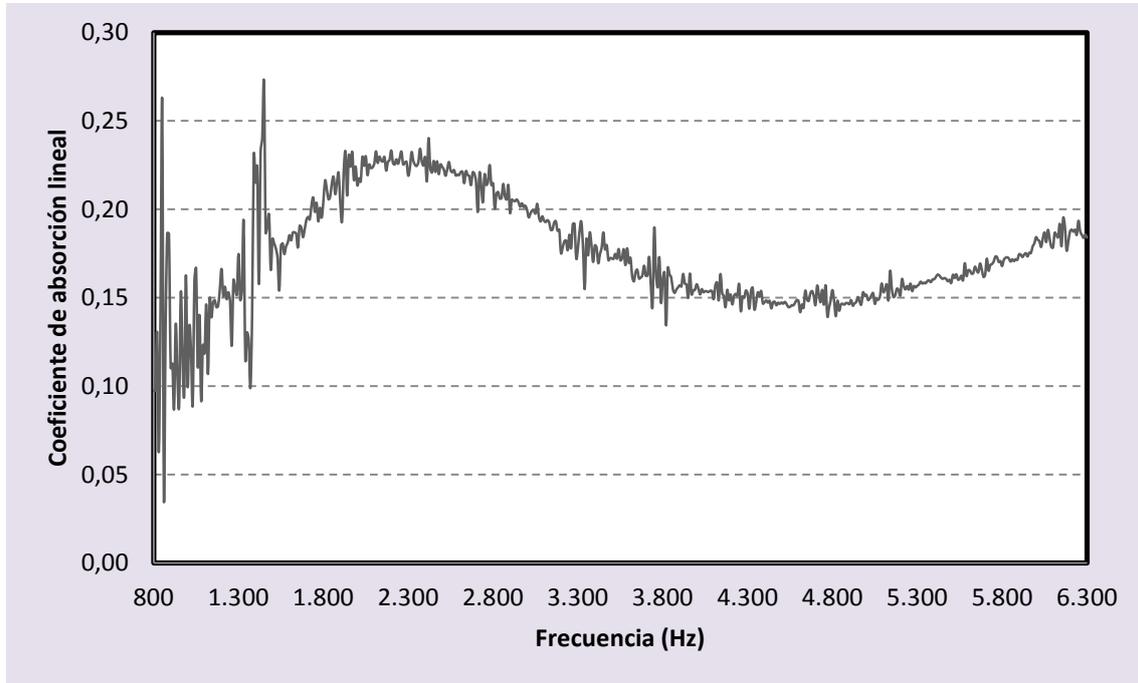


Figura 134. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L95FL5_1050.

En la Figura 134, se puede observar la variación que existe en el coeficiente de absorción lineal para cada frecuencia. En este caso, la gráfica obtenida varía del resto de piezas a pesar de que se desprecien los valores anteriores a la frecuencia de 1500 Hz. Existe una variación en el comportamiento de la muestra, porque se observa un máximo alrededor de 2300 Hz de frecuencia que alcanza un valor del coeficiente de absorción lineal de 0,23 aproximadamente. Además, en la última frecuencia que corresponde a 6300 Hz, se diferencia otro máximo hasta un valor cercano a 0,20.



MUESTRA L94FL6_1050

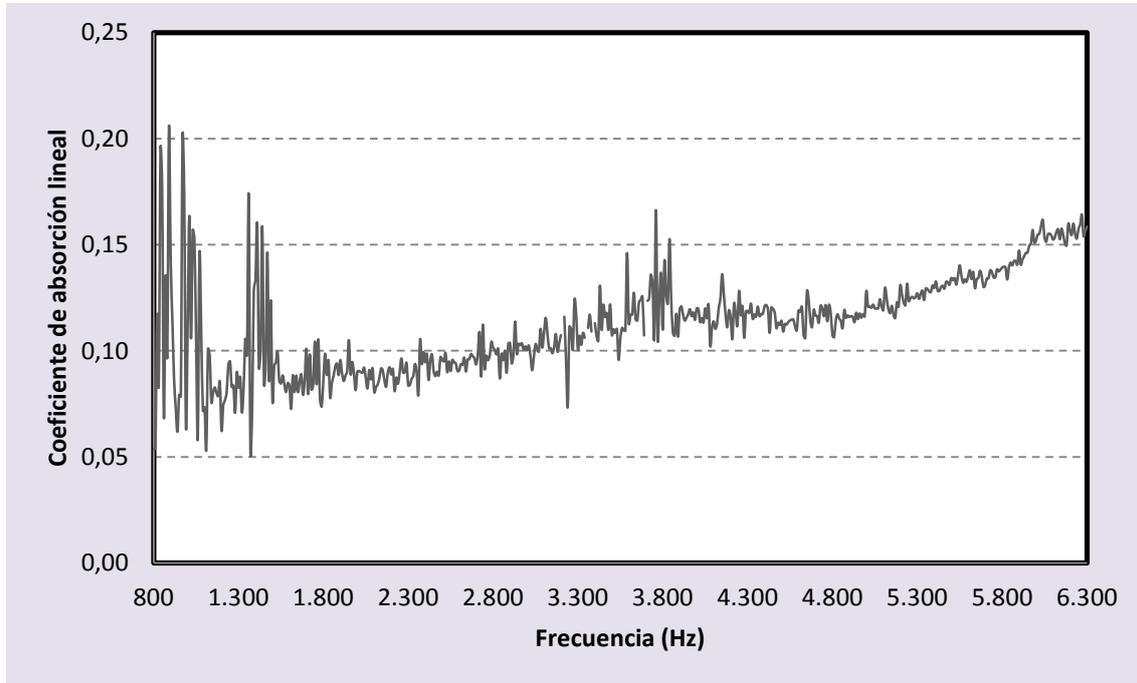


Figura 135. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L94FL6_1050.

En la Figura 135, se consideran como válidos los valores obtenidos a partir de 1800 Hz, momento desde el cual se ha estabilizado el tubo de impedancia y por lo tanto, registran unos resultados fiables.

Se observa aproximadamente el mismo coeficiente de absorción lineal entre las frecuencias de 3500 y 5000 Hz con un valor de 0,13 y un máximo a una frecuencia de 6300 Hz de alrededor de 0,16.

Si hacemos una comparativa con el resto de gráficas ya analizadas, se aprecia que los valores del coeficiente de absorción lineal son inferiores, lo que indica, como es lógico, que la pieza es menos porosa que las anteriores según aumenta el contenido de fundente. Por lo tanto, también disminuye el coeficiente de absorción lineal.



MUESTRA L92FL8_1050

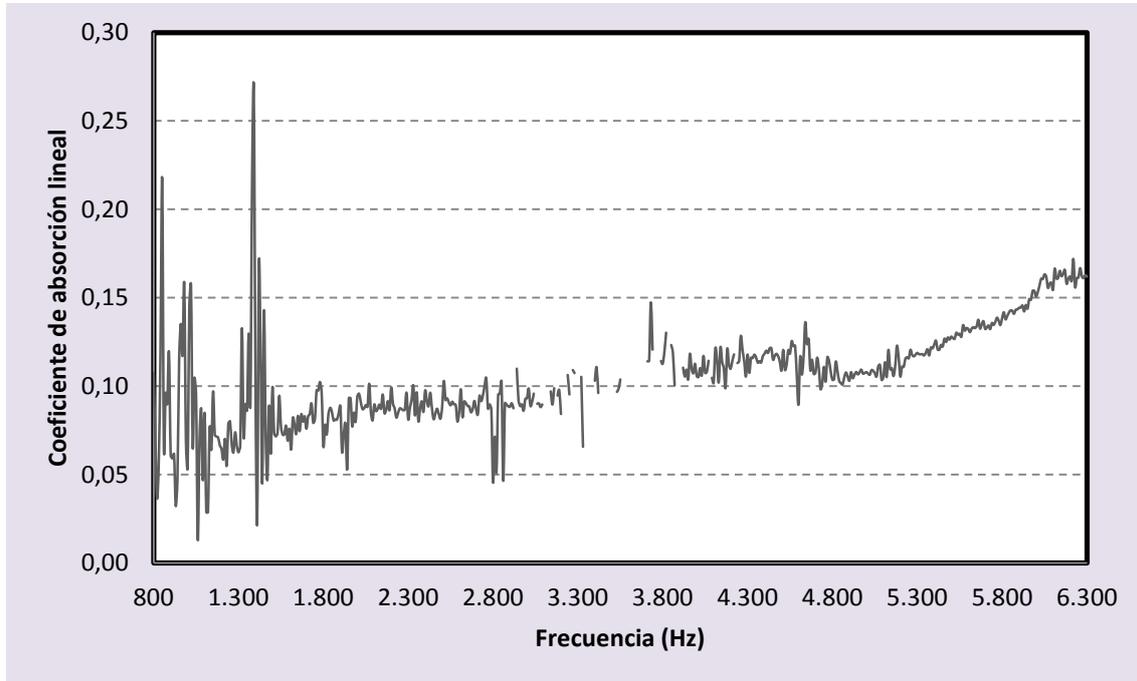


Figura 136. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L92FL8_1050.

El comportamiento que se observa en la Figura 136, es prácticamente el mismo que el de la muestra anterior. Se distingue una meseta entre 3500 Hz y 5000 Hz para a continuación terminar con un máximo de 0,16 en la frecuencia de 6300 Hz.

Es importante reseñar, de igual forma que se hizo en la pieza L96FL4_1050, que hay valores negativos que se descartaron, debido a que la probeta no puede absorber coeficientes de absorción negativos. Se debe a un error del programa, porque el propio tubo no es capaz de reflejar en la gráfica que la reflexión ha cambiado. Por ello, tenemos un material menos poroso y con escasa absorción.

Con excepción de la pieza L95FL5_1050 que se comporta de manera diferente al resto de muestras. En general, todas las piezas que tienen un mayor contenido de escoria de soldadura y por tanto son menos porosas, tienen un coeficiente de absorción más bajo.



MUESTRA L98FL2_1100

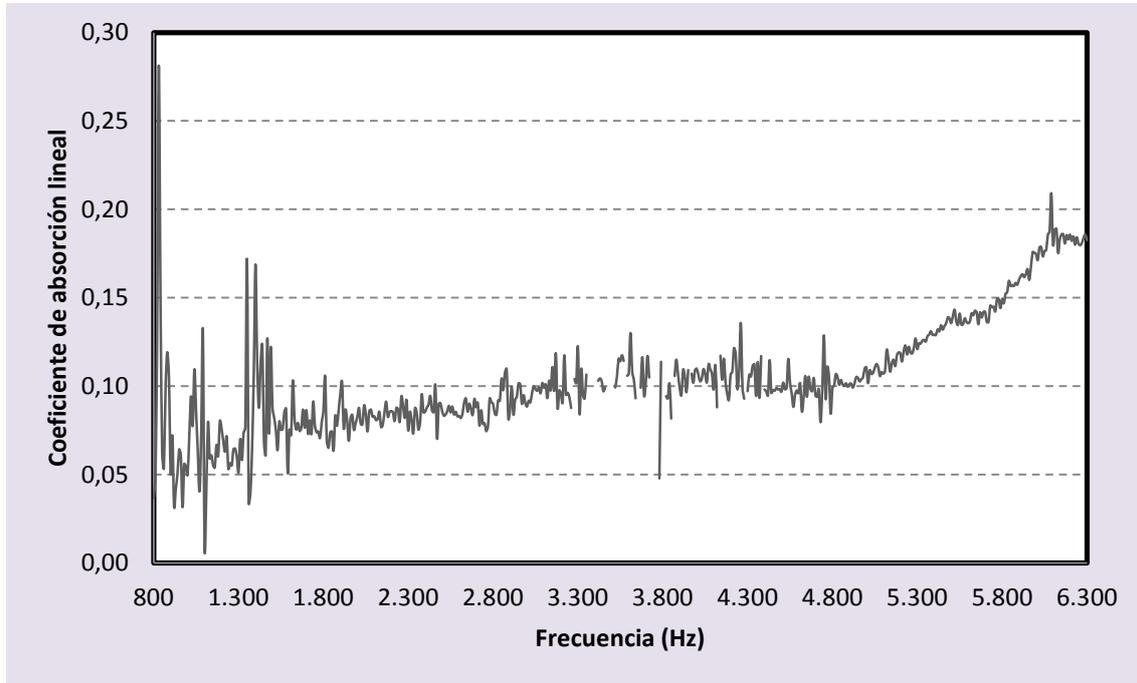


Figura 137. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L98FL2_1100.

En la Figura 137, se presenta la gráfica del coeficiente de absorción lineal según las distintas frecuencias. El ensayo se considera válido a partir de 1800 Hz donde han cesado las grandes oscilaciones del coeficiente de absorción lineal. Se distingue una meseta entre 3300 Hz y 5000 Hz que adquiere valores de alrededor de 0,10 y un máximo de 0,18 en la frecuencia de 6300 Hz. Este valor es ligeramente inferior al obtenido en la pieza L98FL2_1050, como era de esperar, puesto que esta probeta ha sinterizado a una mayor temperatura y la porosidad es inferior.

Como ya ha sucedido en otras muestras, se presentaron valores negativos que se descartaron, y es el motivo de que existan ausencia de algunos valores.



MUESTRA L97FL3_1100

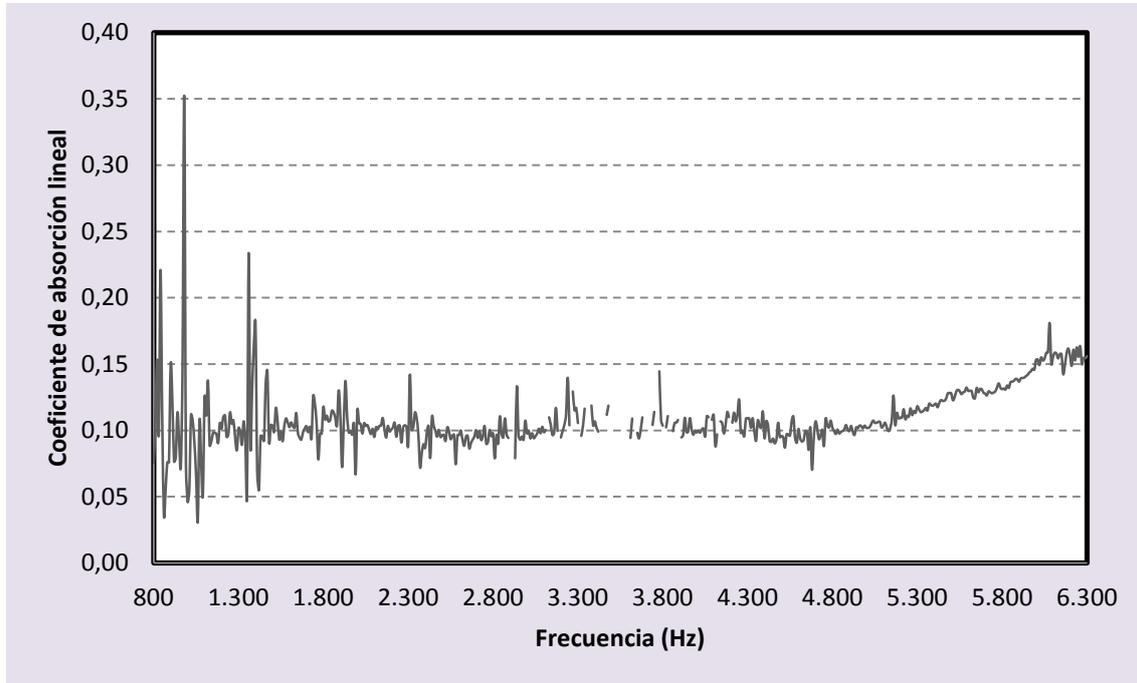


Figura 138. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L97FL3_1100.

En este caso (Figura 138), el ensayo se puede considerar válido a partir de 1500 Hz donde se ha estabilizado el tubo de impedancia y como consecuencia, el coeficiente de absorción lineal no proporciona una gráfica con altibajos. Se puede observar hasta los 5000 Hz de frecuencia que la gráfica se mantiene en un coeficiente de absorción lineal de aproximadamente 0,10. En 6300 Hz se produce un máximo con un coeficiente de absorción de 0,16.

Se puede ver como los valores que se adquiere en este caso, son inferiores a la gráfica anterior de la muestra de L98FL2_1100. Es por todo ello, que la pieza es menos porosa que la anterior y permite por lo tanto, una menor absorción acústica.



MUESTRA L96FL4_1100

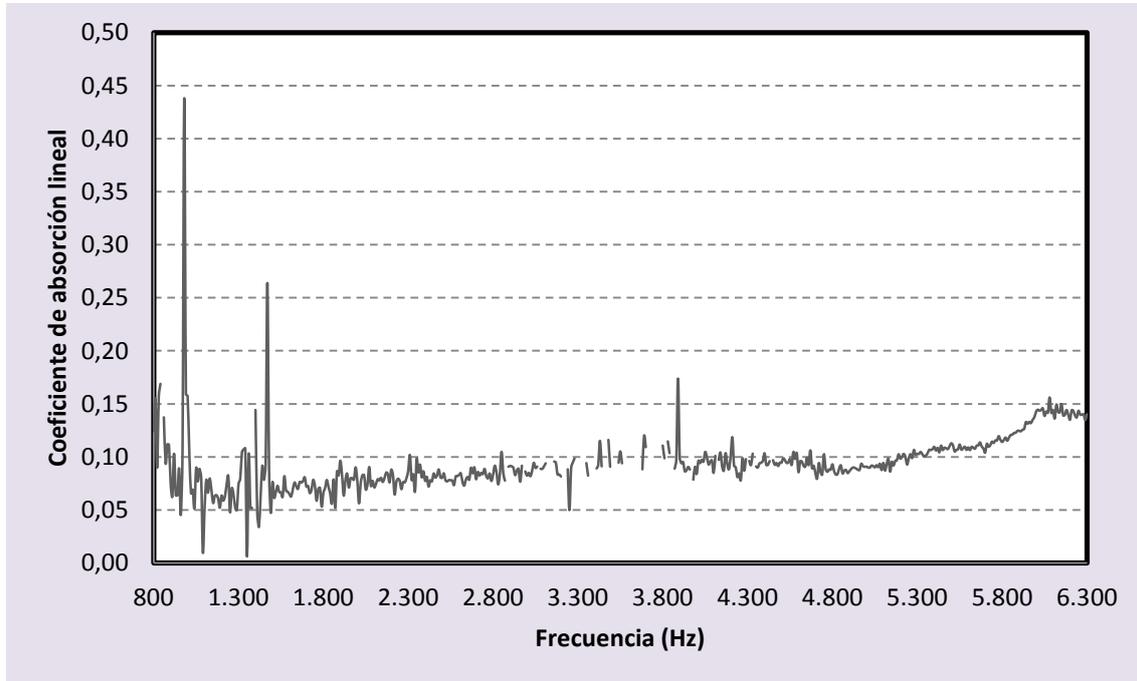


Figura 139. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L96FL4_1100.

En la Figura 139, se aprecia el coeficiente de absorción lineal para cada frecuencia. Se puede observar hasta los 5000 Hz de frecuencia que la gráfica se mantiene en un intervalo de valores de 0,7 y 0,10. En 6300 Hz, se produce un máximo con un coeficiente inferior a 0,15.

De esta manera, se aprecia como los valores del coeficiente de absorción acústico continúan disminuyendo con respecto a las gráficas anteriores. Debido a que la pieza tiene mayor contenido de fundente, posee menor porosidad y como consecuencia, escasa absorción.



MUESTRA L95FL5_1100

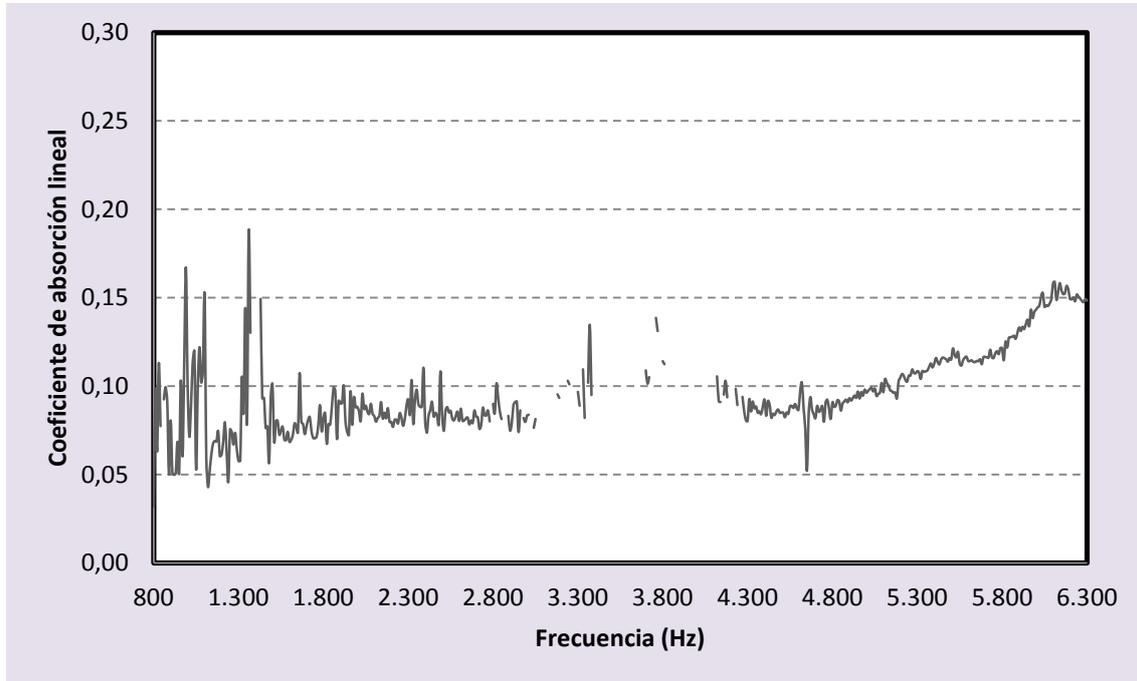


Figura 140. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L95FL5_1100.

Aunque en este caso (Figura 140), la gráfica presentó muchas oscilaciones incluso una vez despreciados los valores que se sitúan en el tramo previo a 1500 Hz, se puede observar con claridad un máximo en 6300 Hz que alcanza un coeficiente de absorción de 0,15 aproximadamente.

A pesar de que como ya se indicó previamente, se han realizado tres ensayos por cada pieza y los valores que se representan corresponden a la media de los tres, existen muchos datos que se han tenido que desechar por poseer un valor negativo.



MUESTRA L94FL6_1100

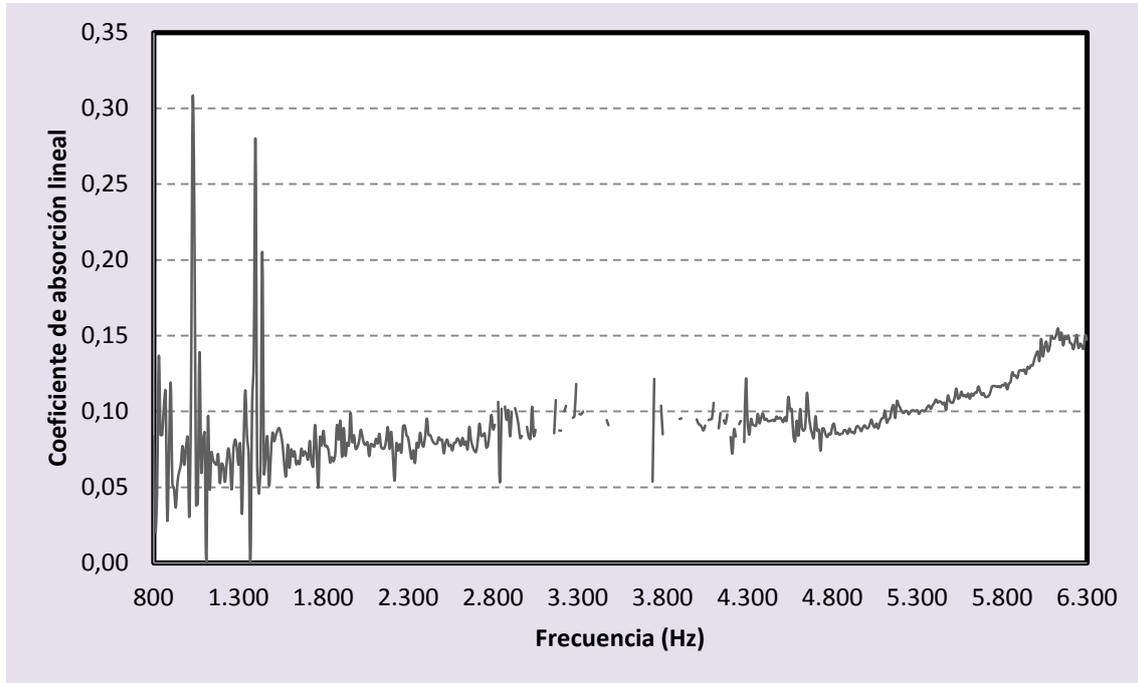


Figura 141. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L94FL6_1100.

La Figura 141 corresponde a la gráfica del coeficiente de absorción lineal para distintos valores de frecuencia. A partir de 1500 Hz se consideró que la gráfica era óptima para un análisis válido.

En la zona central se pueden observar tramos vacíos que carecen del dato de medición tomado, ya que corresponden con los valores negativos que se ha decidido descartar.

Simplemente, se aprecia un máximo en la frecuencia de 6300 Hz que corresponde a un coeficiente de absorción inferior a 0,15.



MUESTRA L92FL8_1100

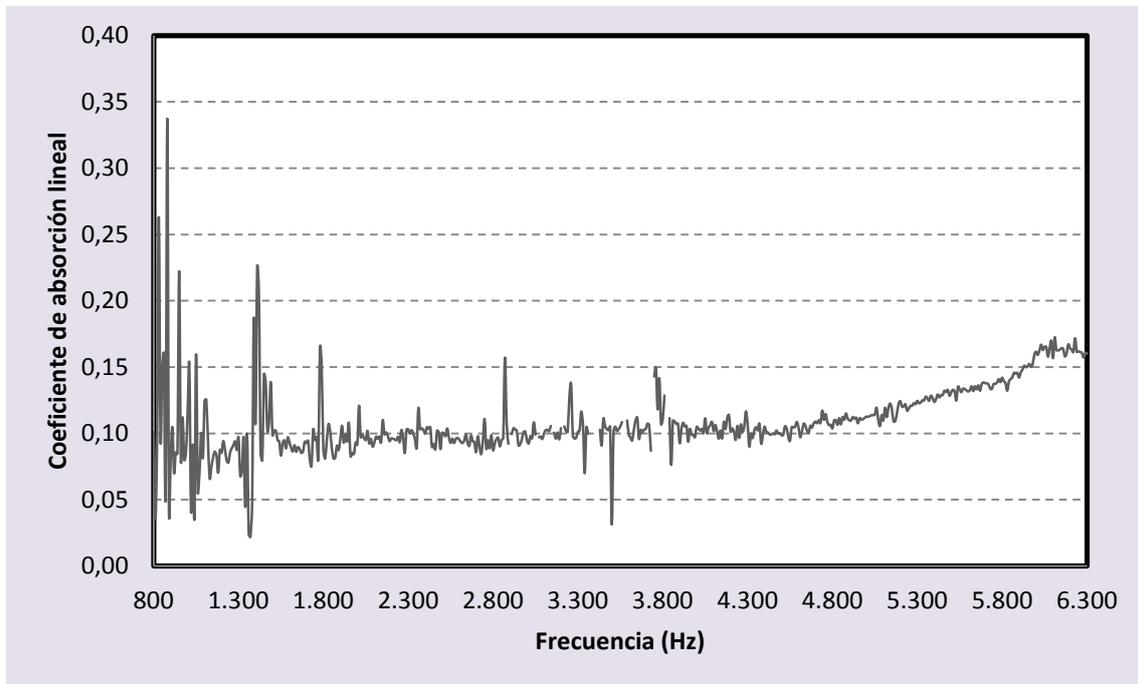


Figura 142. Coeficiente de absorción lineal en función de la frecuencia del material L92FL8_1100.

En este caso (Figura 142), es a partir de 1800 Hz cuando se estima que la gráfica es fiable y por ello, el tubo está perfectamente estabilizado.

Hasta el valor de frecuencia de 4800 Hz aproximadamente, los valores del coeficiente de absorción se mantiene alrededor de 0,10 proporcionando así un tramo prácticamente horizontal. La única variación se observa con un máximo de 0,16 de coeficiente de absorción lineal que se produce a la frecuencia de 6300 Hz.

Si se realiza una comparativa de esta muestra L92FL8_1100, con la primera muestra que se analizó L98FL2_1100, ya que son las muestras en las que mayor diferencia en cuanto al fundente añadido existe, se aprecia claramente que el valor máximo del coeficiente de absorción lineal ha pasado de 0,18 en la primera muestra a 0,16 aproximadamente en la última. Lo que indica que a mayor cantidad de escoria de soldadura, menor porosidad y en conclusión menor absorción.



Asimismo, es importante considerar la gran influencia que adquiere el ajuste de la pieza al portamuestras, tanto en lo referente al diámetro, como para el ajuste de la cara superior e inferior, además de la posición de la misma para la obtención de los diferentes coeficientes de absorción lineal en cada caso.

Por último, se realiza una comparación en tercios de octava, entre los resultados proporcionados por la línea de investigación en la que se estudió el comportamiento acústico del ladrillo convencional [12], y el mismo material con adición de fundente fabricado en el presente proyecto a diferentes temperaturas de sinterizado.

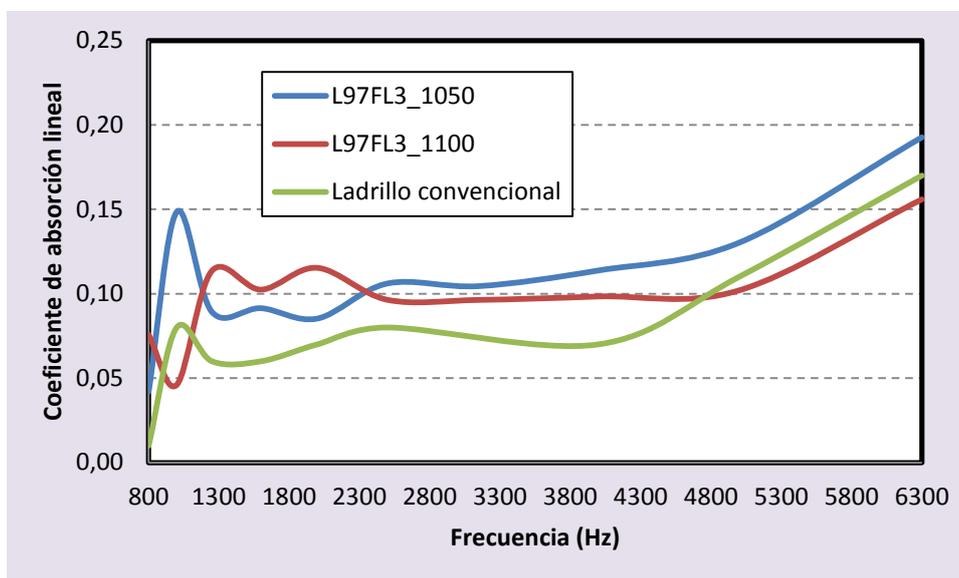


Figura 143. Coeficiente de absorción lineal del ladrillo convencional, L97FL3_1050 y L97FL3_1100.

En la Figura 143, se observa que a pesar de que la adición empeora el comportamiento acústico (coeficiente de absorción lineal más bajo), tiene mejor comportamiento que el ladrillo convencional. Esto se explica porque la pieza de ladrillo convencional fue sinterizada a la temperatura de 1125°C, por lo que la pieza presenta menor porosidad y por consiguiente peor absorción acústica, hecho que se demuestra al examinar las curvas del material L97FL3_1050 y L97FL3_1100, donde se obtienen mayores valores del coeficiente para el material sinterizado a menor temperatura.

En conclusión, se consiguen mejores resultados del coeficiente de absorción acústica, sinterizando las piezas a menor temperatura y con menor aporte de fundente.



CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES



CONCLUSIONES

Atendiendo a los ensayos realizados y los resultados obtenidos se han determinado las siguientes conclusiones:

- Según aumenta el contenido de fundente de escoria de soldadura, la temperatura a la cual sinteriza la pieza es más baja.
- A igualdad de temperatura de sinterizado, se consigue mayor densidad cuando se añade mayor cantidad de fundente.
- El volumen en verde y sinterizado de las piezas es prácticamente el mismo en la temperatura de 1000°C. Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura, existe una enorme diferencia de volumen antes y después del sinterizado.
- En cuanto a la contracción volumétrica que sufren las piezas atendiendo al porcentaje de fundente, existe un decremento ligeramente mayor en la muestra del contenido de escoria de soldadura más alto respecto al resto de piezas. Sin embargo, esta variación es insignificante. Dicho de otra forma, hay una diferencia más notoria en cuanto a la variación de temperatura que mediante los diferentes porcentajes de escoria de soldadura o flux de las muestras.
- De los resultados del ensayo de dureza, se deduce que cuanto menor temperatura de sinterización, mayor dureza. Además, si el contenido de flux es inferior, la pieza presenta una mayor dureza.
- Si realizamos una comparativa con los resultados de otras líneas de investigación donde no utilizaban ningún tipo de fundente, mediante su adición se consigue la misma dureza, pero disminuyendo la temperatura del punto de fusión.
- Las piezas sinterizadas a menor temperatura (1150°C), tienen unos coeficientes de fricción mayores. Los materiales que han sinterizado a mayor temperatura tienen menor coeficiente de fricción debido a que se deposita mayor cantidad de metal procedente del contramaterial y por tanto, las microsoldaduras que se crean son mayores. Por esto, los coeficientes de fricción bajan.



- Cuando el contenido de fundente es mayor se consiguen materiales con un coeficiente de fricción medio más elevado, exceptuando cuando las piezas están sobresinterizadas.
- Para finalizar, reseñar que en lo referente al coeficiente de absorción acústica, cuanto mayor es la cantidad de escoria de soldadura, menor porosidad y en conclusión, menor absorción acústica, sucediendo lo mismo si se aumenta la temperatura de sinterización.



CAPÍTULO 5: PERSPECTIVAS DE FUTURO



PERSPECTIVAS DE FUTURO

Mediante este Proyecto Fin de Carrera se han intentado cumplir todos los objetivos propuestos. Sin embargo, hay pasos susceptibles de mejora que se pueden abordar en un futuro. Entre ellos se encuentran los siguientes:

- Utilizar métodos de moldeo no manuales, entre otros el moldeo por inyección.
- Realizar la técnica de moldeo Starch con diferentes tipos de almidones.
- Además, efectuar la técnica de moldeo Starch con almidón caliente.
- Uso de un termopar y un higrómetro que en todo momento estén tomando datos de la temperatura ambiente y humedad en el interior de la cápsula del tribómetro.
- Evaluar el comportamiento tribológico cerámico-cerámico.
- Utilizar composiciones mayores de fundente puesto que ofrecen un buen comportamiento a la vista de los resultados de este estudio.
- Evaluar otros fundentes industriales que sirvan como aditivo para el residuo de ladrillo.
- Emplear el análisis de imagen sobre las micrografías tomadas para evaluar la cantidad de deposición metálica y así completar el análisis del ensayo tribológico.



CAPÍTULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. (BOE Nº38, de 13 de febrero de 2008)
- [2] Catálogo Europeo de Residuos CER, aprobado por la Decisión 2000/532/CE.
- [3] Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. (BOE Nº181, de 29 de julio de 2011)
- [4] Enciclopedia de Empresa Formats Construction Machinery Co.
<http://tritadoras-de-roca.com/wiki/1498.html>
(Último acceso 12/12/2013)
- [5] E. Romero. Master de Ingeniería Ambiental. 2006-2007.
<http://www.uhu.es/emilio.romero/docencia/Residuos%20Construccion.pdf>
(Último acceso 12/12/2013)
- [6] J. M. Morán del Pozo, A. Juan Valdés, P. J. Aguado, M. I. Guerra, C. Medina. “Estado actual de la gestión de residuos de construcción y demolición: limitaciones”. Informes de la Construcción Vol. 63, pp. 89-95, enero-abril 2011.
- [7] M. J. Sierra. Artículo I de las Recomendaciones: “Zahorras artificiales de reciclados de RCD’s”. Jornada recomendaciones RCD, Gestión de Infraestructuras de Andalucía, Consejería de Obras Públicas y Vivienda.
http://www.aopandalucia.es/inetfiles/giasa_com_estructura/167201010886.pdf
(Último acceso 12/12/2013)
- [8] Ficha técnica: “Residuos de construcción y demolición”. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Ministerios de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente.
http://www.concretonline.com/pdf/09rcd/art_tec/Actualizacion_catalogo_residuos_utilizables_construccion.pdf
(Último acceso 12/12/2013)



- [9] Empresa Jabonero Construcciones.
<http://ladrillos.es/como-se-fabrican-los-ladrillos/>
(Último acceso 12/12/2013)
- [10] A. Aguilar. "Reciclado de materiales de construcción", Revista Residuos. 1997.
- [11] "Crean un sistema para reutilizar los ladrillos de las demoliciones". Revista Tendencias 21.
18/09/2013.
- [12] S. González. "Comportamiento térmico y sinterabilidad de materiales cerámicos
fabricados por el procedimiento "STARCH" a partir de residuos de la construcción". PFC EPSZ.
Septiembre 2013.
- [13] M. Bullón. "Estudio previo sobre valorización mixta de residuos de construcción y escoria
de soldadura". PFC EPSZ. Junio 2013.
- [14] N. Antón, M. V. Gonçalves, A. A. García, R. Caballero, J. Escuadra, M. L. Pérez-Delgado.
"Comportamiento mecánico y fiabilidad de materiales procedentes de residuos de
construcción". Actas del III Congreso Nacional de Pulvimetalurgia, pp. 147-156. Valencia 2010.
- [15] N. Antón, R. Blanco, A. A. García, J. Escuadra, M. L. Pérez-Delgado. "Comportamiento a
compresión y fiabilidad de materiales procedentes de residuos de ladrillo fabricados mediante
el método Starch". Actas del IV Congreso Nacional de Pulvimetalurgia, pp. 36-43. Sevilla 2012.
- [16] J. Mezquita. "Comportamiento tribológico de materiales procedentes de residuos de
ladrillo". PFC EPSZ. Junio 2012.
- [17] J. L. Henares. "Comportamiento frente al desgaste de materiales cerámicos fabricados a
partir de residuos de construcción". PFC EPSZ. Junio 2010.
- [18] <http://www.ecologiahoy.com/residuos-industriales>
(Último acceso 18/12/2013)



[19] P. Higuera, R. Oyarzun. Tema 6 “Almacenamiento de residuos”. Universidad Castilla la Mancha.

http://www.uclm.es/users/higuera/mga/Tema06/Tema_06_Residuos_1.htm

(Último acceso 18/12/2013)

[20] Gobierno de la Rioja. “La gestión de los Residuos”.

http://www.larioja.org/upload/documents/471615_4_gestion_residuos_ind.pdf

Último acceso 18/12/2013

[21] Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015. (BOE Nº49, de 26 de febrero de 2009)

[22] ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. (BOE Nº43, de 19 de febrero de 2002)

[23] “Gestión de residuos no peligrosos”. Gobierno Vasco.

<http://www.ihobe.net/documentos/imagenpaginas/000-RNP.pdf>

(Último acceso 19/12/2013)

[24] L. Echarri. Tema 13 “Residuos Industriales”. Universidad de Navarra.

<http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/13Residu/120ResInd.htm>

(Último acceso 19/12/2013)

[25] “Plan Integral de Residuos de Castilla y León. Documento para el debate y la información pública” Junta de Castilla y León. Consejería de Fomento y Medio Ambiente. Julio 2013.

[26] A. Cruz, R. Quintana, L. L. García, L. Perdomo, G. Jiménez, C. R. Gómez, F. J. Alguacil, A. Cor. “Empleo de escorias de soldadura del sistema MnO-SiO₂ para la obtención de un nuevo fundente aglomerado aleado”. Revista de metalurgia. CSIC. Vol. 41, pp. 3-11, 2005.

[27] A. Lázaro. “Soldeo por arco sumergido”. 2008.

<http://solysol.com.es/data/documents/Soldadura=20por=20Arco=20Sumergido=20Curso=20Completo.pdf>

(Último acceso 20/12/2013)



[28] J. R. Gil, S. Barroso, A. M. Camacho. “Introducción al conocimiento de los materiales y a sus aplicaciones”. Editorial UNED. 2010.

[29] A. Villarino. Tema 7 “Materiales cerámicos Asignatura Ciencia y tecnología de los materiales”. EPS Ávila.

<http://ocw.usal.es/eduCommons/enseñanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%204-%20MATERIALES%20CERAMICOS.pdf>

(Último acceso 26/12/2013)

[30] M. Campos, J. M. Torralba. Tema 7 “Procesado de materiales cerámicos por tecnología de polvos”. Universidad Carlos III de Madrid.

http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-polvos/material-de-clase-1/7.Procesado_Ceramicosx.pdf

(Último acceso 26/12/2013)

[31] N. Antón. Tesis Doctoral “Obtención de nuevos materiales cerámicos y compuestos basados en el Clinker portland: Estudio de sinterabilidad, propiedades mecánicas y tribológicas”. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. 1997.

[32] O. Ebrahimpour, C. Dubois, J. Chaouki. “Fabrication of mullite-bonded porous SiC ceramics via a sol-gel assisted in situ reaction bonding”. Journal of the European Ceramic Society. Vol. 34, pp. 237-247. Febrero 2014.

[33] Xun Ji, Ruzhong Zuo, Shishun Qi, Longdong Liu. “Synthesis, characterization and electrical properties of sol – gel derived $0.63\text{Bi}(\text{Mg}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3 - 0.37\text{PbTiO}_3$ high-Tc piezoelectric ceramics”. Materials Chemistry and Physics. Vol. 134, 1179–1184. Junio 2012.

[34] M. Radeka, J. Ranogajec, R. Marinkovic-Neducin, B. Zivanovic. “Compaction mechanism as the function of atomized powder particle size”. Ceramics International. Vol. 21, pp. 249-255. 1995.



- [35] G. Monrós, J. Antonio Badenes, Araceli García, M. Ángeles Tena. “El color de la cerámica: Nuevos mecanismos en pigmentos para los nuevos procesados de la industria cerámica”. Universitat Jaume I. Editorial Athenea. 2003.
- [36] A. Ballester, L. F. Verdeja, J. Sancho. “Metalurgia extractiva Volumen I. Fundamentos.” Editorial Síntesis. 2000.
- [37] G. Álvarez. “Factibilidad de Aplicación Bluetooth a Sensor de Desgaste”
http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo323/2s06/projects/GerardoAlvarez/proyecto_final.htm
(Último acceso 26/12/2013)
- [38] Tema 6 “Selección por tamaños. Cribado”. Universidad Politécnica de Cartagena.
http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5551/mod_resource/content/1/Tema_6_-_Cribado.pdf
(Último acceso 27/12/2013)
- [39] Universidad de Ohio.
http://www.matsceng.ohio-state.edu/~daehn/powder/jiang_thesis/chapter2/image017.gif
(Último acceso 27/01/2014)
- [40] F. Andrés Campo. “Concepto en la compactación”
<http://cipem.uniandes.edu.co/Investigacion1/ConceCom.htm>
(Último acceso 30/12/2013)
- [41] “Methods of shape forming ceramic powders”
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=methods_of_shape_forming_ceramic_powers
(Último acceso 30/12/2013)
- [42] P.C. Angelo, R. Subramanian. “Powder metallurgy: science, technology and applications”. Editorial Easter Economy. 2008.



[43] M. Campos, J. M. Torralba. Tema 4. "La compactación uniaxial". Universidad Carlos III de Madrid.

http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-polvos/material-de-clase-1/4.La_compactacion_uniaxialx.pdf

(Último acceso 05/01/2014)

[44] F.R. Morral, E. Jimeno, P. Molera. "Metalurgia general tomo II". Editorial Reverté, 1985.

[45] J. L. García Jacomino. "Una introducción en los materiales cerámicos".

<http://www.monografias.com/trabajos81/introduccion-materiales-ceramicos/introduccion-materiales-ceramicos2.shtml>

(Último acceso 05/01/2014)

[46] M. Campos, J. M. Torralba. Tema 3. "Principales rutas de conformado en Tecnología de Polvos". Universidad Carlos III de Madrid.

http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-polvos/material-de-clase-1/3.Rutas_conformadox.pdf

(Último acceso 06/01/2014)

[47] S. Kalpakjian, S. R. Schmid. "Manufactura, ingeniería y tecnología". Editorial Prentice Hall. 2001.

[48] <http://kids.britannica.com/comptons/art-260/Stages-in-the-slip-casting-of-a-thin-walled-whiteware>

(Último acceso 06/01/2014)

[49] A.F. Lemos, J.M.F. Ferreira. "Porous bioactive calcium carbonate implants processed by starch consolidation". Materials Science and Engineering. Vol. 11, pp. 35-40. Junio 2000.

[50] J.L. Minatti, J.G.A. Santana, R.S. Fernandes, E. Campos. "Alumina developed by pre-gelling starch consolidation (PSC)". Journal of the European Ceramic Society. Vol. 29, pp. 661-668. 2009.



- [51] Tomoyoshi Mita. "Structure of potato starch pastes in the ageing process by the measurement of their dynamic moduli". Department of Natural Science. Vol. 17, pp. 269-276. 1992.
- [52] D. Hotza, P. Greil. Review: "Aqueous tape casting of ceramic powders". Materials Science and Engineering. Vol. A202, pp. 206-217. 1995.
- [53] F. Blanco. Tema 11 "Conformado de cerámicas. Tape casting". Universidad de Oviedo
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Tema5.MaterialesCERAMICOS.CONFORMADO.Tape.CASTING.pdf>
(Último acceso 06/01/2014)
- [54] J. M. Sánchez. Tema 6 "Conformado y compactación". Universidad de Navarra.
<http://www1.ceit.es/asignaturas/pulvimetal/docs/Tema6.pdf>
(Último acceso 06/01/2014)
- [55] <http://tecnoblogsanmartin.files.wordpress.com/2013/01/ceramica.jpg>
(Último acceso 25/01/2014)
- [56] N. Antón, J. M. Torralba, L. E. G. Cambroner, F. Velasco, J. M. Ruiz-Prieto. "Ceramic and ceramic matrix composites based on Clinker Portland: Sinterability". Key Engineering Materials. Vol. 127-131, pp. 407-414. 1996.
- [57] V. J. Lorenzo. "Sinterizado".
http://www.rmateriales.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=109:sinterizado&catid=40:n6&Itemid=65
(Último acceso 28/01/2014)
- [58] M. P. Grover. "Fundamentals of modern manufacturing materials, process and systems". Editorial John Wiley & Sons. 2010.
- [59] C.A. Rivas. "Compactación y sinterización de polvos obtenidos por aleación mecánica de Cu-1,2%pAl, Cu-2,3%pTi y Cu-2,7%pV". Universidad de Chile. Marzo 2008.



- [60] N. Antón, R. Gamboa, V. Amigó, J. M. Torralba. "Liquid phase sintering of CMCs based on Clinker Portland ". Journal of the European Ceramic Society. Vol. 20, pp. 2215-2214. 2000.
- [61] A. Sayans. "Estudio de la sinterabilidad y el comportamiento acústico de materiales fabricados a partir de residuos de ladrillo". TFM Universidad Politécnica de Madrid. Febrero 2014.
- [62] J. D. Fernández. "Estudio previo sobre el reciclado mixto de materiales procedentes de residuos de construcción y de la segunda fusión del aluminio". PFC EPSZ. Marzo 2013.
- [63] A. J. Contreras. "Materiales nanoestructurados: comportamiento tribológico"
<http://ingenieriademateriales.wordpress.com/2010/02/24/materiales-nanoestructurados-comportamiento-tribologico/>
(Último acceso 06/01/2014)
- [64] Karl-Heinz Dietsche. "Manual de la técnica del automóvil" 4ª Edición. Editorial Reverté. 2005.
- [65] M. A. Gómez. Tesis "Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros". Universidad de Barcelona. Diciembre 2005.
- [66] H. Hernández, E. Espejo. "Mecánica de fractura y análisis de falla" Colección Sede. 2002.
- [67] B. Bhusham, F. E. Kennedy, A. Z. Szeri. "Macrotribology" Modern tribology handbook Vol. 1. 2001.
- [68] J. Renedo. Tesis "Comportamiento al desgaste por deslizamiento en aceros inoxidables: ferrítico, austenítico dúplex y martensítico". Universidad Politécnica de Cataluña. Febrero 2010.
- [69] N. Antón, J. M. Torralba, F. Velasco, M. A. Martínez. "Tribological behaviour of composite materials based on Clinker Portland reinforced with oxides". Wear. Vol. 237, pp. 107-115. Reino Unido 2000.



[70] D. H. Mesa Grajales.

<http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf>

(Último acceso 27/01/2014)

[71] <http://cadcamcae.wordpress.com/2008/11/17/%C2%BFque-es-el-desgaste/>

(Último acceso 07/01/2014)

[72] http://www.noria.mx/nla/index.php?option=com_content&view=article&id=309&Itemid

(Último acceso 07/01/2014)

[73] R. Fuentes. “¿Para qué sirve la tribología?”

<http://quimica.ugto.mx/revista/1/tribologia.htm>

(Último acceso 07/01/2014)

[74] G. Castro Quián. Capítulo 1 “Aspectos Básicos del Sonido y el Ruido”.

http://webs.uvigo.es/gcastro/PFC/PROYECTO_ZALO_archivos/Capitulo%201.pdf

(Último acceso 07/01/2014)

[75] <https://climacusticaparaarquitectos.wordpress.com/category/uncategorized/page/15/>

(Último acceso 28/01/2014)

[76] Empresa Cecor. Ingeniería y Soluciones Acústicas.

<http://www.cecorsl.com/materiales-absorventes-acusticos-aislantes-que-no-aportan-aislamiento-acustico>

(Último acceso 28/01/2014)

[77] <https://sites.google.com/site/ecpwaves/fsico-terico/reflexin-y-refraccin-del-sonido>

(Último acceso 07/01/2014)

[78] <http://acusticarquitectonicaymedioambiental.blogspot.com.es/2010/05/coeficientes-de-absorcion-sonora.html>

(Último acceso 28/01/2014)

[79] B.C. Punmia, A. Kumar, A. K. Jain. “Basic Civil Engineering”. Editorial LP. 2003.



[80] UNE-EN 933-1:2012. "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado".

[81] M. Bullón. "Análisis estadístico de la influencia de variables presión de compactación y porcentaje en peso de ligante sobre la dureza en materiales cerámicos: ladrillo y hormigón". PFC EPSZ. Junio 2010.

[82] S.L. Kaplan, E. S. Lopata, J. Smith. "Plasma Processes and Adhesive Bonding of Polytetrafluorethylene". Surface and interface analysis. Vol 20, pp. 331-336, 1993.

[83] A. J. Millán, M. Bravo, R. Moreno, M^a. I. Nieto. "Moldeo por inyección a baja presión de suspensiones cerámicas". Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 38. Marzo-Abril 1999.

[84] F. Navarro. "Estudio de una vía alternativa del procesado por moldeo por inyección medioambientalmente aceptable: hidrogeles de Agar". Universidad Carlos III de Madrid. 2010.

[85] ASTM G99 - 05(2010) "Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus"

[86] W. D. Callister, Jr. "Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 1". Editorial Reverté. 1995.

[87] [http://www.polymere.wikibis.com/durete_\(materiau\).php](http://www.polymere.wikibis.com/durete_(materiau).php)
Último acceso 06/01/2014

[88] M. T. Lin, D. Y. Jiang, L. Li, Z. L. Lu, T. R. Lai, J. L. Shi. "The effect of creep deformation of a β sialon on Vickers hardness, fracture toughness and Weibull modulus". Materials Science and Engineering. Vol. 351, pp. 9-14, 2003.

[89] J. Hernández, N. Antón, J. Escuadra, M. L. Pérez-Delgado. "Estudio estadístico sobre las operaciones de acondicionamiento de las virutas de aluminio por vía pulvimetalúrgica". Actas del IV Congreso Nacional de Pulvimetalurgia. pp. 50-58. Sevilla 2012.



[90] A. Nevarez, A. Aguilera, E. Orrantia, M. H. Bocanegra. "Compressive strength, hardness and fracture toughness of Al₂O₃ whiskers reinforced ZTA and ATZ nanocomposites: Weibull analysis", Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Vol. 29, pp. 333-340. Diciembre 2010.

[91] UNE-EN ISO 10534-2:2002 "Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia".

[92] Agencia Estatal de Meteorología. AEMET.

[93] N. Antón, J. M. Torralba, F. Velasco, N. Candela. "Friction and wear behaviour of CMCs based on Clinker Portland against a steel countermaterial" British Ceramic Transactions. Vol. 101, pp 65-70. 2002.



ANEXOS



ANEXO 1. DENSIDADES EN VERDE

Tabla 1. Medidas de las piezas en verde L98FL2.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L98FL2_30	0,571	2,892	4,447	1,186
L98FL2_25	0,708	2,897	5,417	1,161
L98FL2_22	0,647	2,888	4,976	1,175
L98FL2_29	0,728	2,929	5,755	1,173
L98FL2_76	0,688	2,873	5,149	1,154
L98FL2_63	0,634	2,868	4,754	1,160
L98FL2_26	0,677	2,925	5,336	1,172

Tabla 2. Medidas de las piezas en verde L97FL3.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L97FL3_34	0,777	2,919	6,014	1,155
L97FL3_45	0,691	2,893	5,248	1,155
L97FL3_33	0,664	2,891	4,988	1,145
L97FL3_50	0,711	2,892	5,310	1,137
L97FL3_37	0,860	2,894	6,497	1,149
L97FL3_49	0,582	2,927	4,539	1,159
L97FL3_38	0,667	2,932	5,141	1,142



Tabla 3. Medidas de las piezas en verde L96FL4.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L96FL4_20	0,591	2,878	4,544	1,181
L96FL4_4	0,682	2,909	5,473	1,208
L96FL4_3	0,808	2,879	6,305	1,198
L96FL4_58	0,756	2,875	5,803	1,183
L96FL4_12	0,708	2,922	5,800	1,221
L96FL4_57	0,506	2,915	3,967	1,174
L96FL4_42	0,782	2,876	5,854	1,153

Tabla 4. Medidas de las piezas en verde L95FL5.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L95FL5_36	0,819	2,876	6,123	1,152
L95FL5_40	0,773	2,884	5,817	1,152
L95FL5_35	0,587	2,928	4,485	1,134
L95FL5_71	0,855	2,891	6,494	1,157
L95FL5_39	0,432	2,929	3,300	1,134
L92FL8_52	0,592	0,292	4,566	1,156
L92FL8_47	0,780	2,913	5,841	1,123

Tabla 5. Medidas de las piezas en verde L94FL6.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L94FL6_28	0,558	2,904	4,296	1,163
L94FL6_17	0,606	2,887	4,694	1,182
L94FL6_5	0,761	2,944	6,091	1,176
L94FL6_27	0,612	2,942	4,818	1,158
L94FL6_14	0,814	2,899	6,397	1,190
L94FL6_64	0,576	2,900	4,438	1,167
L94FL6_31	0,585	2,920	4,627	1,181



Tabla 6. Medidas de las piezas en verde L92FL8.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L92FL8_23	0,608	2,903	4,638	1,152
L92FL8_8	0,541	2,921	4,222	1,164
L92FL8_7	0,707	2,886	5,398	1,167
L92FL8_56	0,598	2,935	4,678	1,156
L92FL8_16	0,774	2,924	6,283	1,208
L92FL8_55	0,729	2,888	5,496	1,151
L92FL8_44	0,805	2,880	5,995	1,144



ANEXO 2. DENSIDADES SINTERIZADO

Tabla 7. Medidas de las piezas sinterizadas a T=1000°C.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L98FL2_1000_30	0,562	2,839	4,279	1,204
L97FL3_1000_34	0,768	2,862	5,763	1,167
L96FL4_1000_20	0,581	2,828	4,330	1,187
L95FL5_1000_36	0,805	2,821	5,886	1,171
L94FL6_1000_28	0,500	2,845	4,153	1,188
L92FL8_1000_23	0,597	2,857	4,467	1,167

Tabla 8. Medidas de las piezas sinterizadas a T=1050°C.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L98FL2_1050_25	0,686	2,792	5,208	1,241
L97FL3_1050_45	0,665	2,801	4,895	1,195
L96FL4_1050_4	0,653	2,813	5,219	1,285
L95FL5_1050_40	0,751	2,803	5,599	1,208
L94FL6_1050_17	0,588	2,802	4,505	1,243
L92FL8_1050_8	5,207	2,846	4,073	1,229



Tabla 9. Medidas de las piezas sinterizadas a T=1100°C.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L98FL2_1100_22	0,592	2,656	4,698	1,434
L97FL3_1100_33	0,614	2,659	4,792	1,407
L96FL4_1100_3	0,742	2,631	6,001	1,488
L95FL5_1100_35	0,539	2,696	4,300	1,397
L94FL6_1100_5	0,705	2,687	5,863	1,465
L92FL8_1100_7	0,649	2,651	5,202	1,451

Tabla 10. Medidas de las piezas sinterizadas a T=1125°C.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L98FL2_1125_29	0,630	2,537	5,543	1,740
L97FL3_1125_50	0,616	2,519	5,155	1,680
L96FL4_1125_58	0,657	2,491	5,576	1,741
L95FL5_1125_71	0,739	2,504	6,195	1,703
L94FL6_1125_27	0,538	2,552	4,650	1,690
L92FL8_1125_56	0,522	2,558	4,510	1,681

Tabla 11. Medidas de las piezas sinterizadas a T=1150°C.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L98FL2_1150_76	0,575	2,415	5,018	1,905
L97FL3_1150_37	0,693	2,364	6,264	2,059
L96FL4_1150_12	0,602	2,447	5,530	1,954
L95FL5_1150_39	0,351	2,378	3,158	2,027
L94FL6_1150_14	0,668	2,358	6,147	2,107
L92FL8_1150_16	0,636	2,397	6,038	2,102



Tabla 12. Medidas de las piezas sinterizadas a T=1175°C.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L98FL2_1175_63	0,521	2,329	4,592	2,069
L97FL3_1175_49	0,470	2,369	4,411	2,128
L96FL4_1175_57	0,424	2,369	3,820	2,043
L95FL5_1175_52	0,474	2,380	4,436	2,102
L94FL6_1175_64	0,474	2,350	4,277	2,080
L92FL8_1175_55	0,591	2,321	5,290	2,115

Tabla 13. Medidas de las piezas sinterizadas a T=1200°C.

	Altura media (cm)	Diámetro medio (cm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
L98FL2_1200_26	0,562	2,439	5,144	1,957
L97FL3_1200_38	0,554	2,463	4,920	1,865
L96FL4_1200_42	0,645	2,366	5,555	1,957
L95FL5_1200_47	0,630	2,406	5,556	1,939
L94FL6_1200_31	0,491	2,461	4,423	1,893
L92FL8_1200_44	0,653	2,379	5,621	1,936



ANEXO 3. MEDIDAS DE DUREZA

Tabla 14. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L98FL2_1150.

L98FL2_1150				
2732	3989	3792	3680	3242
3135	2669	3792	3592	4348
2656	4169	3297	3498	3974
3962	4513	3719	4938	2507
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3610

Tabla 15. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L97FL3_1150.

L97FL3_1150				
3458	3269	3245	3904	3968
3476	1944	3685	4060	4215
2851	3458	2677	3817	1711
3436	2626	1511	3704	3199
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3211

Tabla 16. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L96FL4_1150.

L96FL4_1150				
3817	3107	3623	3332	3416
3157	3757	3897	3059	3466
3107	3031	3480	3107	3742
2842	3151	3628	3592	3073
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3369

Tabla 17. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L95FL5_1150.

L95FL5_1150				
2153	1527	8359	2017	3493
5272	5214	3587	1858	7514
821	3063	5093	2835	1212
6320	4094	4739	3899	1512
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3729



Tabla 18. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L94FL6_1150.

L94FL6_1150				
2963	3313	3488	3471	2640
3428	3700	3121	3280	3915
3229	3229	3680	2939	2395
2919	3652	2242	2376	2618
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3130

Tabla 19. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L92FL8_1150.

L92FL8_1150				
2702	4361	2323	3671	4372
2170	4203	2381	2217	3288
2590	4385	2890	2122	3680
4072	2916	3288	4128	4546
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3315

Tabla 20. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L98FL2_1175.

L98FL2_1175				
2341	2165	2842	4157	2482
3592	3662	3564	3569	2386
3555	3728	2851	3577	3139
3662	3642	3390	3545	2214
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3203

Tabla 21. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L97FL3_1175.

L97FL3_1175				
2010	1914	3700	3272	3837
3353	4534	4198	3199	1684
3253	1889	4405	3253	3904
3817	4078	4607	1672	3894
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3324

Tabla 22. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L96FL4_1175.

L96FL4_1175				
3842	3623	3411	4292	4675
3723	3823	3592	3817	4203
2518	2437	4146	3633	4323
4191	4005	3994	4754	4094
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3855



Tabla 23. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L95FL5_1175.

L95FL5_1175				
3168	3449	2702	2206	3671
2682	3341	3128	3245	3042
3782	4316	3606	1967	2880
4111	4055	3787	3550	3656
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3317

Tabla 24. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L94FL6_1175.

L94FL6_1175				
3034	3272	3606	1939	3592
2109	1586	3883	1620	3488
3329	3952	2132	3647	3542
3238	3714	3421	2699	3199
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3050

Tabla 25. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L92FL8_1175.

L92FL8_1175				
3700	3694	3728	2997	3398
1443	3480	3329	1109	3153
2217	3276	3245	3471	2062
2124	3842	3501	2835	3533
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3007

Tabla 26. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L98FL2_1200.

L98FL2_1200				
1585	2500	3723	1363	3862
3256	2150	2677	3719	3842
3084	4462	3004	2691	4475
2325	3165	3888	4423	3946
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3207

Tabla 27. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L97FL3_1200.

L97FL3_1200				
4083	3787	4348	1861	3146
4060	2817	1875	3862	3656
3515	3533	2939	2526	3946
1766	3797	3690	3411	3802
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3321



Tabla 28. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L96FL4_1200.

L96FL4_1200				
4186	2552	3269	4405	2848
1887	2136	3084	3573	2560
3433	4354	3506	3272	2212
3433	3666	2421	1718	3853
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3118

Tabla 29. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L95FL5_1200.

L95FL5_1200				
2434	1759	2437	2180	2052
1951	2202	3817	2949	2702
3879	2099	2110	3564	1813
1614	4140	2175	1850	1607
Dureza media ($HV_{0,5}$)				2467

Tabla 30. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L94FL6_1200.

L94FL6_1200				
3962	3211	3207	3802	1893
3038	2993	3723	3984	2505
2073	4305	2467	2845	1997
2097	2454	3782	3542	3685
Dureza media ($HV_{0,5}$)				3078

Tabla 31. Medidas de la dureza ($HV_{0,5}$) de la pieza L92FL8_1200.

L92FL8_1200				
2916	1848	1674	3203	2592
1822	2909	3272	1676	1958
2367	2523	2864	1669	3606
1766	2531	2877	1724	1848
Dureza media ($HV_{0,5}$)				2382



ANEXO 4. CONDICIONES DEL ENSAYO TRIBOLÓGICO

Tabla 32. Condiciones del ensayo tribológico de las muestras de T=1150°C.

	Peso Disco (g)		Peso Pin (g)		Temperatura (°C)			Humedad (%)		
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Media	Final	Inicial	Media	Final
L98FL2_1150	4,6226	4,623	0,8793	0,8773	28,6	28,9	29,3	17	17	16
L97FL3_1150	5,9551	5,9552	0,8773	0,8747	28,3	29,2	29,8	17	16	16
L96FL4_1150	4,5586	4,5591	0,8878	0,8768	27,4	27,8	28,4	17	17	17
L95FL5_1150	2,865	2,8648	0,8795	0,8762	27,6	27,7	28,2	17	17	17
L94FL6_1150	5,932	5,9326	0,8779	0,8762	26,9	27,6	28,1	18	17	17
L92FL8_1150	4,5425	4,5432	0,8765	0,8742	26,4	26,5	26,8	18	18	18

Tabla 33. Condiciones del ensayo tribológico de las muestras de T=1175°C.

	Peso Disco (g)		Peso Pin (g)		Temperatura (°C)			Humedad (%)		
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Media	Final	Inicial	Media	Final
L98FL2_1175	4,4712	4,4717	0,8788	0,8775	26,7	27,4	27,9	25	23	23
L97FL3_1175	4,2605	4,2615	0,8801	0,8792	23,6	24,2	25,2	24	22	21
L96FL4_1175	3,6749	6,6755	0,881	0,8795	25,4	26,0	26,6	24	22	21
L95FL5_1175	4,3154	4,3147	0,8778	0,877	24,4	24,8	25,5	24	22	21
L94FL6_1175	4,0583	4,0577	0,8792	0,8778	25,7	26,3	26,7	23	21	20
L92FL8_1175	5,1829	5,1826	0,8807	0,8792	25,0	25,5	26,1	23	21	19

Tabla 34. Condiciones del ensayo tribológico de las muestras de T=1200°C.

	Peso Disco (g)		Peso Pin (g)		Temperatura (°C)			Humedad (%)		
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Media	Final	Inicial	Media	Final
L98FL2_1200	4,4563	4,4553	0,8801	0,8798	25,4	25,8	26,6	26	25	23
L97FL3_1200	4,5865	4,5872	0,8822	0,8803	24,4	24,7	25,4	28	23	20
L96FL4_1200	4,0851	4,0857	0,8797	0,8782	25,4	26,0	26,6	24	22	21
L95FL5_1200	5,3823	5,3801	0,8765	0,8756	25,9	26,6	27,0	23	22	22
L94FL6_1200	4,5762	4,5776	0,8831	0,8824	25,7	26,3	26,7	23	21	20
L92FL8_1200	3,9467	3,9466	0,8838	0,8831	24,3	24,8	25,4	23	23	22



ANEXO 5. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

Tabla 35. Coeficiente de absorción en tercios de octava de L98FL2, L97FL3 y L96FL4 a T=1050°C.

	L98FL2_1050_25	L97FL3_1050_45	L96FL4_1050_4
f(Hz)	α_{medio}	α_{medio}	α_{medio}
800	0,0183	0,0420	0,0443
1000	0,0747	0,1484	0,1214
1250	0,0597	0,0892	0,0775
1600	0,0712	0,0914	0,0786
2000	0,0764	0,0853	0,0855
2500	0,0837	0,1061	0,1002
3150	0,1275	0,1045	0,0962
4000	0,1746	0,1138	0,1185
5000	0,1397	0,1302	0,1292
6300	0,1893	0,1926	0,1873

Tabla 36. Coeficiente de absorción en tercios de octava de L95FL5, L94FL6 y L92FL8 a T=1050°C.

	L95FL5_1050_40	L94FL6_1050_17	L92FL8_1050_8
f(Hz)	α_{medio}	α_{medio}	α_{medio}
800	0,0974	0,0538	0,1076
1000	0,0998	0,1095	0,0542
1250	0,1483	0,0950	0,0801
1600	0,1854	0,0839	0,0759
2000	0,2136	0,0901	0,0942
2500	0,2241	0,0958	0,0882
3150	0,1886	0,0988	0,0896
4000	0,1576	0,1200	0,1059
5000	0,1517	0,1283	0,1080
6300	0,1841	0,1585	0,1620



Tabla 37. Coeficiente de absorción en tercios de octava de L98FL2, L97FL3 y L96FL4 a T=1100°C.

	L98FL2_1100_22	L97FL3_1100_33	L96FL4_1100_3
f(Hz)	α_{medio}	α_{medio}	α_{medio}
800	0,0367	0,0757	0,1243
1000	0,0500	0,0460	0,1576
1250	0,0564	0,1135	0,0477
1600	0,0753	0,1024	0,0649
2000	0,0826	0,1153	0,0774
2500	0,0860	0,0964	0,0803
3150	0,1108	0,0963	0,0957
4000	0,1099	0,0984	0,0839
5000	0,1107	0,1020	0,0909
6300	0,1826	0,1559	0,1402

Tabla 38. Coeficiente de absorción en tercios de octava de L95FL5, L94FL6 y L92FL8 a T=1100°C.

	L95FL5_1100_35	L94FL6_1100_5	L92FL8_1100_7
f(Hz)	α_{medio}	α_{medio}	α_{medio}
800	0,0320	0,0835	0,1011
1000	0,1008	0,0828	0,1150
1250	0,0755	0,0673	0,0854
1600	0,0686	0,0629	0,0933
2000	0,0883	0,0765	0,0915
2500	0,0831	0,0812	0,1004
3150	0,0954	0,0856	0,1005
4000	0,0908	0,0948	0,1049
5000	0,0963	0,0891	0,1127
6300	0,1484	0,1473	0,1603