

## V. Planteamiento de soluciones. Selección

Vista la problemática del sensor con respecto a la soldadura es el momento de plantear las posibles soluciones y valorarlas según una serie de aspectos con la finalidad de seleccionar la más conveniente. Los aspectos a analizar pueden ser tales como gastos de experimentación, costes de fabricación, mejoras con respecto al proceso actual, carga de tiempo, seguridad en el trabajo y, uno especialmente importante, el control del proceso mediante un diagnóstico que nos permita saber si el orificio está sellado o si al contrario, no permanecerá cerrado el tiempo de vida que se espera del sensor. Por ejemplo al sensor actual se le estima un tiempo de vida de unos 1000 ciclos de temperatura como mínimo, donde un ciclo de temperatura consiste en someter al sensor a temperaturas desde  $-40^{\circ}$  a  $105^{\circ}$  C, valores de temperatura definidos por normas industriales.

A continuación pasamos a valorar cada uno de estos métodos, se incluyen variaciones y distintos materiales como futuras líneas de investigación. Los métodos se evalúan de forma cualitativa mediante estos factores: positiva (+), nula (0) ó negativa (-). Utilizando el criterio anterior se valorará positiva, negativamente o nulo según la sencillez de las modificaciones, el ahorro económico, las ventajas que produzcan con respecto al método actual, etcétera.

El método actual para cerrar el orificio de llenado es soldadura mediante soldador. Otros posibles son soldadura por láser, soldadura por inducción, soldadura por ultrasonidos o la utilización de algún tipo de adhesivo. Un resumen de todos los métodos se muestra en la Tabla nº 8.

Téngase en cuenta que la valoración de los factores es de forma orientativa y en algunos casos cabría la posibilidad de evaluar un factor, por ejemplo, positivo o nulo, o también, negativo o nulo.

a) Soldadura tradicional

En el proceso actual el material utilizado como soldadura es PbSnAg mezclado con flux, que es un agente químico que se utiliza antes de la soldadura para limpiar el metal de óxido e impurezas. La razón principal de querer mejorar este método es solucionar los problemas en la soldadura y mejorar el tiempo de vida del producto, el cual va relacionado directamente con éstos. Al ya estar implantado el método, no supondría un gasto muy elevado aplicar alguna de las variaciones sugeridas y no habría muchas dificultades a priori para establecer un standard. La resistencia química de los componentes está referida a posteriores pasos del proceso de fabricación en los que el sensor sufrirá cambios de temperatura (por ejemplo en el proceso de lavado) donde entrará en contacto con otros productos.

Las posibilidades de obtener los materiales son muy altas puesto que son los proveedores actuales. El método actual utiliza flux para limpiar de óxido y de impurezas el metal, y las variaciones seguirían usando este componente. La carga de calor y la seguridad en el trabajo serían las mismas que con el método actual. Con respecto al tiempo de ciclo, es un tiempo ya conocido que variaría mínimamente. El control de procesos nos permite diagnosticar fallos en la producción individual de cada sensor. En este caso, los rayos-X son de gran utilidad pero no nos ayudan a distinguir fisuras en la soldadura o posibles canales por los que se perdiese el fluido.

<b>Método de unión</b>	<b>Soldadura tradicional</b>
<b>Variaciones</b>	espira calentadora entrada de calor por IR
<b>Material</b>	PbSnAg PbInAg AuSn
<b>Soldadura en orificio</b>	-
<b>TWT- Tiempo de vida</b>	-
<b>Standard Técnico</b>	+
<b>Costes de inversión</b>	+
<b>Tiempo de espera/ en curso</b>	0
<b>Resistencia química</b>	+
<b>Necesidad de flux</b>	0
<b>Disponibilidad de Materiales</b>	+
<b>Carga de calor</b>	0
<b>Protección del trabajo</b>	0
<b>Tiempo de ciclo</b>	+
<b>Control de proceso</b>	
<b>Acoplamiento de energía</b>	0
<b>Diagnóstico de rayos-X</b>	-

Tabla 3: Soldadura Tradicional

## b) Soldadura por láser

La soldadura por láser es una solución muy elegante puesto que no implica un contacto directo del láser con el sensor, tal y como hemos visto, por ejemplo, en el método anterior en el cual es necesario que la fuente de calor esté en contacto con la soldadura y el metal.

Entre las distintas posibilidades está soldar una esfera de cristal en el orificio de llenado, usar una soldadura de vidrio, combinarlas o usar una tapa de cerámica. En principio no se puede saber a ciencia cierta si este método solucionará los problemas en la soldadura. Hay que resaltar que la inversión sería muy alta por el precio del láser y si hubiese problemas con la óptica del láser los tiempos de reparación serían muy elevados. A favor están la resistencia química y que se elimina la necesidad de utilizar flux. El diagnóstico de rayos-X para este método sería ineficiente para el control del proceso puesto que no se distinguiría nada en la radiografía, por lo tanto sería un handicap ya que es una gran herramienta visual y está disponible actualmente en la empresa.

Métodos de unión	Soldadura por láser
<b>Variaciones</b>	esfera de cristal (I)
	soldadura de vidrio (II)
	(I) + (II)
	tapa de cerámica
<b>Material</b>	
<b>Soldadura en orificio</b>	<b>0</b>
<b>TWT- Tiempo de vida</b>	<b>0</b>
<b>Standard Técnico</b>	-
<b>Costes de inversión</b>	-
<b>Tiempo de espera/ en curso</b>	
<b>Resistencia química</b>	<b>++</b>
<b>Necesidad de flux</b>	<b>++</b>
<b>Disponibilidad de Materiales</b>	<b>0</b>
<b>Carga de calor</b>	-
<b>Protección del trabajo</b>	-
<b>Tiempo de ciclo</b>	<b>0</b>
<b>Control de proceso</b>	
<b>Acoplamiento de energía</b>	-
<b>Diagnóstico de rayos-X</b>	--
<b>Socio</b>	

Tabla 4: Soldadura por láser

c) Soldadura por inducción

La soldadura por inducción consiste en una espira por la que se hace circular una corriente creando un campo electromagnético inducido. El orificio de llenado se cierra con soldadura de los distintos materiales propuestos y o con una tapa de cerámica o con una tapa de kóvar (aleación ferrosa de cobalto y níquel). Con respecto a la necesidad de flux, es una incógnita si se podrá suprimir o no. El tema de la soldadura en el orificio parece estar solucionado a priori por el diseño de la tapa. Este método se valora muy positivamente con respecto a todos los factores de evaluación, con especial relevancia en lo relativo al diagnóstico de rayos-X. Los primeros pasos para la experimentación ya se han dado y se mantienen contactos con la empresa Frisch GmbH fabricante de los equipos de inducción.

<b>Método de unión</b>	<b>Soldadura por inducción</b>
<b>Variaciones</b>	tapa de cerámica tapa de kóvar
<b>Material</b>	PbSnAg PbInAg AuSn Sold. de vidrio Fa. Diemat Sold.de vidrio Uni Jena
<b>Soldadura en orificio</b>	<b>0</b>
<b>TWT- Tiempo de vida</b>	<b>+</b>
<b>Standard Técnico</b>	<b>+</b>
<b>Costes de inversión</b>	<b>+</b>
<b>Tiempo de espera/ en curso</b>	
<b>Resistencia química</b>	<b>+</b>
<b>Necesidad de flux</b>	<b>?</b>
<b>Disponibilidad de Materiales</b>	<b>0</b>
<b>Carga de calor</b>	<b>+</b>
<b>Protección del trabajo</b>	<b>+</b>
<b>Tiempo de ciclo</b>	<b>+</b>
<b>Control de proceso</b>	
<b>Acoplamiento de energía</b>	<b>+</b>
<b>Diagnóstico de rayos-X</b>	<b>++</b>
<b>Socio</b>	Frisch GMBH

Tabla 5: Soldadura por inducción

d) Adhesivo

El adhesivo tiene muchas ventajas con respecto a costes de inversión, disponibilidad de materiales, necesidad de flux y no es necesario aplicar calor puesto que no es una soldadura. A la hora de controlar el proceso no se puede hacer un diagnóstico de rayos-X y el acoplamiento de energía no es aplicable por lo que encontramos algunos inconvenientes. El método consiste en introducir una esfera de cerámica en el orificio de llenado impidiendo la salida del electrolítico y después se usa silicato de potasio o sodio para adherir la esfera y que no se desprenda. Otras posibles variaciones que se han intentado poner en práctica sin mucho éxito es la combinación de este método con la soldadura por inducción. Posiblemente lo más adecuado no sea una solución única sino que para lograr un objetivo (cerrar el orificio disponer de un tiempo de vida suficiente) puede haber una combinación de ideas que nos den esta solución.

<b>Método de unión</b>	<b>Adhesivo</b>
<b>Variaciones</b>	Silicato de sodio
	Silicato de cuarzo +
	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ó Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
<b>Material</b>	Silicato de potasio
	Silicato de sodio
<b>Soldadura en orificio</b>	<b>0</b>
<b>TWT- Tiempo de vida</b>	<b>0</b>
<b>Standard Técnico</b>	<b>0</b>
<b>Costes de inversión</b>	<b>++</b>
<b>Tiempo de espera/ en curso</b>	<b>+</b>
<b>Resistencia química</b>	<b>0</b>
<b>Necesidad de flux</b>	<b>++</b>
<b>Disponibilidad de Materiales</b>	<b>++</b>
<b>Carga de calor</b>	<b>++</b>
<b>Protección del trabajo</b>	<b>0</b>
<b>Tiempo de ciclo</b>	<b>+</b>
<b>Control de proceso</b>	
<b>Acoplamiento de energía</b>	<b>n.a.</b>
<b>Diagnóstico de rayos-X</b>	<b>--</b>
<b>Socio</b>	interno

Tabla 6: Método de unión adhesivo

e) Soldadura por ultrasonidos

En este método se pone de manifiesto la idea anterior de conjugar varios métodos y no sólo se puede usar la soldadura por ultrasonidos sino que se puede combinar con inducción o con un pistón.

La soldadura por ultrasonidos es otra de las opciones a tener en cuenta aunque no se sabe hasta que punto se mejoraría el problema principal, la soldadura en el orificio. A favor tiene que los costes de inversión no son elevados y se puede eliminar la necesidad del flux. La disponibilidad de materiales sería un factor positivo pues son los mismos que se usan actualmente. Habría mejoras como respecto a la carga de calor o al tiempo de ciclo ya que se pueden soldar varios sensores a la vez. Realmente las ventajas de este método no serían de gran relevancia a priori pero debido a los bajos costes de investigación se considera interesante.

<b>Método de unión</b>	<b>Soldadura por ultrasonidos</b>
<b>Variaciones</b>	US
	US + inducción
	US + pistón
<b>Material</b>	PbSnAg
	PbInAg
	AuSn
<b>Soldadura en orificio</b>	-
<b>TWT- Tiempo de vida</b>	
<b>Standard Técnico</b>	+
<b>Costes de inversión</b>	+
<b>Tiempo de espera/ en curso</b>	+
<b>Resistencia química</b>	+
<b>Necesidad de flux</b>	++
<b>Disponibilidad de Materiales</b>	+
<b>Carga de calor</b>	+
<b>Protección del trabajo</b>	0
<b>Tiempo de ciclo</b>	+
<b>Control de proceso</b>	
<b>Acoplamiento de energía</b>	0
<b>Diagnóstico de rayos-X</b>	0
<b>Socio</b>	FNE Freiberg

Tabla 7: Soldadura por ultrasonidos

Métodos de unión	Soldadura por láser	Soldadura por inducción	Pegamento	Soldadura por ultrasonidos	Soldar con soldador
Variaciones	esfera de cristal (I) soldadura de vidrio (II) (I) + (II)	tapa de cerámica tapa de kóvar	Silicato de sodio Silicato de cuarzo + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ó Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	US US + inducción US + pistón	espira calentadora entrada de calor por IR
Material	tapa de cerámica	PbSnAg PbInAg AuSn	Silicato de potasio Silicato de sodio	PbSnAg PbInAg AuSn	PbSnAg PbInAg AuSn
		Sold. de vidrio Fa. Diemat Sold. de vidrio Uni Jena			
Formación de bolas	0	0	0	-	-
TWT. Tiempo de vida	0	+	0		-
Standard Técnico	-	+	0	+	+
Costes de inversión	-	+	++	+	+
Tiempo de espera/ en curso			+	+	0
Resistencia química	++	+	0	+	+
Necesidad de flux	++	?	++	++	0
Disponibilidad de Materiales	0	0	++	+	+
Wärmebelastung	-	+	++	+	0
Protección del trabajo	-	+	0	0	0
Tiempo de ciclo	0	+	+	+	+
Control de proceso					
Acoplamiento de energía	-	+	n.a.	0	0
Diagnóstico de rayos-X	--	++	--	0	-
Socio		Frisch GmbH	interno	FNE Freiberg	

Tabla 8: Métodos de unión

La soldadura por láser tiene como inconvenientes la alta inversión inicial y el control del proceso. No se podría analizar el sensor hasta el test eléctrico, con el consiguiente gasto en un sensor que en un futuro habrá que desechar.

Se han mantenido contactos con la empresa Frisch GmbH para la experimentación de la soldadura por inducción, y entre sus muchas ventajas destaca la posibilidad de mediante una radiografía evaluar el resultado del experimento y en el futuro, si se instaurara este método valorar la soldadura del orificio del sensor.

Los primeros pasos ya se han dado en métodos como la utilización de adhesivo debido a la facilidad de conseguir material y la posibilidad de investigarlo internamente. Aunque no se han obtenido resultados satisfactorios y no se puede evaluar el sensor mediante rayos-X.

La soldadura por ultrasonidos tiene como inconveniente que no solucionaría los problemas en la soldadura y no se sabe hasta que punto mejoraría el tiempo de vida. Sin embargo, se mantienen contactos con el instituto FNE de Freiberg.

Con respecto a las mejoras en la soldadura tradicional eléctrica, éstas serían mínimas, pero el bajo coste y la facilidad de implantar algún cambio hacen que merezca la pena investigarlos.

HL Planar ha optado finalmente por invertir en la investigación de la soldadura por inducción del orificio de llenado debido a todas las ventajas que se han comentado y que se pueden consultar en la tabla de la página anterior. Durante un periodo de tres meses se ha estudiado la teoría de inducción, se ha simulado, experimentado y analizado el método de inducción y como colofón se celebró una reunión constituida por Stephan Linke (Dr. en física por la Universidad de Jena y Manager Process R&D), que supervisó todo el proyecto, Ralf Gottfried-Gottfried (Físico y Director Business Unit), Robert Stonies (Dr. en Ingeniería Electrónica por la Universidad de Dortmund), Lars Musseleck (Ingeniero electrónico por la Universidad de Dortmund), Frank Schwieger (Ingeniero electrónico por la Universidad de Dortmund), Rüdiger Höltermann (Jefe de producción), David Sánchez Padilla (Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad de Sevilla) como invitado y por último el autor de este proyecto, quien realizó un breve resumen del método y una exposición de los resultados dando por finalizada la sesión con la propuesta de futuras líneas de trabajo mediante brainstorming.

Una vez expuestos los problemas del sensor y la opción elegida por la compañía para tratar de solucionarlos queda por describir el proceso en sí junto a todas las herramientas y materiales que en él intervienen. Con este fin se incluye una breve descripción de los procesos que lo conforman.

## 1. Teoría de inducción

El calentamiento por inducción es un método que provee calor de una manera rápida y consistente para aplicaciones que requieren cambiar las propiedades de metales y otros materiales conductores eléctricos. El método de inducción se basa en el *efecto skin*. El *efecto skin* es la tendencia de una corriente alterna de distribuirse por un conductor de manera que la densidad de corriente cerca de la superficie del conductor es mayor que en el núcleo. Esto es, que la corriente eléctrica tiende a fluir por “la piel” del conductor, de ahí el nombre, *efecto skin*. Por tanto, el proceso se centra en inducir corrientes eléctricas al material para producir calor.

El generador elegido se encarga de transformar la tensión de la red en una tensión de mayor frecuencia.

Si aplicamos esta tensión a una bobina inductora, circulará por ella una corriente.

$$I = \frac{V}{2\pi \cdot F \cdot L_b}$$

V= Diferencia de potencial

F= Frecuencia (Hz)

L<sub>b</sub>= Inductancia de la bobina (H)

La potencia se transmitirá a la pieza de la misma forma con que el primario de un transformador la transfiere a su secundario.

La corriente en el secundario (pieza que queremos calentar) circulará en la práctica por su corteza exterior, calentándola según la ley de Joule:  $W=RI^2$

Nota: no confundir la R de la ley de Joule que se refiere a Resistencia con la R que viene a continuación que representa la profundidad de penetración.

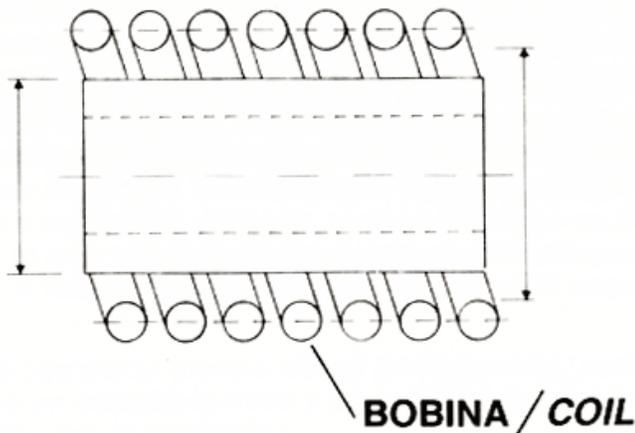


Figura 37: Corte transversal de espira y pieza

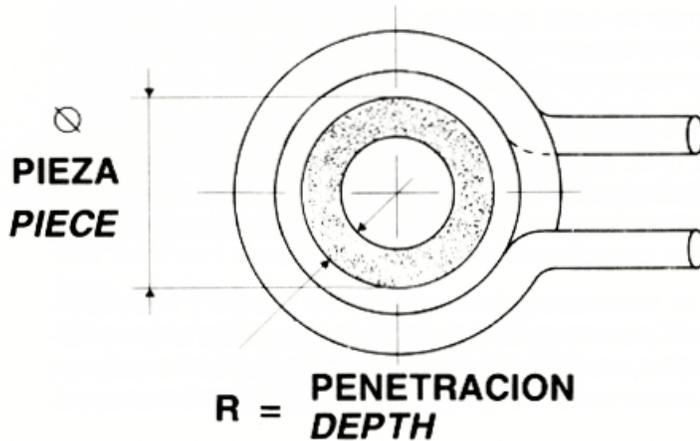


Figura 38: Vista superior de espira y pieza

Al grueso efectivo de la corteza se le llama penetración efectiva, y depende de la resistividad, de la permeabilidad magnética, del material a calentar, y de la frecuencia aplicada a cada instante, siguiendo la ley que se puede aproximar en alta frecuencia como:

$$R = 50,3 \sqrt{\frac{r}{\mu \cdot F}}$$

Donde;

**R**= Penetración efectiva  
**r**= Resistividad en Micro-Ohm·m/m<sup>2</sup>  
**F**= Frecuencia  
**μ**= Permeabilidad

Esta es la porción que será calentada de modo directo por la corriente. Si queremos calentar más grueso de corteza, debemos disminuir la frecuencia o dar más tiempo a que la energía se transmita por conducción térmica.

Podemos hablar del rendimiento pieza/inductor como concepto de la eficacia con que un inductor calentará a una pieza.

El rendimiento pieza/inductor se ve favorecido por:

- a) Resistividad elevada de la pieza
- b) Resistividad reducida del inductor.

c) Buen acoplamiento geométrico entre pieza e inductor.

El factor K de acoplamiento geométrico es:

$$K = \left( \frac{d}{D} \right)^3$$

D= Diámetro interior de la bobina, d= Diámetro exterior de la pieza

K varía entre 0 y 1. Cuanto más próximo esté de 1, mejor rendimiento tendrá el proceso.

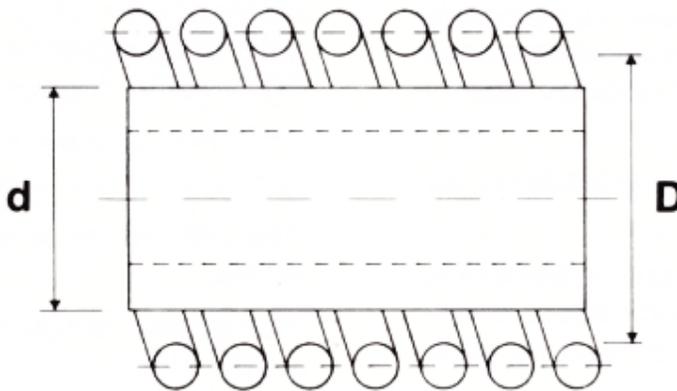


Figura 39: Diámetros de espira y pieza.

d) Temperatura. Incrementa la resistividad y hace que por encima del punto de Curie (750°C en los aceros), el material que lo sea deja de ser magnético.

De nada sirve que un generador sea muy potente si no se consigue un rendimiento pieza/inductor aceptable. Por otro lado, tampoco puede afirmarse que dos generadores distintos que anuncien potencias iguales serán capaces de calentar una pieza en el mismo tiempo. Esto puede parecer paradójico pero es fácil de explicar.

Como hemos dicho anteriormente, un generador pone en juego unos ciertos voltios por amperios en la bobina inductora, que a su vez tiene un rendimiento. La potencia nominal nos informa de cuanta potencia es capaz de suministrar el generador a la pieza si las condiciones de rendimiento son suficientes. En caso contrario, la pieza absorberá menos potencia, por muy potente que sea el generador según su placa de características. El factor de mérito que distingue a los generadores es pues su capacidad de calentar las piezas aunque las condiciones exteriores no sean idóneas.

## 2. Simulación del proceso de inducción

Junto al Dr. Ing. Robert Stonies se realiza una simulación en FEMLAB en los equipos de la universidad de Dortmund para tener una idea previa del proceso de inducción, ver la distribución de campo electromagnético, la resistividad óhmica, la temperatura que se alcanza, el calor que se produce, y otros factores que se consideren relevantes en nuestro caso en particular.

Para ello se introducen en el ordenador todos los datos necesarios como materiales y dimensiones de la tapa, los metales, el anillo, la espira, la frecuencia, etc.

El nombre FEMLAB viene de laboratorio de método de elementos finitos, aunque recientemente ha pasado a llamarse COMSOL Multiphysics. Este programa es capaz de realizar cálculos y simulaciones en nuestro rango de frecuencias que para el Microwave Studio al menos requeriría un ordenador durante cientos de horas de cálculo e incluso llegaría a ser irrealizable. Este programa tiene la ventaja de que para reducir los cálculos te permite dibujar parte de la pieza y más tarde crear la pieza completa. Para que nos imaginemos nuestro caso concreto. Una espira tiene la forma de un toroide, un tubo hueco. Pues bien, para simular la espira sólo hace falta dibujar un círculo y más tarde se gira  $360^\circ$  obteniéndose la espira completa.

Por tanto, pensemos en las imágenes que se van a ver a continuación. Si tomamos el centro de la metalización como el punto (0,0), a la izquierda sería negativo y a la derecha positivo. A la hora de hacer la simulación tomaremos ese punto como el centro y dibujaremos sólo la parte positiva del plano  $X=0$  ya que el resto de la figura se podrá dibujar en el futuro haciéndola girar  $360^\circ$ .

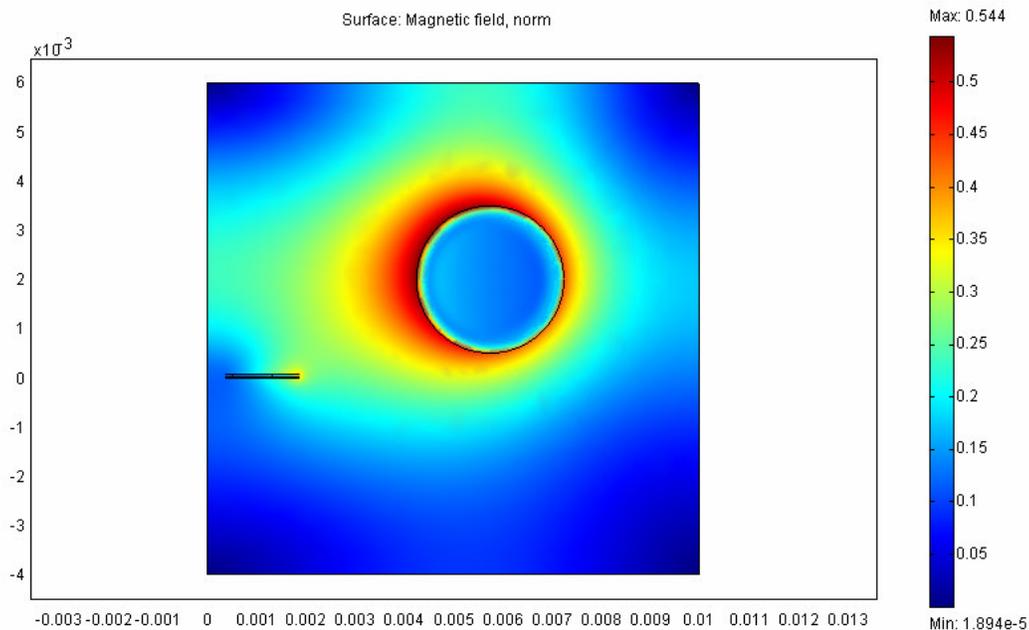


Figura 40: Campo magnético provocado por la espira a una frecuencia de 400kHz

En la siguiente figura se ha ampliado la parte del sensor.

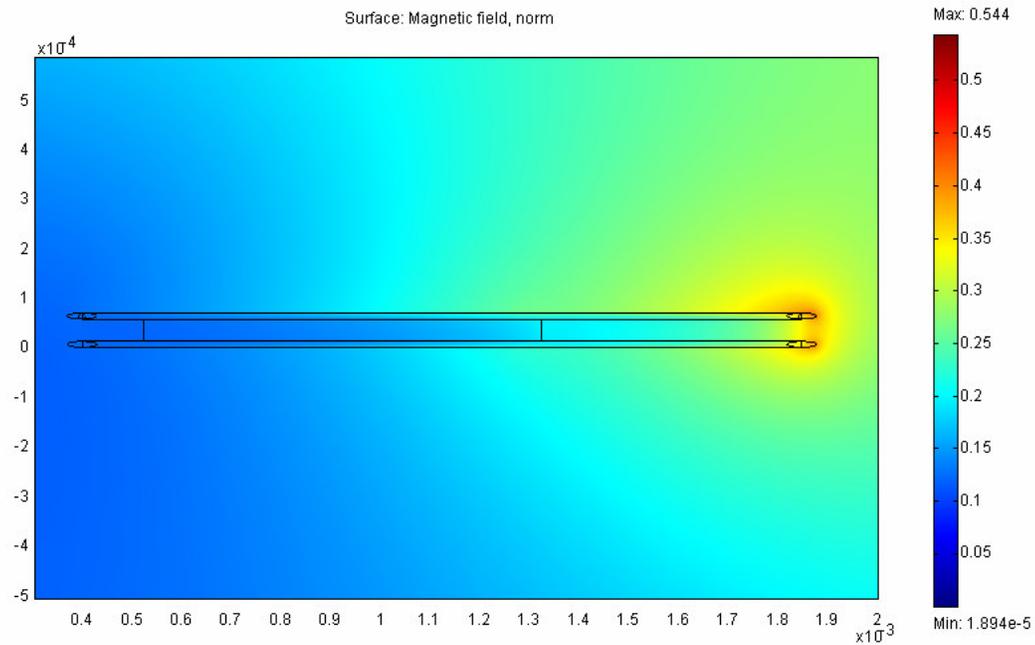


Figura 41: Campo magnético sobre la metalización y el anillo de soldadura

Y por último se muestra la resistividad magnética de los materiales a 400kHz y a 700kHz. Hay que decir, que la resistividad magnética de un material conductor va aumentando con la temperatura y que mediante la conductividad, la temperatura que se alcanza en los extremos de la metalización y de la soldadura se pasa rápidamente al resto del material provocando así que la tapa y el sensor queden soldados. En la simulación no hace falta añadir la cerámica del sensor ni de la tapa ya que no afectan debido a la baja resistividad y conductividad del material.

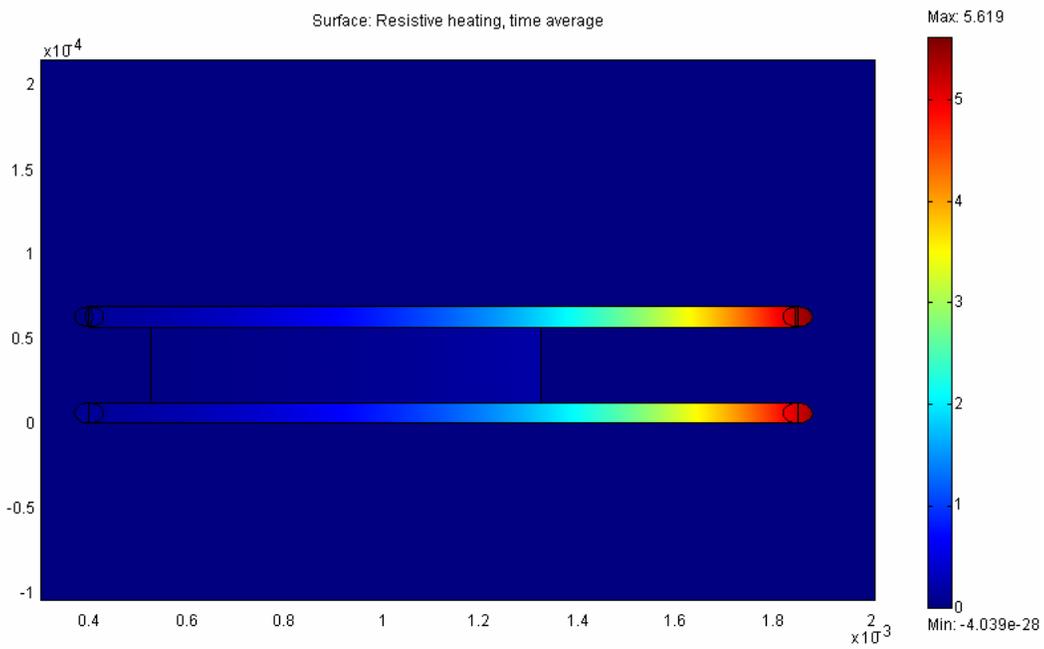


Figura 42: Resistividad magnética a 400kHz

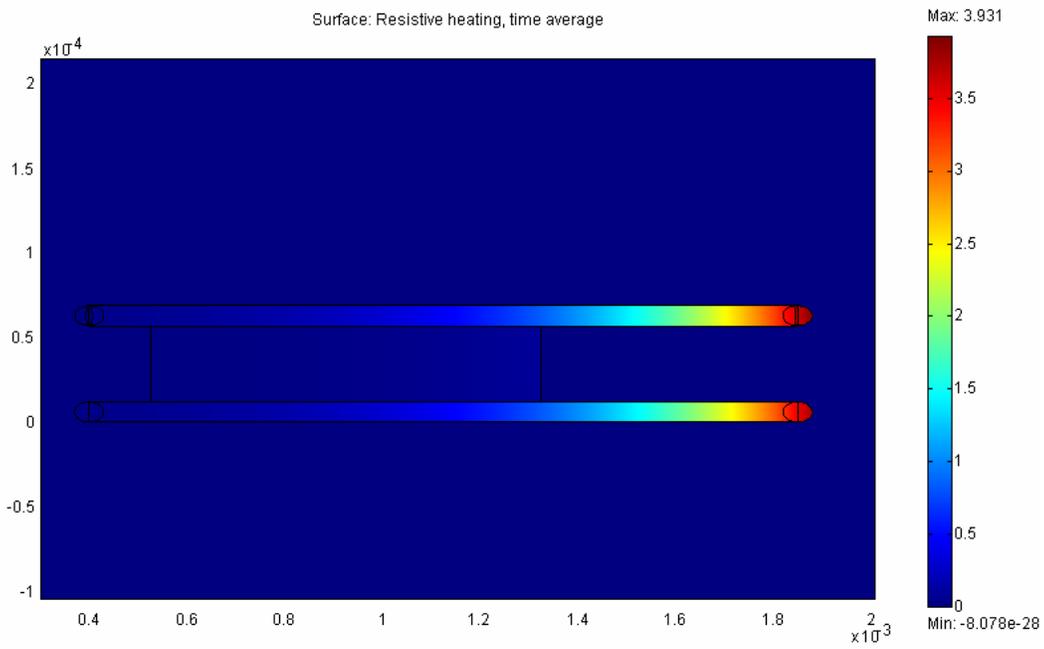


Figura 43: Resistividad magnética a 700kHz

### 3. Aplicación del proceso de inducción

Junto al Dr. Linke se ha desarrollado un posible sistema de sellado del orificio de llenado del sensor mediante soldadura por inducción. La soldadura consistirá en un anillo de PbSnAg que se sitúa encima de la aleación de AgPt que rodea el orificio. Encima se colocará una tapa y se aplicará el método de inducción sellando así el sensor. Los pasos a seguir durante el proceso serán entonces:

- Aplicación de flux sobre la el metal (AgPt) del gorro del sensor (en caso de ser necesario)
- Colocación del anillo de soldadura sobre el metal
- Colocación de la tapa sobre el metal y el anillo
- Se coloca la espira sobre el sensor a una distancia establecida
- Se presiona levemente la tapa con un palillo de cerámica
- Se presiona un pulsador induciendo la corriente al sensor.

Una vez explicado brevemente como será en principio el proceso para cerrar el orificio, pasamos a tratar los elementos que en él se verán envueltos.

En nuestro experimento se han utilizado los siguientes tipos de **flux** para limpiar de impurezas la aleación de plata y platino y favorecer la soldadura:

- Flux #5 RMA
- Flux Mini-Fluxer Stannol
- Flux BM1 RMA Almit
- Flux Stannol en pedazos
- Flux FC-NC-LT-a Indalloy

**La tapa** del sensor consta de la capa superior, la mayor en cuanto a tamaño, de cerámica, una capa de metal del mismo material que en la parte superior del sensor (AgPt) lo cual favorecerá la soldadura, y de un material dieléctrico que provoca que el metal de la tapa y el del gorro de cerámica no estén en contacto ya que entre ambas capas estará el anillo de soldadura. Como se puede observar en la fig. 40, se diseñan cuatro modelos diferentes de tapas.

A la hora de experimentar se utilizó el modelo número IV, que se diferencia de los otras en tener aislante en el centro además de en las esquinas.

Hay que notar que se dejan los laterales abiertos por si rebosa la soldadura (ver parte izquierda y derecha de la figura 44).

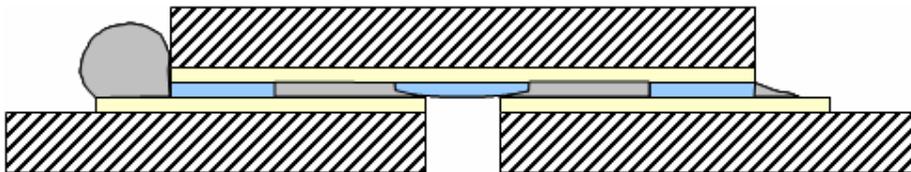


Figura 44: Reproducción del corte transversal del sensor.

El diseño de la tapa es cuadrado en lugar de circular simplemente por motivos de comodidad a estos niveles de experimentación, ya que resulta más sencillo trabajar con una cerámica cuadrada. Las tapas se obtienen a partir de unos platos o sustratos de 100 x 100 mm y que hay que cortar para obtener todas las tapas. Para ahorrar material y para facilitar la obtención de las tapas a partir del sustrato es mejor la forma cuadrada frente a la circular, aunque desde el punto de vista estético quede más elegante la segunda.

Los diseños de la tapa, además de las medidas mostradas en la figura 45, respetan las siguientes restricciones:

El grosor de la cerámica será de 635  $\mu\text{m}$ .

Tipo I: sólo AgPt1 en toda la superficie de un grosor de 12  $\mu\text{m}$

Tipos II, III y IV:

- AgPt1 toda la superficie de un grosor de 12  $\mu\text{m}$
- Dieléctrico 30 $\pm$ 5  $\mu\text{m}$

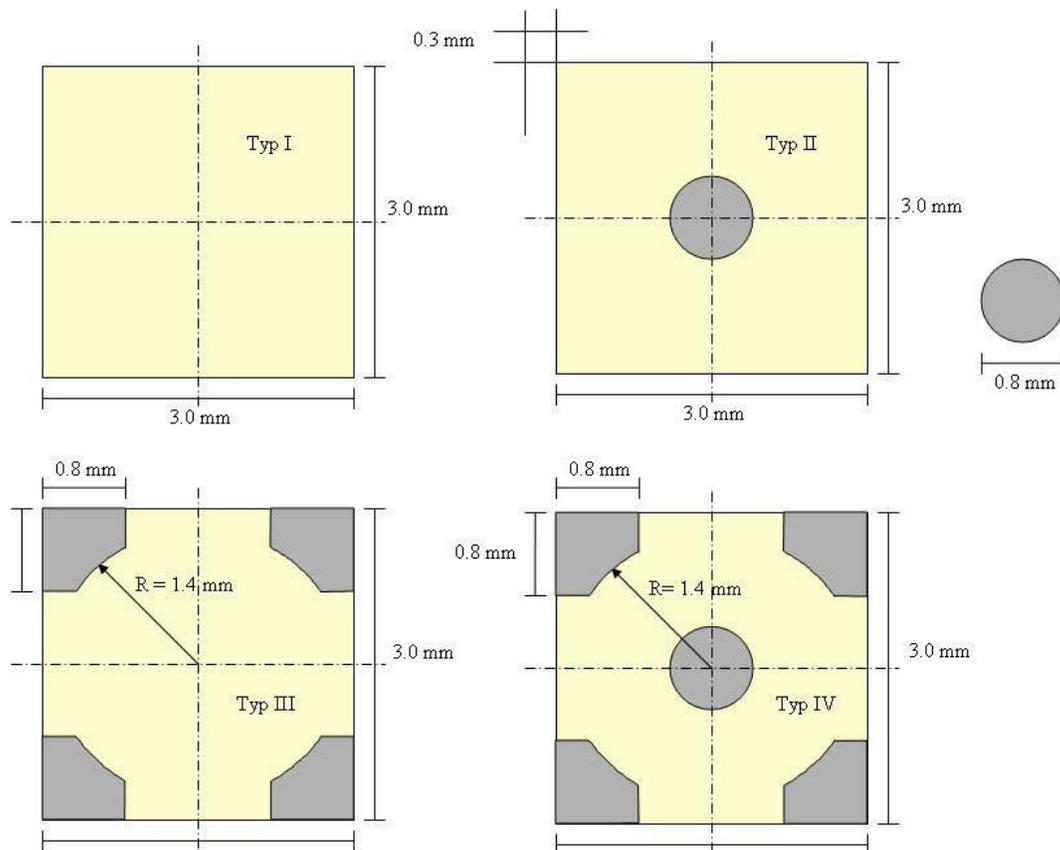


Figura 45: Modelos de tapas

A continuación se puede ver en la figura 46 varias tapas del tipo IV.

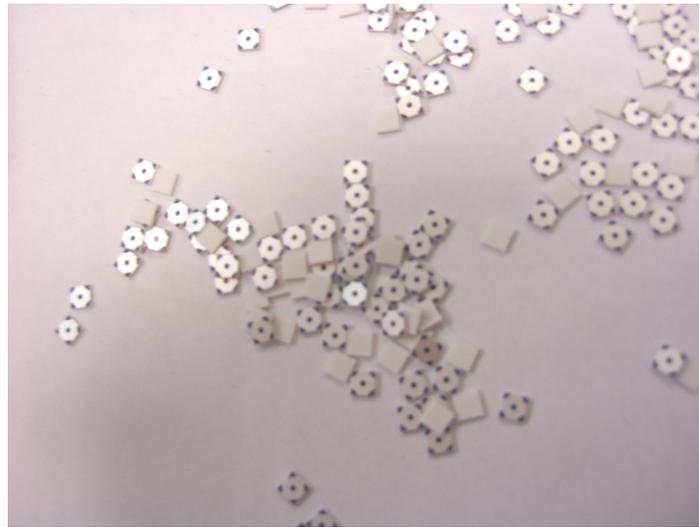


Figura 46: Varias tapas

**El anillo** es del mismo material que la soldadura que se usa hoy día pero se diseña con tales dimensiones que la cantidad de material utilizada es mucho menor. También hay que destacar que este anillo no contiene flux, por eso en los experimentos se añadirán distintos tipos de flux para probar sus efectos.

Una vez visto el diseño de la tapa, se calcula el anillo de soldadura. Teniendo en cuenta la altura que hay entre las dos metalizaciones como consecuencia del dieléctrico, y el diseño de la tapa se puede calcular qué volumen aproximado de soldadura se necesitará y de ahí definir las dimensiones del anillo.

Tenemos tres variables que se pueden modificar del anillo: el radio interno, el externo y la altura. Si se fijan los radios, tan solo nos quedará calcular la altura. El radio interno tiene que cumplir que sea menor que el radio imaginario que uniría las esquinas de dieléctrico de la tapa y el radio interno tiene que ser mayor que el radio de dieléctrico que se encuentra en el centro de la tapa.

Con ello, fijamos el radio mayor del anillo, **RMa=1'325mm**, y el radio menor del anillo, **Rma=0'575mm**.

Por otra parte se tienen el radio mayor de la tapa que comprobamos que tiene que ser mayor que el RMa, **RMb=1'4mm**, y el radio menor de la tapa que tiene que ser menor que el Rma, **Rmb=0'4mm**.

Aplicando una fórmula para calcular el volumen que cabría en la tapa, e igualando con la fórmula para el volumen del anillo donde se tiene la incógnita de la altura= $da$ , se obtiene:

$$V_A = \pi \cdot da \cdot (RMa^2 - Rma^2)$$

$V_B = db \cdot (A_{kr} + 8A_{ka})$  donde  $db$  es la altura de la tapa ( $db=30 \mu m$ ),  $A_{kr}$  es el área entre el radio menor y mayor de la tapa, y 8 veces  $A_{ka}$  es el área restante de la tapa que no está cubierto por aislante.

En las dos siguientes figuras se pueden apreciar el  $A_{kr}$  y las 8 veces el  $A_{ka}$ .

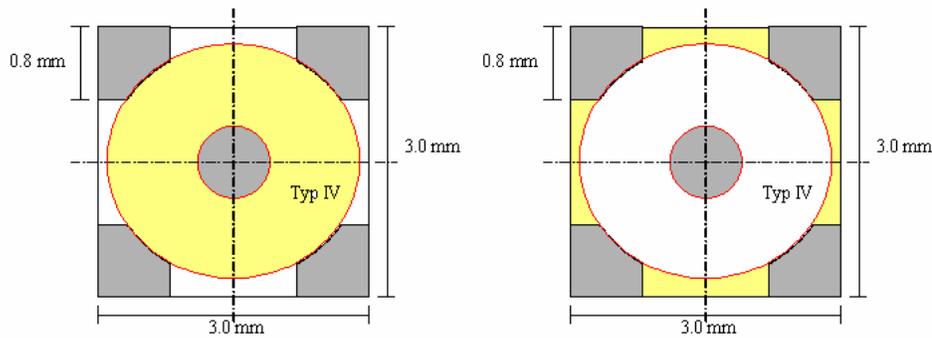


Figura 47: Áreas a cubrir por la soldadura

$$A_{kr} = \pi \cdot (R_{Mb}^2 - R_{mb}^2) = \pi \cdot 1'8 \text{ mm}^2$$

$$8 \cdot A_{ka} = \frac{0'7 \cdot 1'21}{2} + 0'29 \cdot 0'7 - \frac{\pi \cdot R_{Mb}^2}{12} = 8 \cdot 0'115 \text{ mm}^2$$

Y por último solo nos queda igualar el volumen de la tapa al del anillo para obtener la altura del anillo:

$$V_A = V_B$$

$$da = \frac{(\pi \cdot 1'8 + 8 \cdot 0'115) \cdot 30 \mu\text{m}}{\pi(1'325^2 - 0'525^2)} = 42.5 \mu\text{m}$$

Por tanto, las especificaciones de nuestros anillos de PbSnAg son 2'65mm el radio mayor, 1'05mm el radio menor y redondeando, 0'045mm de altura.

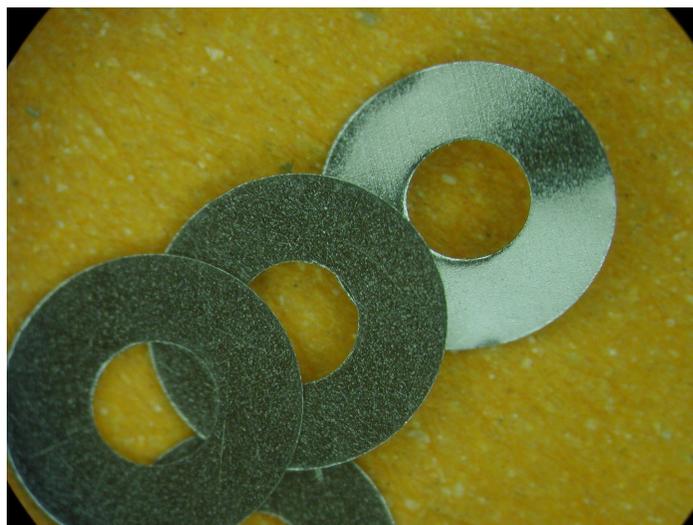


Figura 48: anillos de soldadura

Los últimos pasos del experimento vienen condicionados por nuestra máquina de inducción y la espira en él instalada. Los componentes básicos de un sistema de calentamiento por inducción son una fuente de alterna, una espira y la pieza a calentar.

- Factores clave a considerar para el calentamiento por inducción

Pieza de trabajo	Fuente de potencia	Espira
Características del material	Salida de potencia	Diámetros
Tamaño y forma	Frecuencia	Forma
Posición respecto a la espira	Requerimientos de la utilidad	Número de vueltas



Figura 49: Vista frontal del equipo de inducción

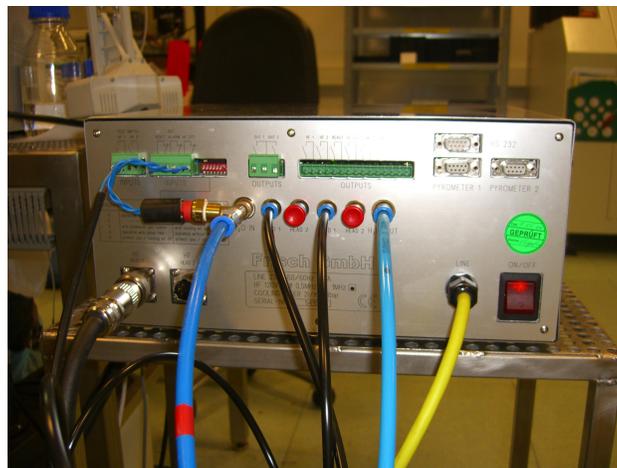


Figura 50: Vista trasera del equipo de inducción

La fuente envía una corriente alterna a través de la espira generando un campo magnético. Cuando la pieza se sitúa cerca de la espira, el campo magnético induce *corrientes eddy* en la pieza, generando una cantidad precisa de calor de forma localizada y limpia sin necesidad de contacto físico entre la espira y la pieza de trabajo.

En la imagen siguiente se puede observar el plato de pruebas sobre el mecanismo de enfriamiento y la espira utilizada durante el experimento



Figura 51: Colocación de la espira sobre el sensor

#### - Frecuencia operacional

Existe una relación entre la frecuencia de la corriente alterna y la profundidad de penetración en la pieza de trabajo. Bajas frecuencias de 5 a 30 kHz son efectivas para materiales gruesos que requieren una profundidad de penetración grande, mientras que las altas frecuencias son efectivas para piezas pequeñas o que demandan penetración débil. Cuanto mayor sea la frecuencia, mayor será la tasa de calor. Una buena analogía se puede encontrar cuando frotamos las manos para calentarnos, cuanto más rápido las frotamos, más calor producimos.

#### - Profundidad de penetración

La corriente inducida fluye de manera más intensa en la superficie y decae rápidamente bajo la superficie. Así, el exterior se calentará más rápido que el interior. Esto se describe como profundidad de penetración. La profundidad de penetración desciende cuando la resistividad desciende, o la permeabilidad o la frecuencia aumentan.

- Eficiencia del acoplamiento

El acoplamiento se refiere a la relación proporcional entre la cantidad de flujo de corriente en la pieza y la distancia entre la pieza y la espira. Un acoplamiento cercano aumenta el flujo de corriente y, con ello, aumenta la cantidad de calor producido en la pieza.

- La importancia del diseño de la espira

La espira de inducción está normalmente enfriada por agua. Es muy importante el tamaño y la forma de la espira (una o varias vueltas), helicoidal, redonda o cuadrada... Con un buen diseño de la espira, se consigue el patrón de calentamiento apropiado y la eficiencia del sistema de inducción se maximiza.

La espira se diseña de forma circular por una sencilla razón, la forma de nuestra pieza es circular (el anillo de soldadura) y por tanto el rendimiento será mayor que el de por ejemplo una espira cuadrada. Los equipos provistos por Frisch GmbH tienen un sistema de refrigeración por agua debido a las altas temperaturas a las que se somete la espira de cobre. Por experiencia, si no circulara agua por la espira a una presión de aproximadamente dos litros por minuto la espira se derretiría.



Figura 52: Tipos de espiras

- La fuente

La fuente de radiofrecuencia produce un campo magnético alrededor de la pieza enviando una corriente alterna a través de la espira. La salida de la fuente determina la velocidad relativa a la que la pieza se puede calentar. Por ejemplo, un proceso típico que puede completarse con una fuente de potencia de 3kW, podría ser realizado más rápido con una fuente de 5kW.

Nuestro sistema de calentamiento por inducción y la espira son los mostrados anteriormente en las figuras 49, 50 y 51. La empresa Frisch GmbH ofrece la posibilidad de utilizar dos generadores, una de 5kW y 480kHz y otra de 2kW y 700kHz.



