

Aplicaciones del calentamiento por inducción electromagnética en el procesamiento de PRFV



Por el Ing. Gabriel González
Consultor PRFV/Composites

El calentamiento por inducción electromagnética es un método para suministrar calor en forma rápida, consistente, limpia, controlable y eficiente para distintas aplicaciones de manufactura, sobre piezas o partes metálicas o de otros materiales conductores de la electricidad.

La inducción electromagnética

Los principios básicos de la inducción electromagnética son bien conocidos. Una corriente eléctrica que circula por un conductor en forma de bobina (inductor) genera un campo magnético en sus alrededores como se indica en la figura 1. La mayor intensidad del campo se da en el núcleo de la bobina, y depende de la fuerza de la corriente de excitación y del número de espiras de la bobina.

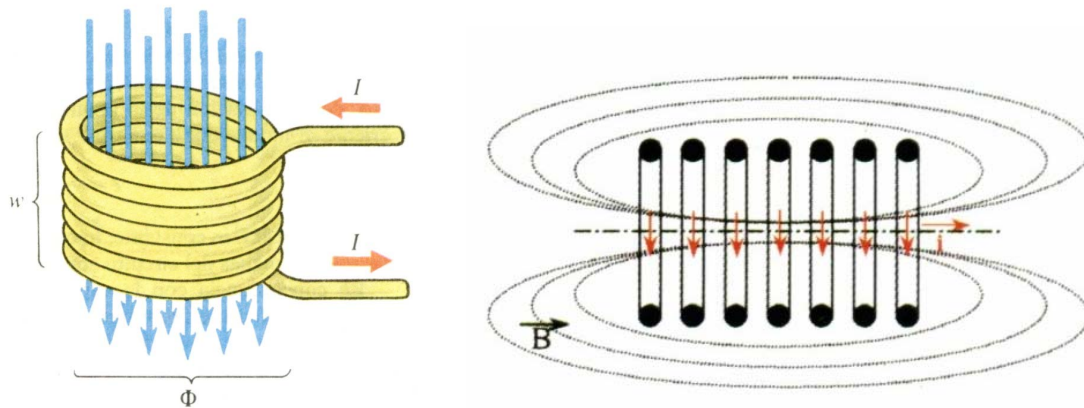


Figura 1.- Bobina y campo magnético generado al circular la corriente

Si se coloca un elemento de material ferromagnético dentro de un campo magnético alterno, se “inducen” corrientes eléctricas mayormente concentradas hacia la superficie, denominadas corrientes parásitas o de Foucault. Estas corrientes se cierran (neutralizan) dentro del mismo medio formando torbellinos, y son las responsables de la generación de calor por el efecto Joule (figura 2). El campo magnético alterno también produce sucesivas magnetizaciones y desmagnetizaciones en el material sometido al campo, que se traduce en sucesivos ciclos de histéresis, los cuales también producen pérdidas de energía electromagnética que se traducen en calor. Finalmente el calor se difunde al seno del elemento por conducción.

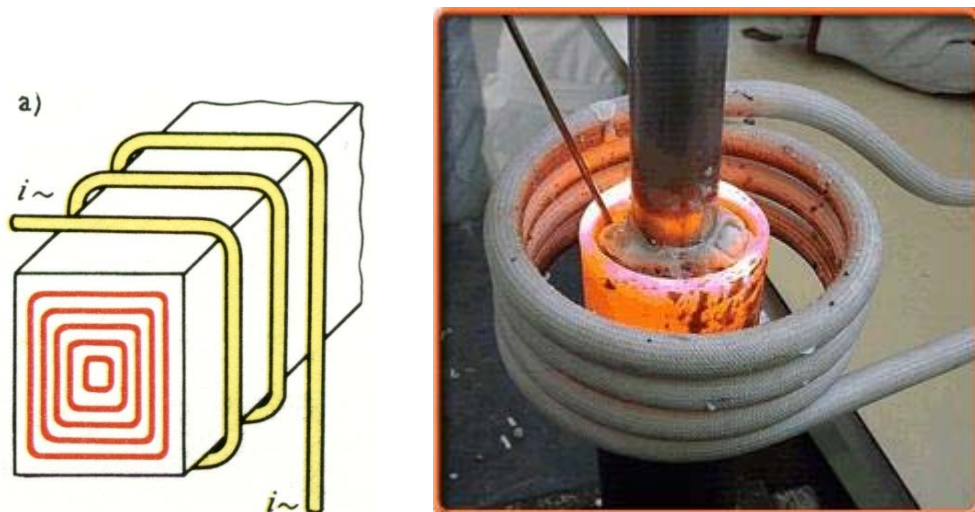


Figura 2.- Efecto de las corrientes parásitas: calentamiento por inducción.

En definitiva, lo que constituye un fenómeno indeseable en los circuitos eléctrico, en transformadores y motores, es decir, las pérdidas provocadas por la inducción electromagnética, se ha convertido en una herramienta de aplicación muy difundida a partir de los desarrollos en la tecnología del estado sólido. El uso de transistores ha permitido alcanzar oscilaciones o frecuencias del campo magnético tan amplias como desde 60 Hz hasta los 60 MHz, y por ende se pueden lograr temperaturas de miles de grados, con distinta profundidad de alcance sobre el cuerpo a calentar, en tiempos mínimos, con gran precisión y consistencia.

Las ventajas principales del calentamiento por inducción se resumen en:

- Ausencia de contacto físico
- Generación del calentamiento en el lugar requerido
- Ausencia de pérdidas en transferencias calóricas
- Rapidez y precisión
- Fácil automatización y control del ciclo de trabajo

Las aplicaciones más difundidas del calentamiento por inducción son las siguientes:

- Tratamientos térmicos: recocido, templado, endurecido superficial
- Fusión; Forjado en caliente
- Soldaduras de: bronce, termoplásticos.
- Expansión para embutido; Alivio de tensiones
- Aplicación de revestimientos; Curado o Secado

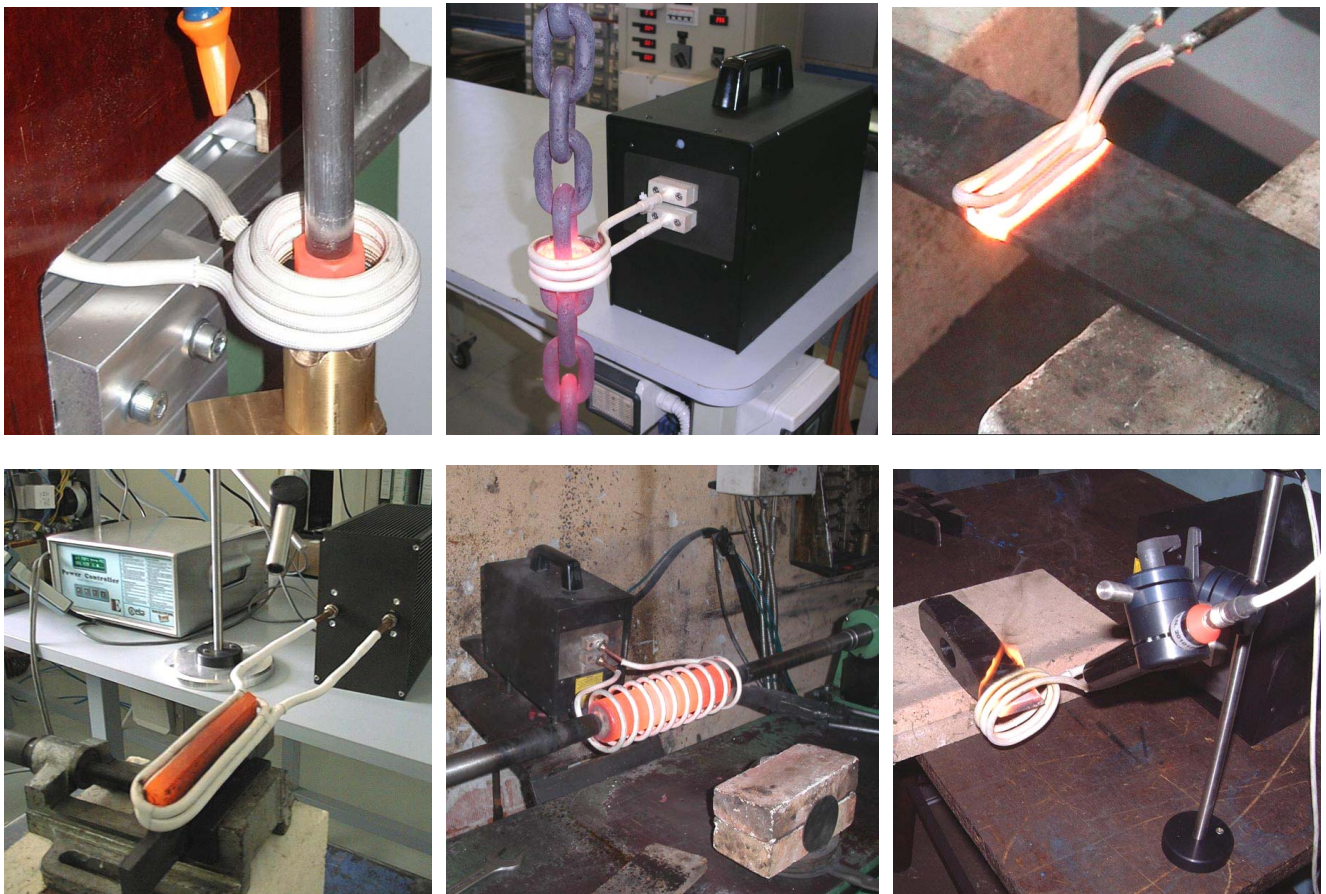


Figura 3.- Algunas aplicaciones ilustradas

Componentes de un sistema de calentamiento por inducción

Los componentes básicos de un sistema de calentamiento por inducción son: la fuente de potencia, la estación de calentamiento, el espiral inductor, y la pieza a trabajar o material a calentar (Figura 4).

a.- La fuente de potencia recibe la corriente alterna, normalmente 380-400V, que es rectificadora y regulada. Luego alimenta al convertidor de frecuencia, quien permite la generación del campo magnético en el espiral.

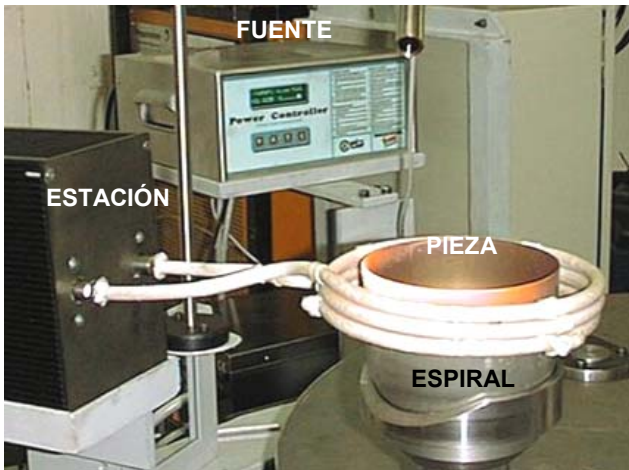


Figura 4. Componentes del sistema

Existe una estrecha relación entre la **frecuencia de operación** de la corriente que genera el campo y la **profundidad de penetración** sobre la pieza o material. Como se ha indicado, la corriente inducida que fluye sobre la pieza es más intensa en la superficie, y decae rápidamente bajo la superficie. Por ello, el exterior se calentará más rápido que el interior: el 80% del calor producido en la pieza se concentra en la piel exterior. Cuando mayor es frecuencia de operación, menor es la profundidad de penetración, es decir, más superficial es el efecto.

Las bajas frecuencias de 5 – 30 kHz son efectivas para materiales gruesos que requieren una penetración profunda del calor, mientras que las frecuencias mayores de 100 – 400 kHz son aptas para piezas pequeñas o para escasa penetración.

Para calentar piezas microscópicas existen en el mercado fuentes que operan hasta con 60 MHz. Por otra parte cuando mayor es la frecuencia, más rápidamente se genera el calor

La **potencia** de la fuente determina la velocidad relativa del calentamiento de la pieza. Los equipos de menores potencias son de 5-15 kW, y los mayores de 50-250 kW. Todos estos equipos, y los mayores principalmente, requieren la utilización de agua de enfriamiento, que circula en todo el equipo (convertor de frecuencia), incluso el espiral.

b.- La estación de calentamiento en la mayoría de las aplicaciones es una estación remota, como la de la figura 4 y 5a, vinculada a la fuente a través de un cable flexible. Puede distanciarse hasta 60 m de la fuente. Existen también equipos con la estación integrada a la fuente (Figura 5b).



Figura 5a.- Estación remota



Figura 5b.- Estación integrada

Las estaciones poseen una serie de capacitores de resonancia que tienen por finalidad ajustar la frecuencia y / o el voltaje de operación a la aplicación y material particulares. Las estaciones de calentamiento son enfriadas por circulación de agua. Son por lo tanto, las terminales de conexión eléctrica y de agua de enfriamiento para los tubos del espiral.

c.- El espiral inductor normalmente está fabricado con tubos de cobre enfriados por agua, normalmente de diámetros entre 1/8" y 3/16", y el tamaño y la forma del mismo dependen de la configuración de la pieza a calentar y de las variables del proceso particular. Un adecuado diseño del espiral es crítico para lograr un perfil de calentamiento apropiado y una máxima eficiencia de la energía consumida, sin sacrificio de la facilidad de inserción y extracción de la pieza a trabajar.

Los espirales inductores pueden ser de lazo simple o múltiple, de perfil helicoidal, redondo o rectangular, internos o externos, con una variedad infinita de espiralados especiales para calentamientos localizados o para superficies irregulares y complicadas (Figura 6).

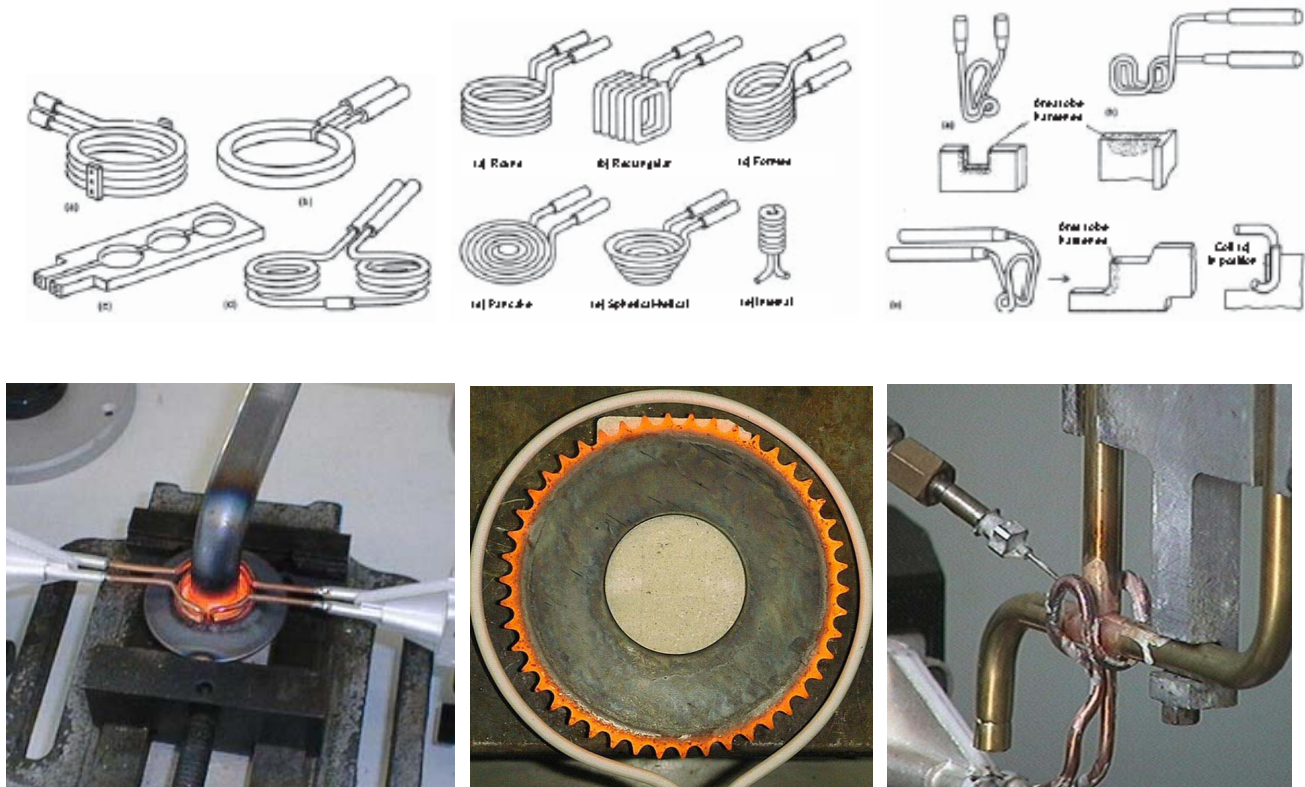


Figura 6.- Distintas posibilidades de configuración de espirales inductivos.

d.- Los materiales magnéticos, particularmente los ferromagnéticos, se calientan más fácilmente que los materiales no-magnéticos (diamagnéticos), debido al calentamiento *adicional* por el efecto de histéresis. La diferencia entre ambos tipos de materiales es que los magnéticos, ante la presencia de un campo magnético exterior, generan su propio campo magnético que refuerza el exterior (imantación). Al variar el campo magnético exterior, la imantación remanente produce la histéresis, que se puede entender como la resistencia natural de los materiales al cambio rápido en el sentido del flujo magnético. Por el contrario, los materiales diamagnéticos generan en sí mismo un campo magnético opuesto, que debilita el campo magnético exterior. En definitiva, y debido a la estructura atómica de las sustancias, todos los materiales poseen propiedades magnéticas.

La medida que representa la resistencia de los materiales a seguir la alternancia de un campo magnético que lo excita, es la **permeabilidad magnética**. Los materiales denominados no-magnéticos o diamagnéticos tienen valores de permeabilidad alrededor de 1. Para los ferromagnéticos oscila entre 100 y 500. A igualdad de otros parámetros del proceso de inducción magnética, a mayor permeabilidad, menor profundidad de penetración del calentamiento sobre la superficie, y mayor rapidez de calentamiento (calentamiento adicional por histéresis).

Otro aspecto a tener en cuenta en relación a la pieza o material a trabajar es la distancia entre ésta y el espiral inductor. Cuando este apareamiento es más cercano, se induce un flujo de corriente mayor sobre la superficie inducida, y por ende, se incrementa la cantidad de calor producida.

Si bien el calentamiento por inducción es usado normalmente sobre materiales ferromagnéticos, es posible el calentamiento de materiales plásticos y otros no-magnéticos, de manera eficiente y rápida, haciendo uso de **materiales susceptibles** que sean magnéticos (metales). El material susceptible es utilizado para transferir el calor a la pieza o material objetivo por medio de la conducción y/o radiación térmica. Los materiales normalmente utilizados como susceptibles son el grafito, Molibdeno, carburo de silicio, acero inoxidable, Niobio, Aluminio y otros metales. Algunas aplicaciones donde se usan materiales susceptibles son:

- Fusión de materiales no conductores como vidrio
- Calentamiento de fluidos en tuberías
- Sellado de plásticos
- Fabricación con termoplásticos reforzados
- Curado de adhesivos y secado de pinturas.

Se utilizan fuentes de energía con frecuencias en el rango de las radiofrecuencias (100-600 kHz) y con potencias entre 1-20 kW, dependiendo de la pieza y la aplicación particular. La rampa de ascenso de la

temperatura puede ser fácilmente controlada a través de pirómetros ópticos o termocuplas, formando un sistema de control de lazo cerrado.

Aplicaciones 1: Curado acelerado de adhesivos epoxi

Objeto: adherir una vaina plástica a un tubo de cartón prensado por medio de un adhesivo epoxi, en un proceso continuo de alta productividad.

Ciclo de curado: alcanzar 200 °C y mantenerlos durante 6 minutos.

Proceso: se utiliza un tarugo de material susceptible (acero) para transferir el calor al adhesivo de la pieza. El tarugo está inserto en una base plástica aislante para su adecuada ubicación dentro del espiral inductor (Figura 7a). En la figura 7b se observa el herramental en el sitio de producción. Se trata de una mesa rotativa con 30 tarugos de acero equidistantes entre sí sobre el perímetro de la mesa. Las piezas son cargadas sobre los tarugos en una estación de carga, y en el espiral inductor calienta los tarugos a 230 °C en 4 segundos. Mientras los tarugos se alejan del inductor, el calor se va transmitiendo al adhesivo (y al aislante plástico). Al terminar el ciclo, la pieza se descarga y comienza un nuevo ciclo con una nueva pieza en la zona de carga. Como los tarugos metálicos retienen parte del calor en cada ciclo, un pirómetro óptico mide la temperatura del tarugo justa antes de ingresar al espiral inductor. El sistema de control de lazo cerrado determina la cantidad de energía que el inductor debe brindar para elevar la temperatura del tarugo nuevamente a 230 °C, en cada caso.

Equipo: fuente de 3kW, frecuencia de operación 186 kHz, estación de calentamiento remota, interfaces de comunicación RS-485.

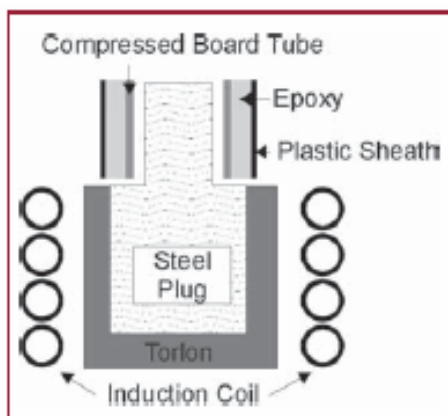


Figura 7a.- Tarugo metálico

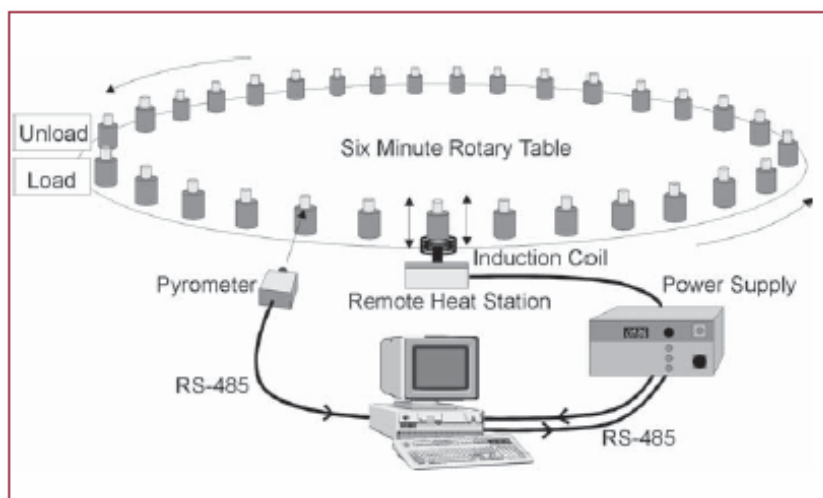
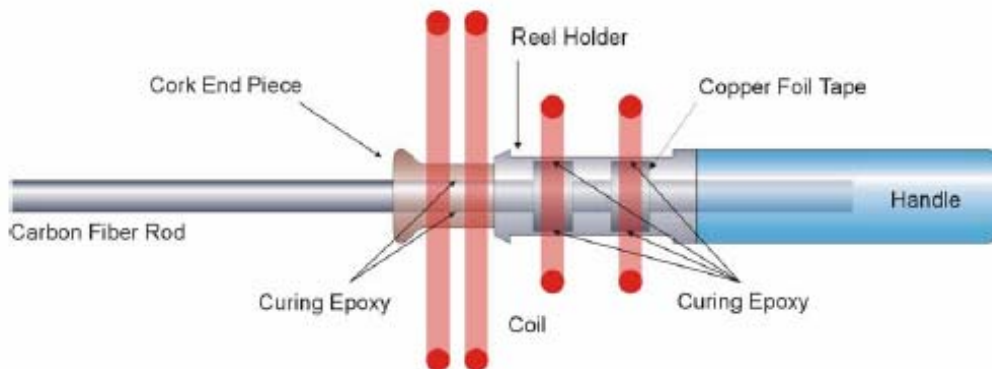


Figura 7b.- Herramental y lazo de control

Objeto: reducir el ciclo de curado de 90 minutos de un adhesivo epoxi, para pegar un tope de corcho y el porta-reel a una caña de pescar de fibra de carbono.

Ciclo de curado: alcanzar 150 °C y mantenerlo durante 25 seg., con un período de enfriamiento de 45-60 seg.

Equipo: fuente de 1kW, frecuencia de operación 13.5 MHz



Aplicaciones 2: Cage System ®

Objeto: acelerar los procesos de curado de materiales compuestos en molde cerrado (metálicos) de media y alta productividad: SMC, RTM, GMT, con un uso más eficiente de la energía aplicada. El calentamiento superficial, permite un rápido enfriamiento del molde. El rápido calentamiento evita la necesidad de un precalentamiento del molde. Un preciso control de temperatura permite mantener una temperatura de flujo del compuesto óptima durante el ciclo, lo que permitiría el uso de menores presiones de operación.

Proceso: el principio del Cage System ® desarrollado por la firma *Roctool* se basa en las dos mitades del molde separadas entre sí por el material compuesto, para que la inducción electromagnética rodee la superficie completa en ambas caras, según se muestra en las figuras 8 y 9.

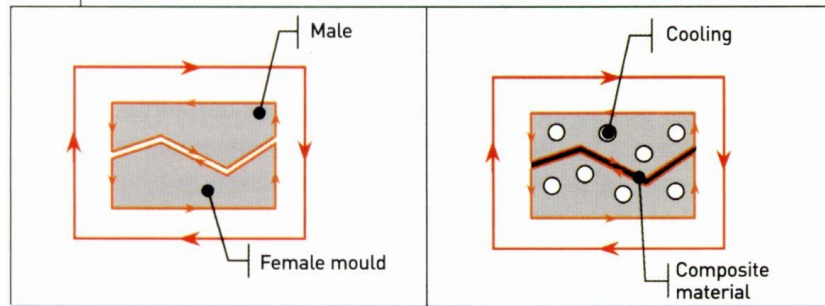
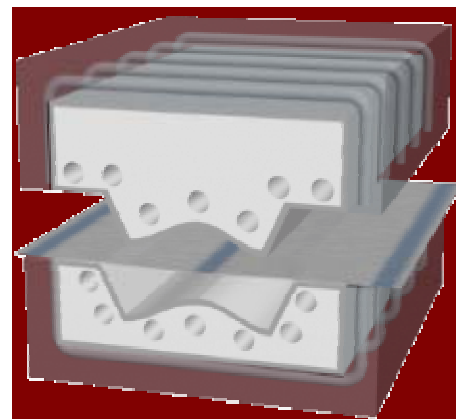


Figura 8.- Principio de operación del Cage System ®.

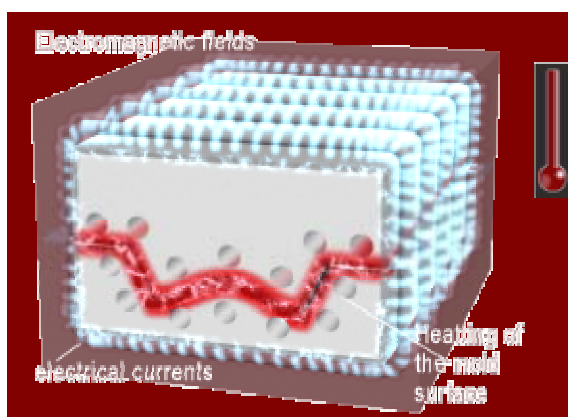
El principio descrito representa una aplicación genérica, y como tal se desarrolla la solución para cada caso particular. El equipo de producción específico es el sistema generador del campo magnético, la unidad de enfriamiento y por supuesto el molde, de aleación metálica particular con su sistema de enfriamiento por agua, y con el espiral inductor integrado en su interior (figura 10).



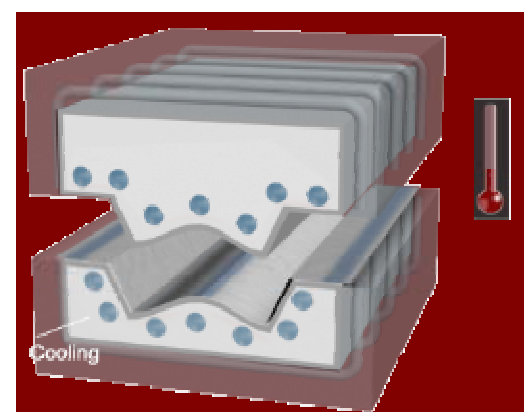
a.- Molde frío, abierto en posición inicial



b.- Colocación del compuesto de moldeo



c.- Cierre, aplicación del campo magnético, y calentamiento



d.- Enfriado y apertura del molde

Figura 9.- Etapas del proceso de moldeo con el Cage System ®

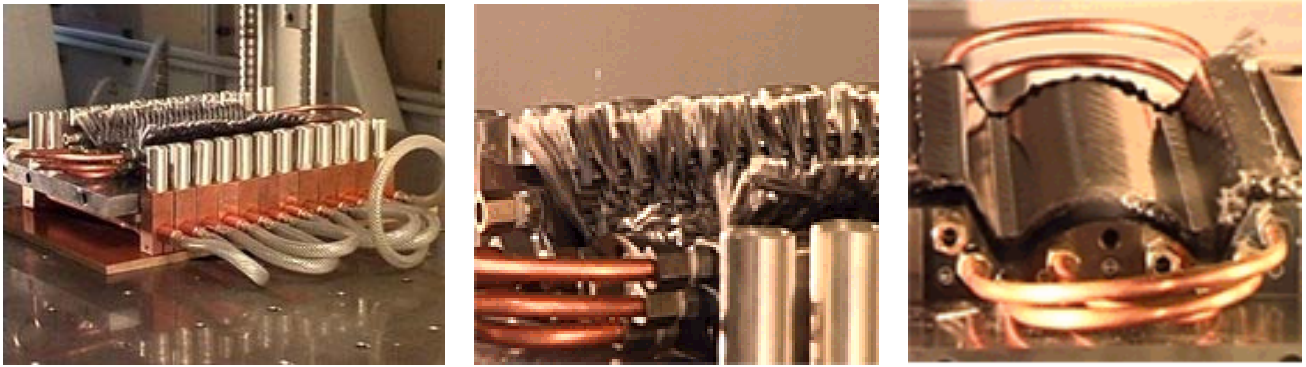


Figura 10a.- Molde del Cage System ® (mitad inferior) y detalles.

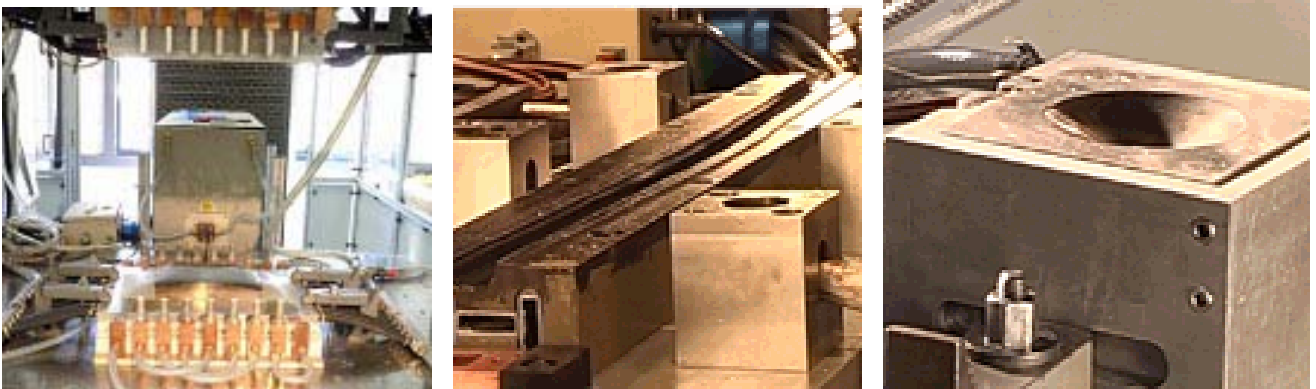


Figura 10.- Distintos molde del Cage System ® (mitad inferior).

Equipo: la potencia de la fuente depende de la aplicación específica; la frecuencia de operación oscila alrededor de los 100 kHz; profundidad de penetración del campo bastante menor de 1 mm, temperatura alcanzada de hasta 400 °C.

Aplicaciones 3: mejora del curado en Filament Winding

Objeto: acelerar el proceso de curado en fabricaciones por enrollado de filamentos, después de producida la gelificación (tiempo de gel a pico exotérmico), y simultáneamente mejorar la calidad y grado de avance del curado.

Proceso: el espiral inductor forma una pantalla móvil que se desplaza axialmente a unos 5-10 cm de la superficie del molde metálico (figura 11), una vez gelificada la pieza cilíndrica. Posee además, un desplazamiento radial para ajustarse a los distintos diámetros a producir. El calor inducido permite incrementar la temperatura de la superficie del molde fácilmente a unos 100-120 °C, con lo cual se acelera notablemente el curado, aplicando además el calor desde el interior del laminado, lo que contribuye a la no formación de ampollas.

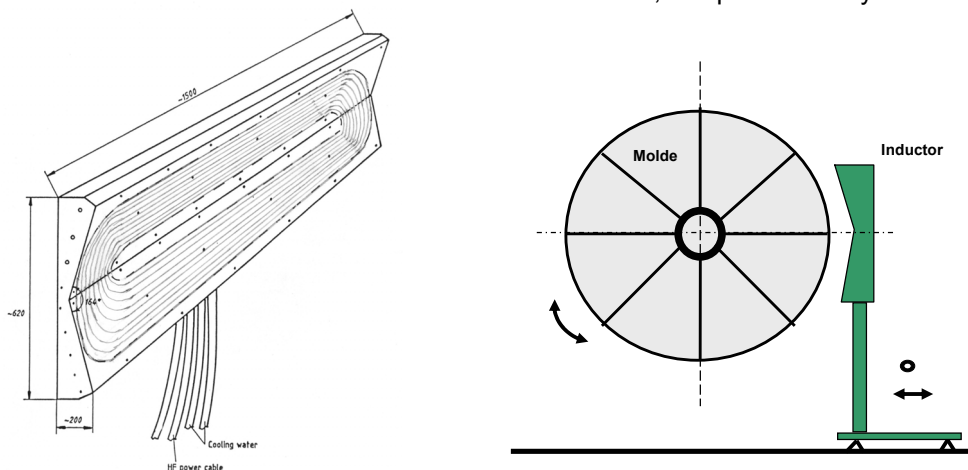


Figura 11.- Esquema del espiral inductor y su ubicación en Filament Winding.

El uso del calor por inducción permite combinar un curado a temperatura ambiente, con un curado a alta temperatura, aprovechando las ventajas de ambos sistemas. Para ello se usan catalizadores mezclas: uno que actúa a temperatura ambiente (Mekp, AAP), que actúa durante la gelificación y durante el período de inducción de la exotermia, y otro peróxido de alta temperatura (PBO, TBPB) que se activa cuando la temperatura de la masa alcanza los 80-90 °C (en presencia de cobalto), al aplicar el calor por inducción (figura 12). Estas mezclas de peróxidos no se refieren a mezclas producidas en el taller, sino que se trata de mezclas obtenidas del reactor por el fabricante de los peróxidos. Una mezcla de aplicación probada es el producto Trigonox 269 de Akzo, que está compuesto por 2 partes de AAP y 1 parte de TBPB, al 60% en diluyente.

Curvas de Curado - Proceso FW

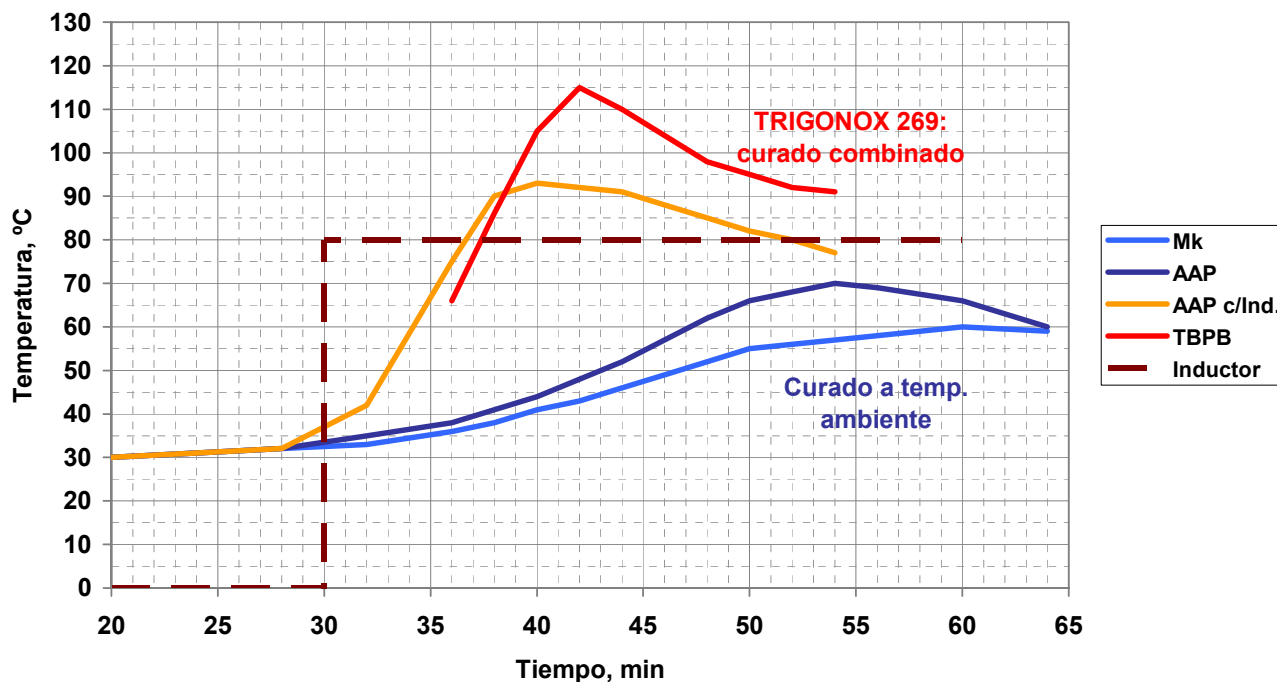


Figura 12. Gráfico esquemático de curados comparativos

Equipo: potencia a la salida del convertidor de frecuencia 12 kW máximo, frecuencia de operación máxima de 100 kHz, agua de enfriamiento 5 l/min (estación de calentamiento más inductor), presión de 3 a 8 bar. Temperatura máxima de operación limitada por proceso a 120 °C sobre el laminado; temperatura de corte de 140 °C. El espiral inductor de esta aplicación tiene forma de pantalla o parrilla de unos 60 x 150 cm, contando con unas 20 espiras, y va montado sobre un gabinete de bakelita.

Referencias

Ameritherm Inc, EEUU, www.ameritherm.com

CEIA (Costruzioni Elettroniche Industriali Automatismi) Spa, Italia, www.ceia.net

Superior Induction Company, EEUU, www.superiorinduction.com

EFD Induction ASA Group, Noruega, www.efd-induction.com

Roctool SA, Francia, www.roctool.com

Mayor información:

Ing. Gabriel N. González
 Consultor en PRFV/Composites
 Tf. 0351-4713489
 e-mail: gabrielng2005@gmail.com