

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Manufactura Sustentable de Recubrimientos Ferromagnéticos para
Utensilios de Cocinas de Inducción**

**Diego Alejandro Albuja Vaca
Jorge Andrés León Casares**

Alfredo Valarezo, Ph.D., Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Quito, diciembre 2014

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

Manufactura Sustentable de Recubrimientos Ferromagnéticos para Utensilios de Cocinas de Inducción

Diego Alejandro Albuja Vaca

Jorge Andrés León Casares

Alfredo Valarezo, Ph.D.
Director de la tesis
y Miembro del Comité de Tesis

Lorena Bejarano, Msc.
Miembro del Comité de Tesis

Nelson Herrera, Ingeniero
Miembro del Comité de Tesis

Alfredo Valarezo, Ph.D.
Director de Ingeniería Mecánica

Ximena M. Córdova, Ph.D.
Decana de la Escuela de Ingeniería

Quito, diciembre 2014

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: Diego Alejandro Albuja Vaca

C. I.: 1719114033

Lugar y fecha: Quito, diciembre de 2014

Firma: _____

Nombre: Jorge Andrés León Casares

C. I.: 1720577749

Lugar y fecha: Quito, diciembre de 2014

DEDICATORIA

A mis padres Byron y Carmen, y a mi hermano David por su constante apoyo a lo largo de mi vida académica y personal, siempre brindándome su apoyo ante cualquier adversidad presente.

Diego

Este proyecto de Tesis está dedicado a mis padres Jorge y Yanitzia y a mi hermano Gabriel por su apoyo incondicional en cada momento durante la carrera, no solo durante los éxitos sino sobre todo en los momentos más adversos ya que nunca dejaron de creer en mí.

Jorge

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios y a la Virgen por todo lo que hemos recibido durante nuestra vida académica y personal y por permitirnos culminar la carrera con éxito..

A nuestro Director de Tesis Dr. Alfredo Valarezo por su apoyo y guía tanto como profesor y director durante el transcurso de nuestra carrera y desarrollo de este proyecto de tesis.

A nuestros asesores Lorena Bejarano y Nelson Herrera por prestarnos su tiempo y conocimiento cada vez que lo requerimos.

A Imetca por permitirnos realizar las pruebas necesarias dentro de sus instalaciones y brindarnos su apoyo.

RESUMEN

La implementación de las cocinas de inducción, en los hogares ecuatorianos de todo nivel socio-económico, como principal método para cocinar alimentos y la eliminación de los subsidios al gas doméstico, no solo van a provocar que se realice un cambio generalizado de las cocinas de gas por las cocinas de inducción sino, también, que los artículos para cocinar van a ser reemplazados a corto plazo.

Para evitar que las familias tengan que verse obligadas a renovar y comprar costosos artículos de cocina de acero inoxidable o hierro (los cuales son ferromagnéticos), o con placas embebidas de acero en aluminio, en este proyecto se propone aplicar un recubrimiento de una delgada capa de material ferromagnético a los artículos de aluminio que actualmente ya poseen las familias o que se producen localmente, con el fin de lograr reducir los costos de fabricación y por lo tanto evitar gastos excesivos a las familias que no puedan afrontarlos. La propuesta permite mantener la tecnología de producción local de artesanos y otras empresas, y reducir la huella de carbono que el reciclaje de los millones de utensilios actualmente en uso en el Ecuador provocaría, por ejemplo. reciclaje de aluminio, importación de acero inoxidable, etc.

Lo que se desea con este proyecto es optimizar la aplicación de esta capa de material ferromagnético y determinar el mínimo espesor requerido para lograr el calentamiento por inducción. En lo que respecta al desempeño se desea encontrar un equilibrio adecuado entre temperatura, tiempo de calentamiento y espesor de la lámina de material ferromagnético. De esta manera se espera que el recubrimiento logre temperaturas y tiempos aceptables de calentamiento pero con la menor cantidad de material depositado para disminuir al mínimo el costo de fabricación. El proceso utilizado para depositar el material es el termorociado por arco eléctrico.

Para verificar el desempeño del recubrimiento aplicado se realizan pruebas cualitativas y cuantitativas a las probetas (ollas de aluminio) a las cuales se les aplica los distintos espesores de recubrimiento. Entre las pruebas cualitativas se incluye la verificación de la adherencia del recubrimiento (que no exista delaminación) durante la exposición a temperatura y la evaluación estética del acabado del utensilio. Entre las pruebas cuantitativas se cuenta la medición de la resistencia a la corrosión, definición de las curvas de temperatura vs tiempo para cada uno de los recubrimientos y verificación de la porosidad y adherencia en la microestructura. El espesor óptimo es de 0.65 mm compuesto por 0.6 mm de acero de bajo carbono y 0.05 mm de acero inoxidable martensítico. Con este espesor, se obtiene un desempeño equivalente entre los utensilios desarrollados de aluminio con recubrimientos versus aquellos de aluminio con placas incrustadas de acero inoxidable de producción comercial.

ABSTRACT

Nowadays, the changes in the Ecuadorian production policies have forced the citizens to get, in the next few years, induction cookers to reduce the consumption of subsidized and costly domestic gas. The current cookware used by the Ecuadorians cannot be used for induction cookers as most of it, is made out of aluminium and not of ferromagnetic materials. For this reason, there will be an involved cost during the period of this change. The purpose of the present project is to find an alternative way of cookware production for induction cookers. The design is based on the deposition of a ferromagnetic coating by Arc Spraying on the bottom of aluminium cookware at a minimum ferromagnetic thickness that meets with the technical requirements, as well as economical needs. This new manufacturing innovation will benefit both producers and consumers.

The implementation of induction cookers in the Ecuadorian households as the principal way of food cooking, and the elimination of the domestic gas subsidy, will force the widespread change in the cookware the Ecuadorians use. To avoid families to be forced to renew and buy expensive cookware made of stainless steel or steel (these materials are ferromagnetic) or with steel plates embedded in aluminum, the purpose of this project is to apply a thin coating of a ferromagnetic material to the actual cookware or to the cookware produced in the country with the intention of reducing costs of production and avoid excessive expenses to the families that can't afford new cookware. The proposal of the project allows maintaining the local artisan's production and reduce the carbon footprint of recycling millions of cookware that are in use today.

The goal of this project is to optimize the application of this layer of coating of a ferromagnetic coating and determine the minimum thickness required to achieve standard heating by induction. In terms of development, the goal is to find an optimal performance between temperature and time of heating, and thickness of the layer of ferromagnetic material. It is expected the coating to accomplish temperatures and times of heating acceptable but with the minimum amount of material deposited to decrease the production cost to the minimum.

To verify the performance of the applied coating, qualitative and quantitative tests are carried out to the specimens with different coating thicknesses. The qualitative tests include the verification of adherence of the coatings (delamination) during the temperature exposure and the aesthetics evaluation of the finished cookware. The quantitative tests include test of corrosion resistance, temperature vs time heating performance, evaluation of porosity in the microstructure, etc. The optimal thickness is of 0.65 mm compound of 0.6 mm of low carbon steel and 0.05 mm of martensitic stainless steel. With this coating thickness, the aluminium sprayed cookware performs similarly to the aluminium cookware with stainless steel plates embedded.

TABLA DE CONTENIDO

Dedicatoria	5
Agradecimientos	6
Resumen	7
Abstract	8
Tabla de contenido	9
1.1 Antecedentes	12
1.2 El Problema	15
1.3 Soluciones Propuestas	16
1.4 Viabilidad	17
1.5 Objetivos	17
1.5.1 Objetivos Específicos	18
2.1 Inducción Magnética	19
2.1.1 Calentamiento por inducción	22
2.1.2 Efecto piel	26
2.2 Transferencia de Calor	29
2.2.1 Conducción	29
2.2.2 Convección.....	30
2.2.3 Radiación.....	31
3. 1 Materiales y Procesos	32
3.1.1 Arc Spray – Termorociado por arco eléctrico.....	32
3.1.2 Dispositivo experimental para evaluar el calentamiento de los utensilios de prueba	32
3.1.3 Proceso de Maquinado.....	33
3.1.4 Dispositivo experimental para evaluar la corrosión	33
3.1.5 Microscopía	33
3.2 Metodología de Modelado y Experimental	34
3.2.1 Modelado Comsol.....	34
3.2.2 Experimentación Aditiva	41
3.2.3 Corrosión.....	43
3.2.4 Metalografía.....	45
4.1 Resultados de Simulaciones	48
4.2 Resultados Experimentales	56
4.3 Resultados Producto Final	59
4.4 Análisis de Corrosión y Metalografía	61
4.5 Análisis de Costos	66
5. Conclusiones	72
6. Recomendaciones	73
7. Referencias	75

TABLAS

Tabla 1: Costo Metalización Olla	67
Tabla 2: Tabla de ingresos de un operador	68
Tabla 3: Tiempos para cada proceso del Metalizado	69
Tabla 4: Costos directos e indirectos	69

FIGURAS

Figura 1: Fabricación de ollas por método de repujado vs método de termorociado	14
Figura 2: Principio Físico de Inducción (4)	20
Figura 3: Principio de Inducción aplicado a cocinas	20
Figura 4: Ciclo de Histéresis Magnética para hierro blando (9)	25
Figura 5: Profundidad de Piel o Skin effect (14)	27
Figura 6: a) Variación Corriente vs Profundidad. b) Variación Densidad de Potencia vs Profundidad (10)	28
Figura 7: Geometría de disco más conductores utilizada para la simulación	34
Figura 8: Circuito eléctrico de Potencia de una Cocina de Inducción (7)	36
Figura 9: Mallado del disco acero, disco de aluminio, conductores y aire circundante	40
Figura 10: Gráfica 3D de la distribución de temperatura para un recubrimiento de 0,4mm en 480 segundos,	41
Figura 11: Montaje para desarrollar las pruebas térmicas a la olla con el recubrimiento.	42
Figura 12: (A)Preparación superficial de la base de la olla por medio de remoción de material con amoladora. (B)Resultado de preparación superficial de la olla con amoladora. (C)Marcador a base de aceite para realizar la preparación de los bordes externos. (D)Resultado de preparación de los bordes externos de la base de la olla con el marcador a base de aceite. (E)Deposición del recubrimiento en la base de la olla. (F)Resultado de deposición del recubrimiento en la base de la olla. (G) Olla posterior a acabado superficial por medio de lija.....	43
Figura 13: Probetas montadas en la cámara salina	44
Figura 14: (A)Probeta rugosa 1. (B)Probeta lisa. (C)Probeta rugosa 2. (D)Probeta acero bajo carbono	45
Figura 15: (A) Corte de las probetas con sierra de precisión. (B) Resina y endurecedor para realizar la mezcla para fácil manipulación de las probetas. (C) Probetas montadas en la mezcla de resina y endurecedor. (D) Preparación de probetas para el microscopio por medio de lijado. (E)Preparación de probetas por medio de pulido. (F)Montaje de probetas en el microscopio para su inspección.....	47
Figura 16: Curvas temperatura vs tiempo para varios espesores de recubrimiento.....	49
Figura 17: Diferencia en la transferencia de calor en un placa gruesa (izq) con una placa delgada (der).....	51
Figura 18: Curvas temperatura vs tiempo para: recubrimientos más relevantes (izq), recubrimiento + aluminio (der)	52
Figura 19: Densidad de Corriente inducida vs espesor del disco de acero y de aluminio para espesor 0.3mm (arriba) y 0.6 mm(abajo)	54
Figura 20: Curvas temperatura vs tiempos experimentales con varios espesores de recubrimiento: sin agua (izq), con agua (der)	56

Figura 21: Comparación curvas temperatura vs tiempo P1 vs P2 vs UMCO: con agua (izq), sin agua (der).....	60
Figura 22: Masa perdida por centímetro cuadrado vs tiempo de exposición en la cámara salina para las probetas; acero bajo carbono, lijada, rugosa 1, rugosa 2.....	62
Figura 23: curvas tasa porcentual de masa vs tiempo de exposición en la cámara salina para probetas; acero bajo carbono, lijada, rugosa 1, rugosa 2.....	62
Figura 24: Microestructura de probeta rugosa 1 sometida a la cámara salina.....	63
Figura 25: Microestructura de probeta rugosa 2 sometida a la cámara salina.....	64
Figura 26: Probeta lisa sometida a la cámara salina.....	64
Figura 27: Probeta rugosa sin ser sometida a la cámara salina.....	65
Figura 28: Acumulación de sal debido a filtración presente en la interface entre el material base aluminio (izquierda) y en el recubrimiento de acero (derecha)	66
Figura 29: Olla fabricada de acero inoxidable (izquierda) y Olla con incrustación de acero inoxidable (derecha).....	70

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Considerando la capacidad económica del ecuatoriano promedio y el costo de los nuevos artículos de cocina (incluyendo las nuevas cocinas de inducción y utensilios: ollas, sartenes, etc), las economías familiares se verán afectadas en la transición del cambio de matriz energética. Es importante encontrar una manera de reducir los costos involucrados de la renovación de utensilios de cocina. Por esta razón; la investigación que se realiza en este proyecto brinda nuevas opciones de fabricación, que en primera instancia, deben ser económicamente más atractivas para los consumidores ecuatorianos y para los fabricantes de estos artículos.

Por otro lado, no solamente las familias se benefician con este proyecto sino que también los productores artesanales de cocinas u ollas a los cuales les puede ser más conveniente aplicar el método que se expone en este proyecto que adquirir costosas máquinas, que en muchos casos no lo van a poder hacer debido a su nivel de ingresos.

Empresas grandes de producción de utensilios de aluminio están adaptando su tecnología y migrando en muchos casos a utilizar maquinaria capaz de trabajar con acero inoxidable (material de mayor resistencia y rigidez mecánica- casi tres veces el módulo de elasticidad- E del aluminio: $E_{inox} = 180$ GPa, $E_{Al} = 69$ GPa y cuatro/cinco veces el esfuerzos de fluencia $S_{y-inox} = 520$ MPa, $S_{y-Al} = 20-120$ MPa). Esto representa una cuantiosa inversión, que productores artesanales son incapaces de adaptar, puesto que su producción actual de ollas de aluminio se basa en la técnica de repujado (conformado mecánico utilizando fundamentalmente, la fuerza del operador y ventajas mecánicas como palancas), ver Figura 1.

La solución que se plantea en este proyecto, estima que los productores de ollas artesanales puedan continuar produciendo utensilios con la misma técnica actual y fácilmente adoptar la técnica de depósito de recubrimientos, en este caso por termorociado (el *termorociado* es una técnica de manufactura aditiva, en la que material particulado e inyectado en una flama de alto poder calórico, que funde el material y lo proyecta contra un substrato, formándose una capa de material sobre la superficie rociada), ver Figura 1.

Otra ventaja importante del presente desarrollo es limitar la huella de carbono que por reciclaje de aluminio, o por la producción de nuevos utensilios de acero inoxidable se va a producir. El proceso de termorociado produce también una huella de carbono, pero significativamente menor al de producción de aluminio y acero. El proceso de reciclaje de aluminio puede producir hasta 3 veces más CO₂ contaminante comparado al acero, por la alta demanda de energía, ver Figura 1. De implementarse, este procedimiento para re-manufacturar los actuales utensilios en uso en los hogares, entonces la huella de carbono sería aún menor, pues no habría necesidad de importación de materia prima (ejm. aluminio), transportación, reciclaje, etc.



Figura 1: Fabricación de ollas por método de repujado vs método de termorociado

En la figura 1, se muestra la técnica del repujado para producción de utensilios de cocina de forma artesanal (izquierda-arriba-abajo). Las propiedades de ductilidad del aluminio permiten su fácil conformado. El cambio a material de acero inoxidable impide el uso de las mismas técnicas por la alta resistencia a la deformación del mismo. En la figura 1 se muestra la técnica de termorociado para proyectar partículas fundidas de material ferromagnético (derecha-arriba). También se muestran la emisión de toneladas de CO₂ para la producción de distintos materiales incluyendo madera, acero, plástico PVC y aluminio.

1.2 El Problema

El cambio de la matriz energética en el Ecuador ha llevado al cambio de cocinas de gas a cocinas de inducción en los hogares. El uso de los artículos de cocina actuales (ej: ollas, sartenes, etc.) se volverán obsoletos debido a que sus componentes carecen de elementos ferromagnéticos. Es por ello que los hogares se verán obligados a adquirir nuevos artículos de cocina que posean materiales ferromagnéticos, incrementando de esta manera el costo. Por lo tanto, es necesario innovar en maneras de reducir este costo; una forma puede ser aplicar recubrimientos ferromagnéticos a los artículos de cocina actuales para lograr su funcionamiento en las cocinas de inducción.

Una opción identificada es la de incrustar una placa de acero en la base del utensilio de aluminio, afín de que éste produzca la inducción. Esta es una opción válida y relativamente económica, pero se limita a la producción de nuevos utensilios y al uso de maquinaria industrial capaz de incrustar la placa de acero con una prensa de alto tonelaje. No todos los productores artesanales están en condiciones de renovar sus procesos.

La opción del recubrimiento por termorociado es más versátil, dado que permite re-manufacturar utensilios, producir utensilios en distintos tamaños y formas (en el caso de incrustar una placa, se necesitaría una matriz para cada diseño de olla), e inclusive abre la opción de diseñar recubrimientos con formas variadas, que pueden usarse como decoración. El proceso del termorociado, es un proceso tecnológico sencillo, y fácil de implementar; puede considerarse comparable a un proceso de soldadura tradicional. Este proceso se lo puede realizar un taller metalmecánico, o implementarse en las empresas de producción de utensilios.

1.3 Soluciones Propuestas

Principalmente, lo que se desea en este proyecto es viabilizar el cambio de utensilios de cocina de aluminio a utensilios de inducción de aluminio con una capa delgada de recubrimiento ferromagnético. El objetivo principal es bajar el costo de los nuevos artículos de cocina que van a usarse en las cocinas de inducción con el fin de lograr el mínimo impacto económico en las familias.

Por otro lado, el proyecto es atractivo desde el punto de vista de producción ya que se evita utilizar placas de acero inoxidable o hierro y simplemente se propone aplicar capas de este material, pero con el objetivo de obtener resultados similares gastando menos dinero y material.

Si bien los procesos de fabricación de artículos de inducción ya están patentados, y existe gran cantidad de información sobre ellos y, así mismo, el proceso de termorociado ya es utilizado en la industria, la aplicación a la cual se orienta la idea en este proyecto no tiene una patente previa por lo que es única e inclusive patentable (15), pero no utiliza la tecnología propuesta en este proyecto.

Además de lo anterior se debe considerar que este método de fabricación es sustentable por el bajo impacto ambiental que representa y sus bajos costos. Reduce significativamente la huella de carbono dado que no será necesario un proceso de reciclaje (el cual conlleva un alto consumo energético y provoca contaminación) para los millones de ollas de aluminio obsoletas. Por lo tanto el método se basa en reutilizar (R) y reusar (2R) los artículos que actualmente ya se están utilizando en los hogares, con lo cual no se necesita producir (o no necesariamente) nuevos artículos y se reduce la huella de carbono que genera la fabricación de estos artículos.

1.4 Viabilidad

Este proyecto es viable económicamente dado que los nuevos artículos de cocina para las cocinas de inducción serán bastante más caros que los existentes actualmente en el mercado. Por lo tanto, si se ofrece una opción económicamente más conveniente es muy probable que la gente de mediano y bajos ingresos, tome en cuenta esta alternativa.

Además de esto, el hecho de que el subsidio al gas desaparezca provocará que todas las familias deban a corto o mediano plazo cambiarse a cocinas de inducción por lo que de una u otra manera las familias van a tener que comprar los nuevos artículos de cocina o utilizar esta propuesta.

Es importante tomar en cuenta que este proyecto no solo beneficia al consumidor reduciendo el precio de los artículos, sino que también, puede interesar a los productores artesanales de ollas y sartenes dado que el método de producción propuesto anteriormente no necesita maquinaria costosa, que es justamente la que están utilizando las grandes empresas de conformado/troquelado para fabricar los artículos de inducción. Simplemente, se necesita de una máquina de termorociado que es mucho más fácil de adquirir y de montar. Este método de fabricación al ser más barato que el convencional ayudaría a que los productores artesanales puedan producir estos artículos de una manera más barata y se vuelvan competitivos en el mercado.

1.5 Objetivos

Diseñar e implementar un recubrimiento ferromagnético aplicable en artículos de cocina para su empleo en calentamiento por inducción, afín de permitir la migración de tecnología de calentamiento de utensilios a más bajo costo, mediante reutilización de los actuales utensilios de cocina evitando la huella de carbono y permitiendo a los productores artesanales mantener su producción de ollas de aluminio.

1.5.1 Objetivos Específicos

- Determinar un material ferromagnético resistente al desgaste y corrosión que se pueda aplicar en forma de recubrimiento en los artículos de cocina, con propiedades óptimas y de bajo costo.
- Analizar por modelación computarizada (COMSOL) el proceso de calentamiento por inducción en el recubrimiento aplicado para optimizar la cantidad de material y geometría.
- Analizar el desempeño en muestras físicas del recubrimiento aplicado, evaluando su desempeño para la cocción, y su resistencia a la corrosión
- Recomendar procedimientos de re-manufactura de los actuales utensilios de cocina para permitir la reutilización de ollas y sartenes que se encuentre en buen estado y que su reemplazo por utensilios de acero inoxidable involucre un costo elevado.

2. MARCO TEÓRICO

A continuación se explican los fenómenos físicos involucrados tanto en la generación de calor como en la transferencia del mismo cuando se utiliza un recubrimiento ferromagnético. Dentro de la generación de calor se explica el calentamiento por efecto joule y el calentamiento por inducción, mientras que en la transferencia de calor se ven implicados los procesos de conducción, convección y radiación.

2.1 Inducción Magnética

La inducción magnética es el principio físico que rige a las cocinas de inducción. Se utiliza un campo magnético variable a partir de una corriente alterna variable para generar una fuente electromotriz (fem) inducida en los recubrimientos de los utensilios de cocina. La fuente de fem inducida, para este caso, es la variación con respecto al tiempo del campo magnético producido por los anillos inductores (2).

Para generar inducción magnética se necesita dos circuitos que se encuentren muy próximos entre ellos. El primer circuito es el inductor, es decir, la cocina con su bobinado, el cual produce el campo magnético variable. El segundo circuito es el inducido, es decir, el recubrimiento ferromagnético sobre el cual se va a generar una fem inducida. El principio de inducción se observa en la figura 2, donde el núcleo de hierro en el interior del bobinado representa el utensilio a calentar.

En la figura 3, en cambio, se observa el principio de inducción magnética aplicado en las cocinas de inducción, con el bobinado enrollado de forma plana bajo el recubrimiento ferromagnético, es decir, el núcleo de hierro se encuentra fuera del bobinado.

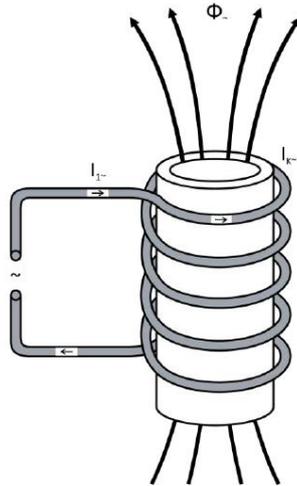


Figura 2: Principio Físico de Inducción (4)

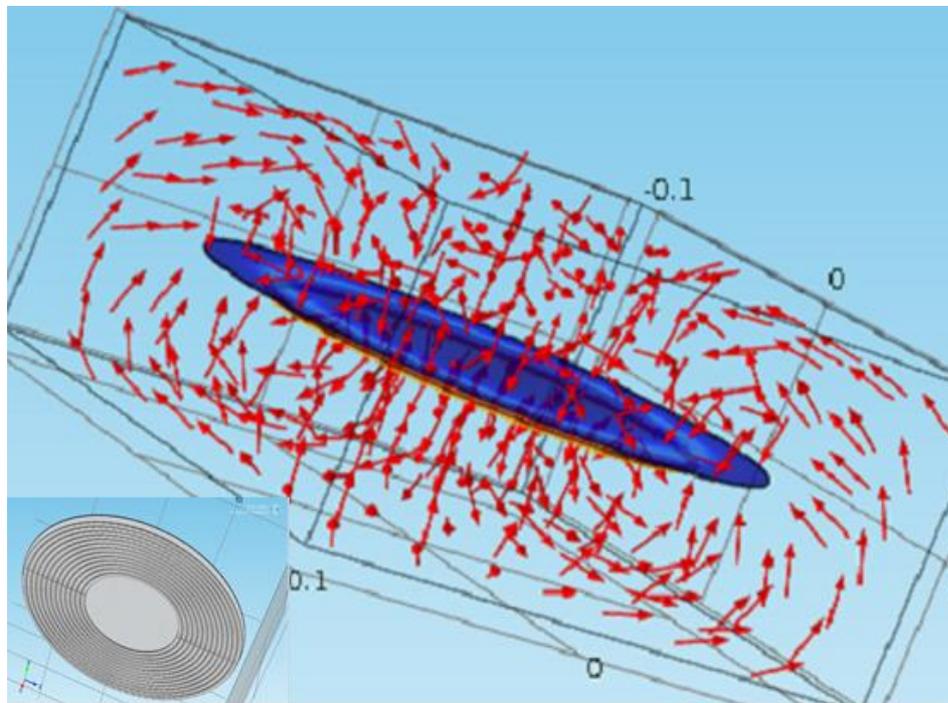


Figura 3: Principio de Inducción aplicado a cocinas

La Ley de Ampère se utiliza para determinar el campo magnético durante la inducción ya que relaciona la corriente en un alambre de cualquier forma y el campo magnético generado y se expresa como:

$$\oint_B \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 NI \text{ (Ecuación 1)}$$

Dónde:

B = intensidad de campo magnético

dl = vector de longitud infinitesimal

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío

N = número de espiras que forma el alambre

I = corriente en cada una de las espiras

Por otro lado, según la Ley de inducción de Faraday, la variación en el tiempo del flujo de un campo magnético ($\frac{d\Phi_B}{dt}$) es lo que genera la fem inducida. Por esta razón las cocinas de inducción poseen altas frecuencias de resonancia (f) para permitir que estas variaciones del flujo magnético sean tan altas como sea posible. Al ser directamente proporcionales, la fem inducida y la variación de flujo magnético $\frac{d\Phi_B}{dt}$, entonces, la potencia disipada debido a la fem inducida depende directamente de la magnitud de la frecuencia utilizada. .

La ecuación de la La Ley de Inducción de Faraday se expresa como:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \text{ (Ecuación 2)}$$

Dónde:

ε = la fem inducida

$\frac{d\Phi_B}{dt}$ = la variación del flujo magnético en el tiempo

Si el circuito inductor (la cocina de inducción) contiene N espiras, entonces las fem inducidas en cada espira se suman y su valor total queda expresado como:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt} \text{ (Ecuación 3)}$$

Esta extensión de la ley de Faraday para N espiras es de suma importancia para la presente investigación, dado que las cocinas de inducción poseen varias espiras para generar mayores corrientes inducidas y, por lo tanto, el especificar el número de espiras que posee la cocina es fundamental al momento de realizar un modelo computacional en Comsol y, al mismo tiempo, va influir en las temperaturas y tiempos registradas en las pruebas con probetas reales.

El realizar las pruebas con N=13 espiras determina una limitación en la generalización de los resultados que se obtengan. Esto se debe a que los resultados obtenidos con la cocina utilizada actualmente pueden diferir con otros modelos de cocina, debido al número de espiras que utilice cada una. Por último, cabe recalcar que, para lograr un calentamiento por inducción la interacción entre la ley de inducción de Faraday y la Ley de Ampère es fundamental.

2.1.1 Calentamiento por inducción

Al inducir una corriente eléctrica en materiales resistivos, como el acero en el caso del recubrimiento utilizado, se genera una potencia disipada en forma de calor. La potencia generada en el circuito secundario (recubrimiento) debido a estas corrientes inducidas y a la resistencia equivalente del material que se va a calentar es:

$$P = I_{ind}^2 \times R_{eq} \text{ (Ecuación 4)}$$

Dónde:

P = potencia disipada en el circuito secundario (inducido)

I_{ind} = corriente inducida

R_{eq} = resistencia equivalente de la pieza a calentar

El calor generado se debe al efecto Joule, donde la resistencia propia del material conductor provoca que la corriente que la atraviesa pierda energía. Durante este fenómeno los electrones en movimiento, provenientes de la corriente inducida de la cocina, sufren una alta cantidad de colisiones con los átomos del material que se va a calentar (recubrimiento) y por lo tanto la energía cinética de los electrones en movimiento se transfiere a los átomos del material inducido, incrementando de esta manera su energía cinética y esto a su vez provoca un incremento en la temperatura (10).

Es importante tomar en cuenta que si la resistencia del material es muy baja entonces los electrones en movimiento, debido a la corriente, no van a tener ninguna dificultad en atravesar el material y por lo tanto la energía transferida por choques es mínima (aluminio $\rho=2.65e-8 \Omega \cdot m$). Por esta razón el disco de aluminio sobre el recubrimiento no debe generar aumentos significativos en la generación de calor.

En el calentamiento por inducción, las corrientes inducidas forman una especie de circuitos cerrados en forma de remolinos por toda la superficie del material a calentar (conocidas como corrientes de Eddy) y se neutralizan a sí mismas, entonces, los mismos átomos del acero generan el circuito cerrado por donde estas corrientes inducidas van a recorrer y, por lo tanto, los átomos de acero son los que originan la resistencia equivalente del recubrimiento (1).

Se debe tomar en cuenta que la potencia producida por efecto Joule toma en consideración la resistencia R equivalente (R_{eq}), que para el caso del calentamiento por inducción representa la resistencia del circuito secundario (recubrimiento), es decir, la resistencia propia del material del que está hecho el utensilio de cocina que se va a calentar. Sin embargo, debido a que en el calentamiento por inducción se presenta un fenómeno

conocido como efecto piel, el cual está explicado a profundidad en la sección 2.1.2, la densidad de corriente no es uniforme en el material a calentar y más bien se acumula en un 87% en la superficie, siendo esta superficie de un espesor δ , siendo ésta la profundidad de penetración (4)

Por otro lado, la histéresis es otro mecanismo de generación de calor. Para que la histéresis se produzca debe aplicarse un campo magnético variable al recubrimiento. En un material ferromagnético, como el hierro, se encuentran regiones llamadas dominios, estos tienen dimensiones menores a 1mm y cada uno se comporta como un imán, los cuales tienen un polo norte y polo sur (9). Cuando, por ejemplo, el hierro no se encuentra magnetizado estos dominios están orientados al azar por lo que sus efectos magnéticos se cancelan. Sin embargo, cuando a un pedazo de hierro se le aplica un campo magnético, esto produce que sus dominios se alineen en una dirección determinada, si después se elimina el campo magnético y posteriormente se invierte este mismo campo, entonces estos dominios se alinean en una dirección opuesta (9).

En la histéresis al desmagnetizar a un material ferromagnético (recubrimiento de acero) el orden al azar de sus dominios originales no vuelva a ser el mismo ya que se mantiene un poco de magnetismo permanente entre ellos, esto provoca que la energía magnética necesaria para volver a magnetizar el material no sea la misma que la utilizada inicialmente. El ciclo de la histéresis se puede apreciar en la figura 4, donde la zona encerrada entre los ciclos de magnetización y desmagnetización representa la energía disipada en forma de calor.

En la figura 4 el eje de coordenadas en forma horizontal representa a B_0 , el cual se refiere al campo magnético debido únicamente a la corriente que atraviesa los inductores. El eje de coordenadas en forma vertical representa a B , el cual es el campo magnético total que

incluye tanto a B_0 como al campo magnético extra debido a la presencia del material ferromagnético B_M . Esta relación se describe a continuación:

$$B = B_0 + B_M \text{ (Ecuación 5)}$$

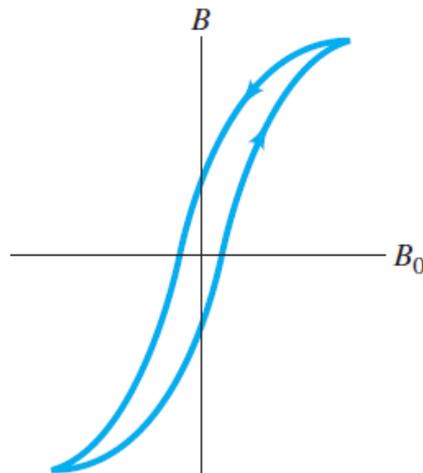


Figura 4: Ciclo de Histéresis Magnética para hierro blando (9)

Por esta razón, cuando en las cocinas de inducción se aplica un campo magnético variable se producen sucesivas magnetizaciones y desmagnetizaciones, es decir, varios ciclos de histéresis, lo cual provoca pérdidas de energía para cada ciclo, Estas pérdidas de energía se dispersan en forma de calor principalmente hacia la zona de aluminio que se desea calentar pero también hacia los alrededores. El balance de la energía magnética en el recubrimiento se muestra a continuación:

$$E_{mag\ i} = E_{mag\ f} + E_{histéresis} \text{ (Ecuación 6)}$$

Dónde:

$E_{mag\ i}$ = Energía magnética inicial

$E_{mag\ f}$ = Energía magnética final

$E_{histéresis}$ = Calor generado debido a histéresis

La energía generada por histéresis depende de la frecuencia a la cual se produce la magnetización y desmagnetización del material, es decir, de la frecuencia de resonancia y también depende de la retentividad del material, es decir, la capacidad del material para retener magnetismo. Esta energía se añade al calor disipado por efecto Joule para calentar el material del recubrimiento, ya que se aprovecha todo tipo de energía disipada como calor para calentar el utensilio de cocina. Sin embargo, la energía debido al efecto Joule es más significativa al momento de realizar el calentamiento, debido a que la potencia por efecto Joule se ve afectada por las altas corrientes inducidas y la resistencia del material ferromagnético.

2.1.2 Efecto piel

El mecanismo conocido como efecto piel o profundidad de penetración se encuentra presente durante el calentamiento por inducción. Cuando se utiliza una corriente continua en un conductor, la densidad de corriente debida a esta corriente se distribuye uniformemente por toda el área transversal del conductor. Sin embargo, cuando la corriente aplicada en el conductor es una corriente alterna, como sucede en las cocinas de inducción, entonces la densidad de corriente tiende a ser mayor en la superficie y menor en el centro, produciendo el efecto piel.

Esto ocurre cuando se genera inducción en un material. Al momento en que un conductor con una corriente alterna variable induce corriente en un circuito secundario (un material magnético cercano) mediante campos magnéticos variables, entonces se producen las denominadas corrientes Eddy en este circuito secundario. Estas corrientes inducidas provocan campos magnéticos secundarios opuestos al que las produjo, lo cual provoca que el flujo total de campo magnético en el sistema disminuya (6).

La variación del flujo magnético $\frac{d\phi_B}{dt}$ en una superficie de sección circular es mayor en el centro que en la periferia, esto provoca que en el centro se genere mayor reactancia inductiva, es decir, mayor oposición al paso de la corriente alterna o corrientes inducidas. Como la corriente trata de fluir a través del camino que posea la menor resistencia posible, entonces, esto provoca que los electrones en el material inducido se desplacen hacia la periferia concentrando mayor densidad de corriente en el borde exterior de la superficie que en el interior. Esta explicación realizada para una superficie se aplica de la misma manera para un volumen sólido, en donde el centro de este volumen tiene una mínima presencia de corrientes inducidas, mientras que en la superficie exterior se tiene un máximo valor de estas corrientes, ver figura 5. Por lo tanto, se genera mayor cantidad de calor en la periferia que en el centro de un conductor cuando la frecuencia es alta.

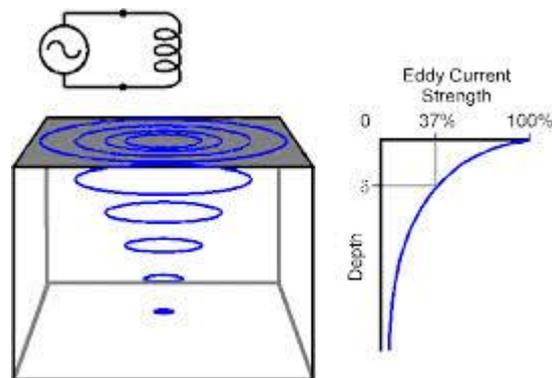


Figura 5: Profundidad de Piel o Skin effect (14)

La corriente inducida disminuye exponencialmente en el centro con respecto a la periferia de acuerdo a la siguiente expresión:

$$i_x = i_s e^{-\frac{x}{\delta}} \text{ (Ecuación 7)}$$

Dónde:

i_x = corriente a la distancia x de la superficie calentada

i_s = corriente en la superficie calentada

δ = profundidad de penetración

Esto indica que al aplicar el recubrimiento se debe tomar en cuenta la profundidad de penetración a la cual las corrientes parásitas se eliminan. Al eliminarse se produce una sección “fría” (o que no genera calor por inducción) en el interior del recubrimiento. Esta zona puede consumir parte del calor generado durante el estado transitorio del calentamiento.

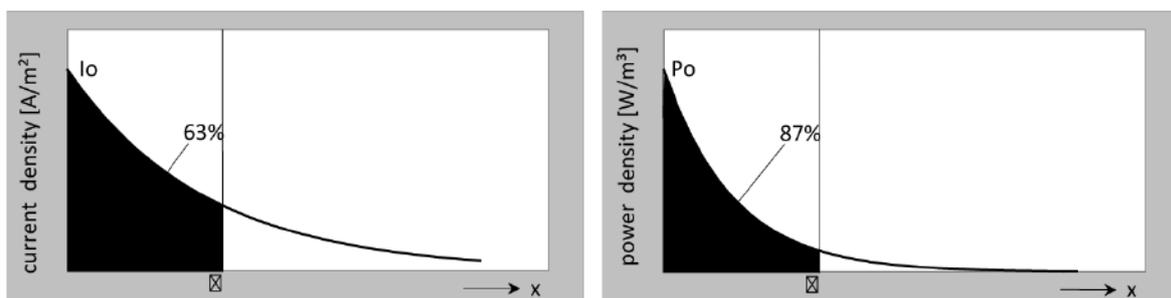


Figura 6: a) Variación Corriente vs Profundidad. b) Variación Densidad de Potencia vs Profundidad (10)

Bajo el principio descrito arriba, se puede observar en la figura 6, que la potencia disipada se acumula en un 87% de su valor total en profundidades menores a δ , mientras que la densidad de corriente se acumula en un 63% para el mismo rango de profundidad. Esto demuestra la influencia del efecto piel, el cual indica que a medida que se avanza hacia el interior del material inducido (recubrimiento) a una frecuencia (f) constante, entonces, la intensidad de las corrientes inducidas disminuyen exponencialmente hasta llegar a eliminarse completamente (10).

2.2 Transferencia de Calor

Los fenómenos magnéticos y eléctricos explicados anteriormente permiten comprender la generación del calor que se produce dentro del material ferromagnético y las variables físicas que intervienen para que la potencia generada sea mayor o menor en cada caso. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que la generación de calor no es el único principio físico necesario para calentar los utensilios de cocina al momento de colocarlos sobre el bobinado de la cocina de inducción. Se debe tomar en cuenta también cómo el calor que se genera en el recubrimiento ferromagnético es transferido, en primer lugar, al material base (aluminio) de los utensilios de cocina y, en segundo lugar, a los alimentos que se encuentran en su interior. Así mismo, se debe considerar todo tipo de pérdidas energéticas que se produzcan debido a la diferencia de temperaturas que existe entre los utensilios calientes y el entorno, el cual se considera que se encuentra a una temperatura ambiente constante ($T_0 = 293 \text{ K}$).

Para realizar el análisis de transferencia de calor se debe tomar en cuenta los tres tipos de mecanismo físicos que existen para que este intercambio de energía térmica pueda realizarse. Estos mecanismos son: conducción, convección y radiación.

2.2.1 Conducción

La transferencia de calor por conducción se produce durante el estado transitorio, desde el recubrimiento, donde se genera el calor, hacia el plato de aluminio. Durante el estado transitorio también ocurre una transferencia de calor internamente en el recubrimiento y se produce cuando el espesor supera los 0.2mm de grosor, este valor se obtiene en la sección 4.1. En este caso, el calor se transfiere desde la superficie del recubrimiento hacia la zona “fría” en el interior. Por último, la conducción se evidencia cuando el calor se transfiere desde la zona de aluminio que se encuentra adherido al acero hacia todo el aluminio de la

olla. También puede haber conducción ya en el estado estacionario por conducción hacia las hornillas soportantes de la olla.

La tasa a la cual se transfiere calor por este medio, es decir, cuanta energía se transfiere por unidad de tiempo, se determina mediante la ecuación de la Ley de Fourier

$$q_x'' = -k \frac{\Delta T}{L} \text{ (Ecuación 8)}$$

Dónde:

k = conductividad térmica (w/ m*k)

ΔT = diferencia de temperaturas entre dos puntos de análisis

L = distancia entre los dos puntos de análisis

2.2.2 Convección

El proceso de convección interviene de tres maneras, durante el estado transitorio en el calentamiento de los utensilios. En primer lugar, interviene enfriando las paredes del utensilio y disminuyendo la energía interna del agua (los ensayos de desempeño se ejecutaron, calentando agua), en ambos casos debido al aire circundante ($T_\infty=20^\circ\text{C}$) que actúa en forma de convección natural. En segundo lugar, si se toma como volumen de control el recubrimiento más el disco de aluminio, entonces la convección actúa entre el aluminio y el agua estática dentro del utensilio, nuevamente como convección no forzada.

La ley que gobierna este mecanismo es la Ley de enfriamiento de Newton cuya ecuación es:

$$q_x'' = h(T_s - T_\infty) \text{ (Ecuación 9)}$$

Dónde:

h = coeficiente de convección ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)

T_s = temperatura de la superficie

T_∞ = temperatura del fluido

Finalmente, la convección se presenta cuando el agua del utensilio se evapora, lo que produce una pérdida del calor almacenado en el agua debido al cambio de fase, es decir, disminuye la energía almacenada en el agua líquida debido al calor latente de vaporización durante la ebullición.

2.2.3 Radiación

La radiación se presenta tanto en el recubrimiento como en el aluminio dado que ambos cuerpos se encuentran a temperaturas distintas de cero y por lo tanto emiten calor a los alrededores.

La tasa de transferencia de energía por radiación, tomando en cuenta que los alrededores y los cuerpos calientes (recubrimiento de acero y utensilio de aluminio) se encuentran a diferentes temperaturas, está dominada por la ecuación 10:

$$q''_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \text{ (Ecuación 10)}$$

Dónde:

ε = emisividad

σ = constante de Stefan Boltzmann

T_s = temperatura de la superficie

T_{sur} = temperatura de los alrededores

La presencia de estos tres tipos de transferencia de calor y su interacción con el material base de la olla, el recubrimiento y el agua que se pretende calentar provoca que se generen distintos fenómenos térmicos al aplicar determinados rangos de espesores de acero sobre el aluminio. La descripción de estos fenómenos es detallada más adelante.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se explica el proceso a seguir para depositar el recubrimiento en la olla deseada y las pruebas correspondientes para determinar su desempeño. De igual forma se describe el estudio realizado por modelación computacional en consola.

3.1 Materiales y Procesos

3.1.1 Arc Spray – Termorociado por arco eléctrico.

El proceso de Arc Spray es una tecnología industrial de metalización sobre superficies. El metalizado o metalización es un proceso metal-mecánico de manufactura aditiva por medio de la cual a las piezas desgastadas, que han perdido diámetro o espesor, se les proporciona del metal que perdieron durante su vida útil por medio de añadir material fundido a la superficie de la pieza original. En el proceso de Arc Spray se utilizan dos alambres metálicos que se alimentan a la torcha donde por medio de un arco eléctrico llegan al estado de fusión y se los proyecta hacia la superficie a ser recubierta con un chorro de aire comprimido.

Se planificó depositar dos recubrimientos. El primero es un acero de bajo carbono, con nombre específico ER70S-3; es un acero de bajo costo, el cual ayuda a optimizar el aspecto económico del proyecto. El segundo es un acero inoxidable martensítico, el cual se lo aplica al final como capa de cierre del recubrimiento para asegurar que no se corra u oxide y sea duradero por su alta dureza.

3.1.2 Dispositivo experimental para evaluar el calentamiento de los utensilios de prueba

Para evaluar el rendimiento térmico del recubrimiento se utiliza una termocupla para recolección de datos de temperatura. La termocupla utilizada es tipo “K”, marca Omega RDXL 4SD. En las pruebas de rendimiento, se coloca la termocupla en la base interna de la

olla y se recolectan los datos de temperaturas al someter la olla a la cocina de inducción. Se efectúa dos pruebas, una con 2 litros de agua y otra sin agua en su interior. Posteriormente se tabula los datos recolectados y se analiza los resultados obtenidos.

3.1.3 Proceso de Maquinado

Se realiza una preparación superficial previa al recubrimiento y un acabado superficial posterior al mismo. La preparación superficial se la realiza con la amoladora, el cual provoca rugosidad en la base de la olla por medio de remoción de material para mejorar la adherencia del recubrimiento. El acabado superficial se lo realiza por medio de la lija para eliminar cualquier rugosidad en el recubrimiento que afecta a las propiedades anti corrosivas del mismo.

3.1.4 Dispositivo experimental para evaluar la corrosión

Mediante una cámara salina se realizaron las pruebas de corrosión a diferentes muestras del recubrimiento realizado, según lo especifica en la norma ISO 9227 y ASTM B117.

3.1.5 Microscopía

Utilizando el microscopio Nikon Eclipse MA100 se obtiene la metalografía de la microestructura. El objetivo de observar la microestructura del recubrimiento es analizar cómo éste responde frente a las pruebas de corrosión en la cámara salina. Para poder observar la muestra, primero se debe preparar la probeta adecuadamente con un corte preciso, un lijado y pulido debidamente desarrollado que permita observar con claridad el ejemplar a analizar.

3.2 Metodología de Modelado y Experimental

3.2.1 Modelado Comsol

Para iniciar el método experimental y con el fin de que la experimentación involucre la menor cantidad de recursos, lo cual comprende pruebas reales y probetas reales se ha realizado simulaciones computacionales con el programa de elementos finitos COMSOL 4.2. Para el modelado se ha utilizado el paquete de “Induction Heating”, con el cual a partir de la densidad de corriente en el conductor se ha simulado el calentamiento por inducción en un disco de acero y en una combinación de dos discos, acero más aluminio.

La metodología de simulación involucra la geometría de la pieza, la asignación de materiales, el fenómeno físico y finalmente el mallado. Para la geometría se realiza una pieza que represente a los 13 inductores de una cocina de inducción con un diámetro promedio de 1.7 mm, un disco de recubrimiento de 90 mm de diámetro cuyo espesor varía desde 0.2 mm hasta 1 mm y un disco de espesor 2 mm con un diámetro de 100 mm que representa la base de una olla de inducción. La geometría se muestra en la figura 7.

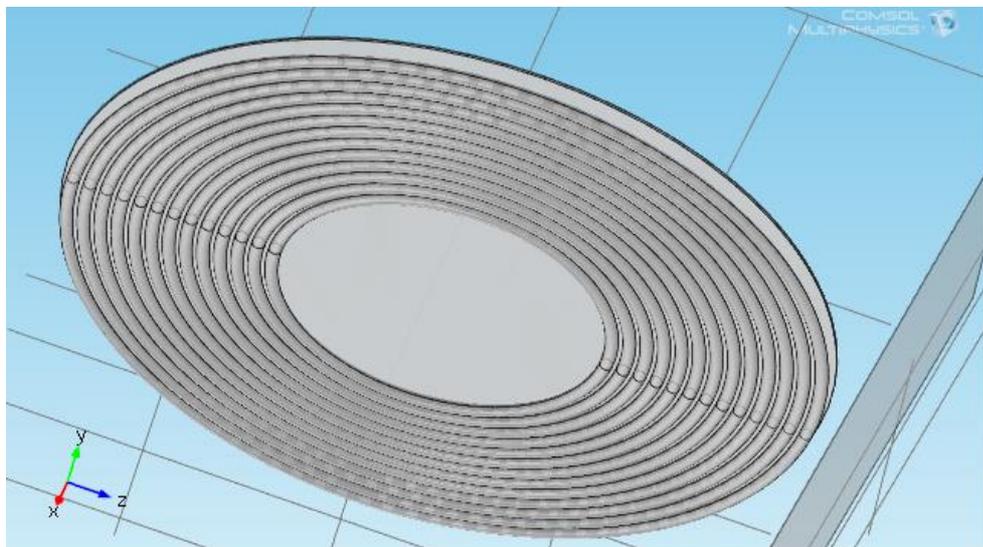


Figura 7: Geometría de disco más conductores utilizada para la simulación

Para completar la geometría se crea una figura prismática rectangular de dimensiones (0.2 x 0.05 x 0.2 m) que encierre a la pieza de trabajo y ésta va a representar el aire circundante. Esta geometría adicional es necesaria para otorgar un medio por el cual las líneas de campo magnético se puedan desplazar.

En lo que respecta a los materiales se ha escogido acero para el disco inferior (sección de recubrimiento), aluminio para el disco superior (base de la olla) y aire para toda la zona externa a la pieza que incluye a los conductores. A los anillos conductores no se les asigna ningún material debido a que por principio del fenómeno de inducción estos no se van a calentar y por lo tanto no ingresan en el análisis.

Para iniciar el fenómeno físico de Induction Heating se especifican las variables mínimas que el software necesita para compilar las ecuaciones involucradas. En la sección de electromagnetismo se ingresa la densidad de corriente externa (J) y se le asigna a los inductores. Para determinar la densidad de corriente (J) se utiliza la corriente LC y el área transversal de los anillos conductores. A continuación se describe el proceso para definir el valor de J .

La sección del circuito de potencia que se encarga de transferir el calor a la carga (utensilio de cocina) es el circuito resonante, el cual está compuesto de una inductancia resonante L_r y un capacitor resonante C_r como se aprecia en la figura 8. La resonancia ocurre cuando existe un intercambio de energía entre el capacitor y el inductor y la frecuencia de resonancia (f) es la velocidad óptima a la cual se produce este intercambio de energía. Durante la resonancia de un circuito en serie la corriente que atraviesa el circuito se vuelve máxima y por lo tanto la potencia entregada a la carga también se maximiza (7).

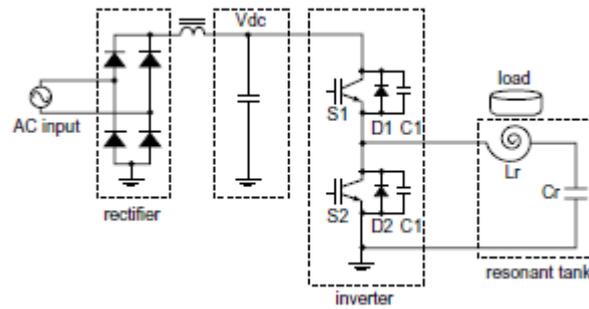


Figura 8: Circuito eléctrico de Potencia de una Cocina de Inducción (7)

Para determinar la densidad de corriente externa se utiliza la corriente que atraviesa el circuito resonante, es decir, la corriente máxima producida. Para determinar esta corriente se hace uso del promedio de la corriente durante un ciclo (2π) y la expresión que determina esta corriente es la que se muestra a continuación:

$$I_R = \frac{2\pi P}{V} \text{ (Ecuación 11)}$$

Aplicando los parámetros de la cocina utilizada para la experimentación $P = 1500W$, $V=220V$ se tiene:

$$I_R = \frac{2\pi * 1500W}{220V * \sqrt{2}}$$

$$I_R = 30.3 A$$

Con esta corriente de resonancia junto con el diámetro de los alambres de cobre del conductor ($D=1.7mm$) se obtiene la densidad de corriente que pasa a través de ellos de la siguiente manera:

$$J = \frac{I_R}{Area} \text{ (Ecuación 12)}$$

$$J = \frac{30.3 A}{\pi \left(\frac{1.7mm}{1000}\right)^2}$$

$$J = 13.35E^6 \left(\frac{A}{m^2}\right)$$

Además de la densidad de corriente, se necesitan agregar parámetros basados en las propiedades de los materiales:

ρ = resistividad

μ_0 = Permitividad magnética del vacío ($4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A²)

μ_r = Permitividad magnética relativa

ϵ_0 = Permitividad eléctrica del vacío (8.85×10^{-12} F/m)

ϵ_r = Permitividad eléctrica relativa

Para la sección de transferencia de calor también se deben asignar parámetros basados en las propiedades de los materiales:

ρ = Densidad del material

k = conductividad térmica

C_p = Capacidad calórica

Todos los parámetros que involucran propiedades de materiales se asignan automáticamente al escoger el material en Comsol. Una vez ingresados todos los parámetros necesarios el programa puede realizar los cálculos multifísicos necesarios utilizando las ecuaciones de Faraday, de Ampère y la ecuación general de calor.

Con la densidad de corriente externa obtenida el programa de simulación realiza los siguientes cálculos:

1. Determina la corriente encerrada (I_{enc}) en los conductores utilizando:

$$I_{enc} = \int \vec{j} \cdot \vec{dA} \quad (\text{Ecuación 13})$$

2. Con la I_{enc} obtenida se reemplaza en la Ley de Ampère, ecuación 1, para obtener el campo magnético variable \vec{B}

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = u_0 I_{enc}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = u_0 \int \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad (\text{Ecuación 14})$$

3. Finalmente con el valor del campo magnético \vec{B} se determina el flujo magnético Φ_B y con la ley de inducción de Faraday, ecuación 2, se obtiene la fem inducida ε para N espiras

$$\Phi_B = BA \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\varepsilon = -N \frac{d(BA)}{dt} \quad (\text{Ecuación 16})$$

El valor de la fem inducida es el valor de la corriente inducida en el recubrimiento que provoca el calentamiento por inducción.

Para completar la sección de ecuaciones físicas electromagnéticas del modelado, se seleccionan las zonas que van a tener calentamiento inductivo, es decir el plato de aluminio y de acero, y las zonas que están aisladas magnéticamente que son los conductores y el cubo de aire circundante.

Para el modelado de transferencia de calor se agregan las zonas que van a verse sometidas a convección y radiación que sería los bordes externos de los discos. Los parámetros utilizados en cada caso son:

ε = emisividad (0.5)

h = coeficiente de convección (5 (W/ m²*K))

El valor de emisividad (ε) es un valor promedio entre 0 y 1 y el valor del coeficiente de convección (h) es un valor utilizado para convección no forzada que es justamente lo que

sucede en una cocina donde no existen corrientes de aire que puedan producir convección forzada, lo cual puede incrementar el valor h .

La cantidad de potencia q''_{total} disipada en el recubrimiento o en el disco de aluminio se obtiene de restar los valores de calor por conducción, convección y radiación del q''_{gen} a partir del efecto joule y de la histéresis. La pérdida de calor por conducción se hace presente al transferir el calor hacia el interior de propio recubrimiento o al transferir el calor desde el acero hacia el aluminio, dependiendo del volumen de control que se utilice.

$$q''_{\acute{u}til} = q''_{gen} - q''_{conv} - q''_{rad} \quad (\text{Ecuación 17})$$

El valor de la potencia total disipada se introduce en la ecuación de calor general para obtener las temperaturas en función del tiempo como resultado final

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p u_{trans} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + q''_{\acute{u}til} \quad (\text{Ecuación 18})$$

La última sección de la simulación es la creación del mallado, para el cual es importante tomar en cuenta las dimensiones de la pieza y la precisión de los resultados deseados. Para crear un balance entre tiempo de cómputo y precisión se ha escogido un mallado normal para la zona de interés, que está compuesta por los platos de aluminio, de acero y los conductores, mientras que se utiliza un mallado grueso para el prisma como se muestra en la figura 9.

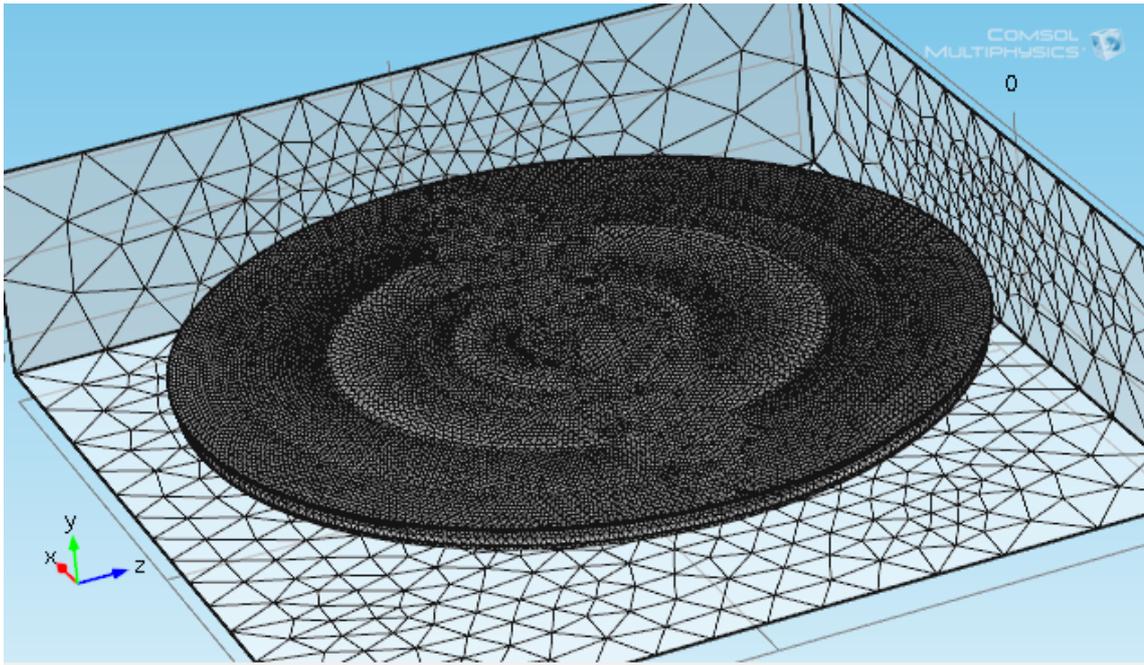


Figura 9: Mallado del disco acero, disco de aluminio, conductores y aire circundante

El algoritmo de solución de las ecuaciones electromagnéticas y de transferencia de calor se repite para cada uno de los elementos del mallado. Finalmente, se procede a especificar la frecuencia a la cual trabaja la cocina, que en este caso es de 20kHz. Por último se determina el vector tiempo para el cual se va a realizar la simulación. El tiempo escogido es de 480 segundos u 8 minutos para asegurar que se alcance el estado estacionario. Al finalizar el cómputo se obtiene una gráfica 3D de la distribución de temperaturas por todo el disco de recubrimiento o de aluminio según sea el caso como se puede apreciar en la figura 10.

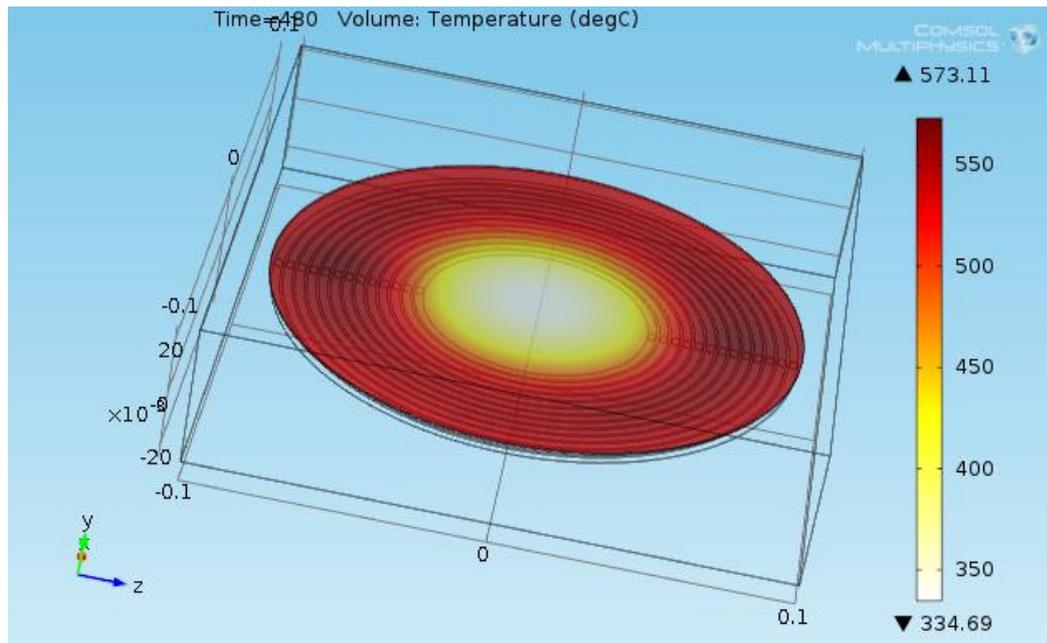


Figura 10: Gráfica 3D de la distribución de temperatura para un recubrimiento de 0,4mm en 480 segundos,

3.2.2 Experimentación Aditiva

Para desarrollar el proceso experimental, se realiza un proceso aditivo. En dicho proceso se deposita un recubrimiento inicial con un espesor determinado, posteriormente se realizan ensayos térmicos y según el rendimiento del recubrimiento en estas pruebas, se deposita mayor cantidad de recubrimiento, se realizan pruebas térmicas y se repite el proceso hasta encontrar un espesor óptimo deseado.

Primeramente para depositar el recubrimiento, se debe preparar superficie inferior de la olla, lo que quiere decir, crear rugosidad en la base de la olla que es el lugar donde va a ir el recubrimiento. Dicha rugosidad se la puede lograr con un proceso de maquinado de remoción de material como la amoladora, esto se puede observar en las figuras 12A) y 12B).

Posteriormente, con un marcador a base de aceite, ver figura 12C), se pinta el contorno externo de la base para que no se adhiera las partículas del material ferromagnético en otro lugar que no sea la base, como se observa en la figura 12D). Por último se realiza el recubrimiento por el proceso de metalizado en la base de la olla, como se observa en la figura

12E) y en la figura 12F). Primero se deposita una capa de acero bajo carbono y luego se le da una capa de cierre de recubrimiento de acero inoxidable.

El siguiente paso es examinar el rendimiento de los distintos espesores realizados. Los recubrimientos obtenidos por el método aditivo son: 0.16, 0.21, 0.25, 0.3, 0.6 y 0.65 mm. Para analizar el rendimiento de dichos recubrimientos, se realiza una recolección de datos de temperaturas con la termocupla. El montaje de dicha prueba se la puede observar en la figura

11



Figura 11: Montaje para desarrollar las pruebas térmicas a la olla con el recubrimiento.

Finalmente, una vez encontrado el espesor óptimo, se procede a realizar el acabado superficial. Mediante el acabado superficial, se pretende eliminar la rugosidad que se encuentra en la base de la olla debido al recubrimiento, para ello se utiliza un proceso de remoción de material, en este caso la amoladora. Se usa la amoladora añadiéndole un disco de lija puesto que no se requiere que se consuma mayor cantidad de espesor de recubrimiento. Dicho proceso y acabado se puede observar en la figura 12G).



Figura 12: (A)Preparación superficial de la base de la olla por medio de remoción de material con amoladora. (B)Resultado de preparación superficial de la olla con amoladora. (C)Marcador a base de aceite para realizar la preparación de los bordes externos. (D)Resultado de preparación de los bordes externos de la base de la olla con el marcador a base de aceite. (E)Deposición del recubrimiento en la base de la olla. (F)Resultado de deposición del recubrimiento en la base de la olla. (G) Olla posterior a acabado superficial por medio de lija.

3.2.3 Corrosión

Dentro de la optimización del espesor del recubrimiento se encuentra el aspecto de durabilidad frente a la corrosión. Para ello se prueban las probetas dentro de una cámara salina para examinarlas frente a un ambiente salino. Para dichos ensayos existen normas y especificaciones para asegurar la credibilidad del ensayo corrosivo. La norma ISO 9227 y ASTM B117, que es la norma de pruebas corrosivas en ambientes artificiales, dicta las especificaciones a seguir. En dicha norma se señala que las pruebas salinas deben realizarse en un tiempo de veinte y cuatro horas, sin embargo, en la aplicación real, las ollas no van a estar sometidas a las misma presencia de ambiente salino que en la norma se especifica, por ello se toma como criterio realizar el ensayo corrosivo en un tiempo de cuatro horas. Todas las demás especificaciones de la norma se las ha cumplido al realizar el ensayo corrosivo.

Antes de introducir las probetas en la cámara salina, se deben preparar las mismas para que ninguna variable externa afecte en el resultado. Para ello se da un acabado superficial liso con una lija, puesto que cualquier rugosidad puede alterar los resultados obtenidos además de limpiar cualquier impureza presente en la probeta, a continuación se lava la probeta con agua destilada para asegurar que no exista presencia externa de partículas no deseadas y se seca al aire sin utilizar toallas o algún otro tipo de material absorbente. Una vez realizados estos pasos de limpieza se introduce la probeta en la cámara salina, como se observa en la figura 13



Figura 13: Probetas montadas en la cámara salina

Cabe resaltar que el comportamiento de las probetas en las pruebas corrosivas se mide por medio del peso de las probetas al final de la prueba corrosiva; mientras menor sea su peso, mayor es la cantidad de material que se corroe por el ambiente salino. Sin embargo para nuestro ensayo salino, durante cada hora de presencia en la cámara salina se mide el peso de la probeta para poder obtener una tendencia de la probeta en el tiempo. Después de realizar cada medida, se limpian las probetas con agua destilada al igual que en su preparación inicial especificada.

Adicionalmente, en el ensayo salino se prueban cuatro probetas. La primera y tercera probeta que se muestra en la figura 13A) y 13C) son probetas rugosas que representan al

recubrimiento de 0.65 mm realizado en las ollas pero sin el acabado superficial liso, es decir, con rugosidades presentes, esto permite demostrar cómo va a reaccionar el recubrimiento sin haber eliminado la rugosidad existente. La segunda probeta observada en el figura 13B) representa al recubrimiento de 0.65 mm realizado en las ollas pero con el acabado superficial liso requerido. La cuarta probeta en la figura 13D) es un acero bajo carbono sin ninguna protección inoxidable que representa al recubrimiento de 0.6mm sin realizar la última capa de acero inoxidable. Es importante mencionar que para poder comparar las probetas y poder analizar los resultados obtenidos, las probetas deben ser del mismo tamaño y tener el mismo corte puesto que cualquier desigualdad entre ellas puede afectar los resultados del ensayo corrosivo; ya que es un ensayo comparativo.



Figura 14: (A)Probeta rugosa 1. (B)Probeta lisa. (C)Probeta rugosa 2. (D)Probeta acero bajo carbono

3.2.4 Metalografía

Para determinar el daño ocasionado por la corrosión, se realiza un análisis metalográfico de su microestructura. Para ello se realizan cortes precisos con una sierra de

precisión que permite realizar un corte limpio sin someter a muchos esfuerzos a la probeta para no ocasionar deformaciones en su microestructura. Paralelamente se desarrolla el corte con refrigeración continua para no causar deformaciones térmicas en la probeta. Dicho proceso se lo puede observar en la figura 15A)

Posteriormente, los cortes realizados con la sierra se los embebe en resina para poder manipularlos para su observación de la sección transversal, que es la zona de interés, dónde se puede distinguir entre el aluminio y el recubrimiento aplicado. Para ello se realiza una mezcla de Epoxy Resin, que es la resina, y Epoxy hardener, que es el endurecedor que ayuda a la solidificación de la resina, ver Figura 15B). Dicha mezcla se ejecuta en una proporción de 10:4 respectivamente y se vierte en un contenedor donde se encuentran las muestras que se quiere analizar con sus etiquetas correspondientes para evitar confusiones al momento de observarlas, como se puede observar en la figura 15C). En un lapso de diez horas se solidifica la resina con las muestras en su interior listas para el lijado, pulido y finalmente el microscopio.

Antes de poder observar las muestras en el microscopio, se deben lijar y pulir debidamente. Ver figuras 15D) Y 15E).

Finalmente cuando se encuentren las probetas con el acabado superficial deseado que se ha especificado anteriormente, se montan las muestras en el microscopio. Una vez montadas las muestras, se realiza un correcto enfoque de la microestructura que se desea examinar y se captura una fotografía para su respectivo análisis posterior. Ver figura 15F).

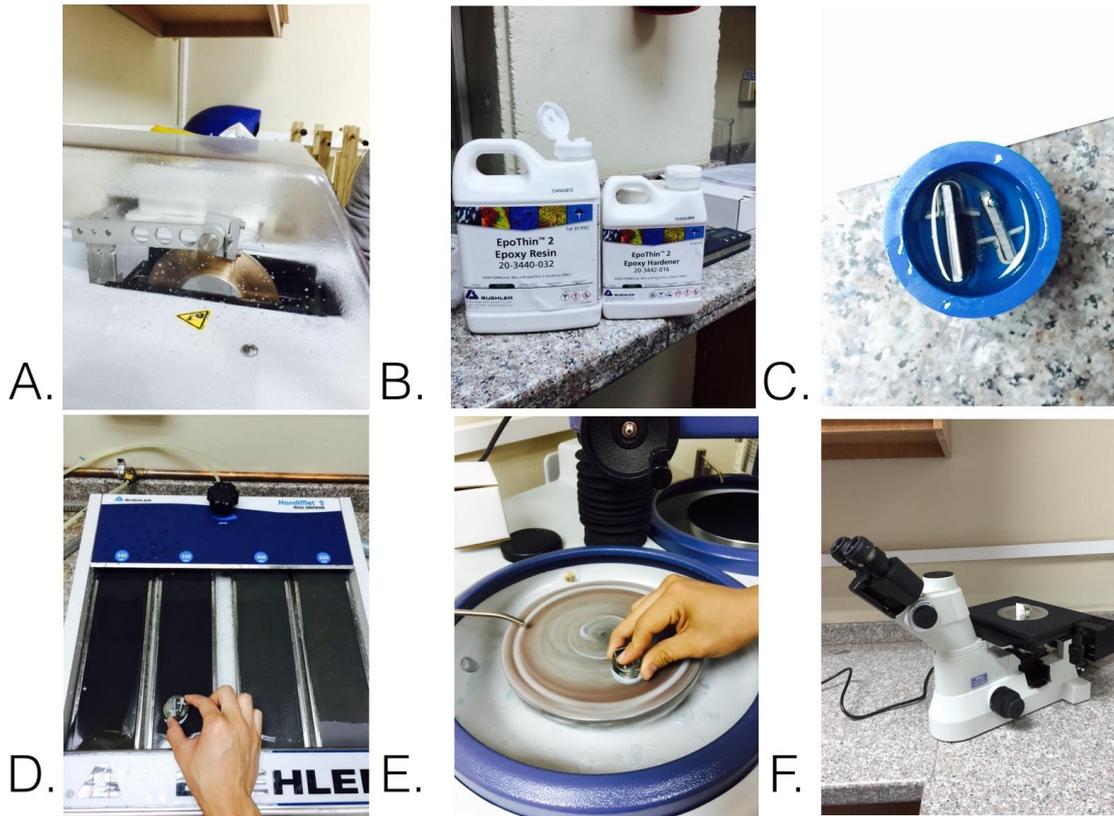


Figura 15: (A) Corte de las probetas con sierra de precisión. (B) Resina y endurecedor para realizar la mezcla para fácil manipulación de las probetas. (C) Probetas montadas en la mezcla de resina y endurecedor. (D) Preparación de probetas para el microscopio por medio de lijado. (E) Preparación de probetas por medio de pulido. (F) Montaje de probetas en el microscopio para su inspección.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos por modelado en las gráficas temperatura vs tiempo de las simulaciones basadas en solo recubrimiento o utilizando recubrimiento más aluminio. así mismo, se analiza el comportamiento de las probetas experimentales (ollas con recubrimientos, P1 y P2), con y sin agua junto con las curvas temperatura vs tiempo de la olla competidora Umco (de aluminio con inserto de acero inoxidable). Finalmente, se escoge un espesor de recubrimiento óptimo, se realiza un estudio del costo de fabricación para este espesor y se lo compara con el costo de la competencia.

4.1 Resultados de Simulaciones

A continuación se muestra los resultados de la simulación en Comsol utilizando varios espesores de recubrimiento de acero. En este caso se simula únicamente el comportamiento del recubrimiento, sin tomar en cuenta la presencia de la olla de aluminio, con lo cual se puede apreciar la tendencia de calentamiento en el tiempo para cada espesor.

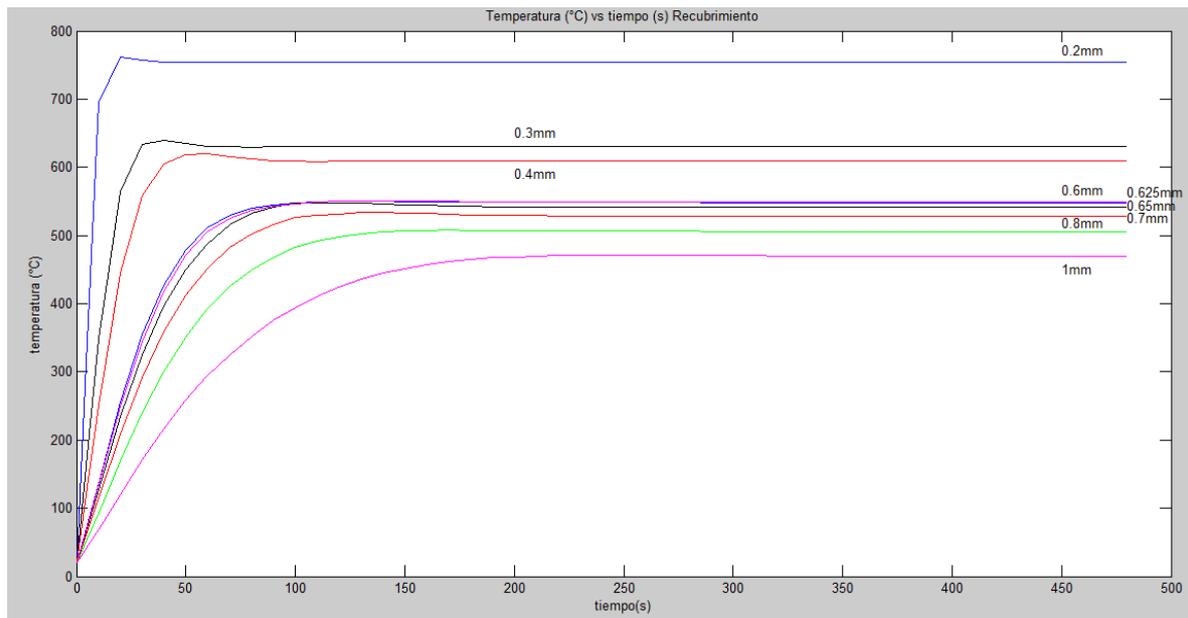


Figura 16: Curvas temperatura vs tiempo para varios espesores de recubrimiento

Como se puede observar en la Figura 16, según las simulaciones existen distintos rangos de funcionamiento a los cuales los recubrimientos funcionan mejor que otros. De acuerdo, con esta figura existe una clara tendencia del comportamiento de las curvas de temperatura vs tiempo en función del espesor del recubrimiento. A medida que el espesor incrementa, el desempeño disminuye. Esta tendencia es evidente dado que mientras mayor es el espesor, las temperaturas máximas alcanzadas y los tiempos de calentamiento disminuyen.

El fenómeno de efecto piel permite explicar el comportamiento de estas curvas. Para esto primero se determina el valor de profundidad de piel (δ), con el fin de identificar en que espesor de material se acumula el 63% de densidad de corriente. La expresión para calcular la profundidad de piel es la siguiente:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Dónde:

ρ = resistividad

μ_0 = permitividad magnética del vacío

μ_r = permitividad magnética relativa

f = frecuencia resonante

De acuerdo a esta expresión se puede determinar que la profundidad de penetración depende tanto de las propiedades del material inducido (ρ, μ_r) como de la frecuencia (f) a la cual se encuentra la corriente alterna del inductor. La resistividad es una capacidad inherente en los materiales y se refiere a la resistencia eléctrica específica para oponerse al paso de la corriente eléctrica, en cambio la permitividad magnética es una propiedad que describe como el material afecta o es afectado por un campo magnético. Tomando en cuenta las variables de las que depende δ , se puede entonces evidenciar que mientras mayor sea la conductividad, la permitividad magnética del material o mayor sea la frecuencia a la que se ve sometido el campo magnético, menor es la profundidad de penetración y por ende el sector donde se genera el calor se reduce a una zona más cercana a la superficie. Esto provoca una sección “fría” de mayor tamaño en el centro del recubrimiento hacia donde se transfiere, como pérdida, parte del calor generado por inducción.

Para aplicar esta fórmula se utilizan los parámetros predeterminados por la cocina de inducción y el material de recubrimiento (acero), con lo cual se obtiene la profundidad de piel:

$$\text{Para el acero: } \rho = 0.16 \mu\Omega m, \mu_r = 55 \frac{Tm}{A}$$

$$\text{Por la cocina: } f = 20 \text{ kHz}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{0.16}{\pi \times 20 \times 10^3 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 55}}$$

$$\delta = 0.2 \text{ mm}$$

Con este valor se puede entender el por qué el recubrimiento de 0.2mm es el que posee las mejores características de calentamiento, tanto por temperatura máxima alcanzada como por menor tiempo de calentamiento.

A medida que el espesor del recubrimiento aumenta, la profundidad de piel no lo hace dado que depende únicamente de las propiedades magnéticas del material y de la frecuencia de la cocina, por lo tanto, permanece constante para todos los espesores. Esto ocasiona una zona fría cada vez mayor en el centro del recubrimiento a medida que este aumenta en espesor, en donde se consume cada vez mayor porcentaje de calor generado.

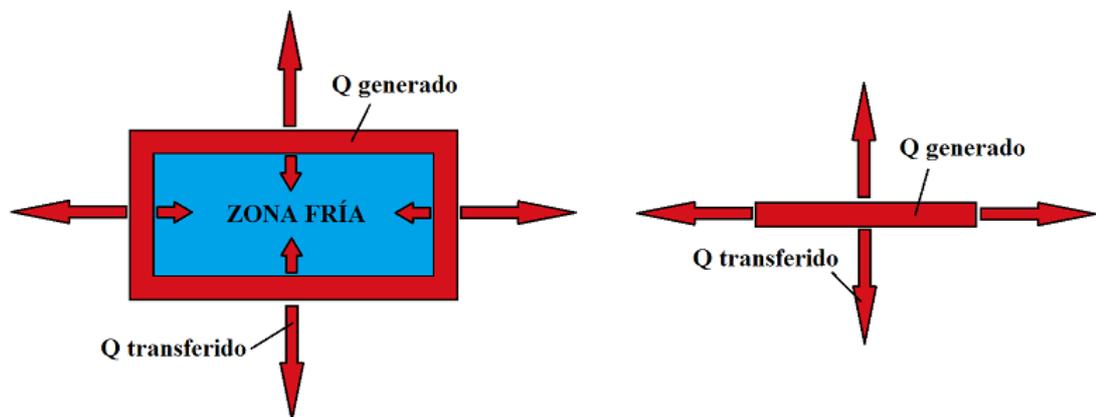


Figura 17: Diferencia en la transferencia de calor en un placa gruesa (izq) con una placa delgada (der)

Hacia la zona fría, el calor generado por inducción en la superficie, se desvía mediante conducción como se puede observar en la Figura 17 (izq). Esto impide que todo el calor generado vaya directamente a la olla a calentar y que se consuma una parte de este calor en el mismo recubrimiento. Lo opuesto sucede en los recubrimientos delgados debido a que la profundidad de penetración o la zona de generación de calor abarca prácticamente todo el recubrimiento, minimizando así, la zona fría en el centro, como se ve en la figura 17 (der).

Esto explica la tendencia de las curvas de la figura 16 a disminuir su desempeño con mayores espesores.

Por lo tanto para espesores mayores la intensidad de corriente disminuye exponencialmente mientras que para espesores menores la intensidad de corriente prácticamente no se vería afectada. Esto se debe a que al ser tan delgada la capa de recubrimiento, entonces se la podría considerar en su totalidad simplemente como una superficie y no como un cuerpo.

Los resultados obtenidos en la Figura 16 permiten eliminar del análisis a los recubrimientos que sean mayores a 0.7 mm debido a que si bien estos espesores pueden llegar a cumplir con las temperaturas de funcionamiento, su desempeño no es el óptimo dado que existen recubrimientos de menor espesor que pueden transferir mayor cantidad de energía.

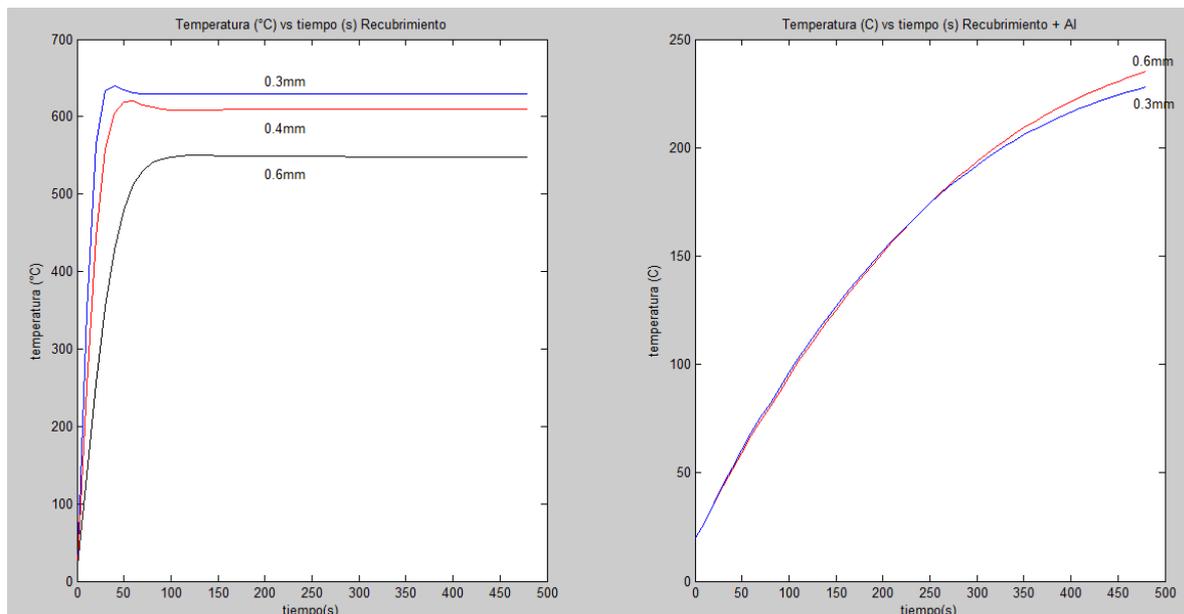


Figura 18: Curvas temperatura vs tiempo para: recubrimientos más relevantes (izq), recubrimiento + aluminio (der)

Por otro lado, en la Figura 18 (der) se muestra la tendencia de las curvas de la simulación al aumentar el disco de aluminio sobre el recubrimiento, aquí se puede apreciar que el comportamiento de estas curvas se invierten en relación a la Figura 18 (izq).. Es importante destacar que mientras en la Figura 16 las temperaturas fueron tomadas a partir del recubrimiento, en la Figura 18 (der) las temperaturas fueron obtenidas a partir del disco de aluminio. En el caso de la Figura 18 (der) de recubrimiento más aluminio, se evidencia la tendencia de que mientras más grueso es el recubrimiento, mayores temperaturas y mayores velocidades de calentamiento son alcanzadas en el plato de aluminio.

Esta inversión en la tendencia de las curvas se debe a la presencia del disco de aluminio. Cuando se introduce el disco de aluminio sobre el disco de acero, la corriente inducida en el acero fluye directamente hacia la zona del aluminio debido a su menor resistividad ($\rho_{Al} = 2.65 \times 10^{-8} \Omega m$). Para los espesores de acero más delgados la mayor parte de la corriente inducida fluye hacia el aluminio sin consumirse en suficiente cantidad en el acero. Esto se puede observar en la figura 19, donde la densidad de corriente inducida se acumula en el disco de aluminio. Sin embargo, para el espesor de 0.3 mm, figura 19 (arriba), la concentración de la densidad de corriente inducida es mayor en el aluminio que para el espesor de 0.6 mm, figura 19 (abajo). Lo que representa un mayor consumo de la corriente inducida en el recubrimiento de acero de 0.6 mm dado que se pierde menos cantidad de corriente hacia el aluminio, en comparación con el espesor de 0.3 mm.

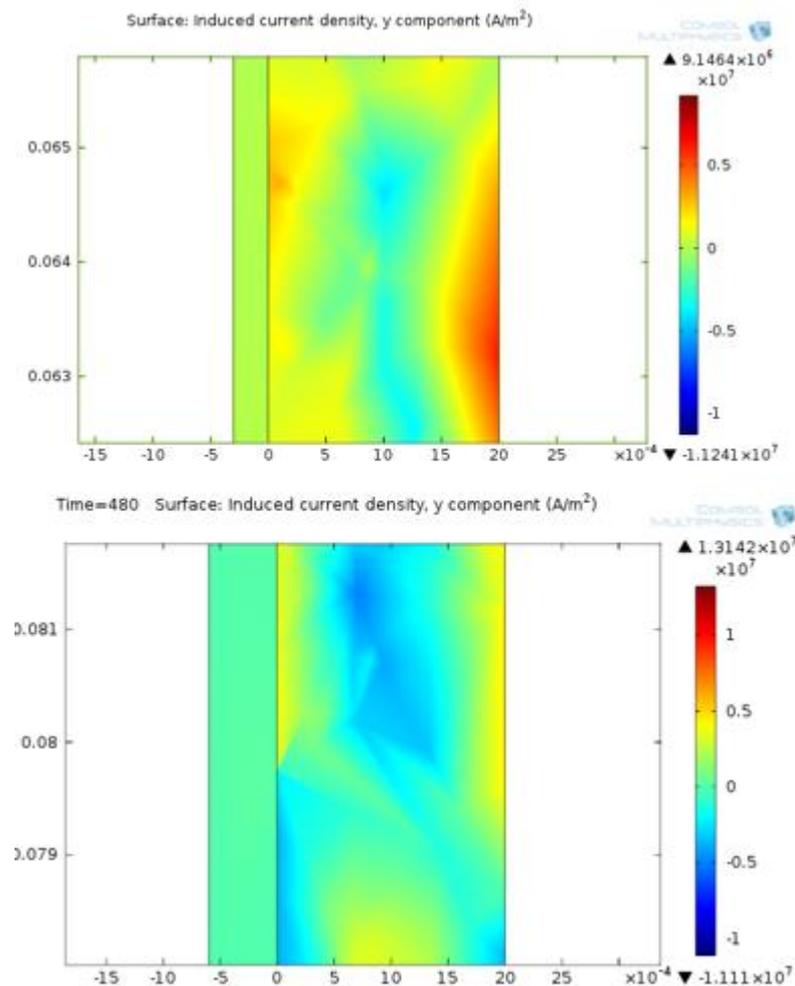


Figura 19: Densidad de Corriente inducida vs espesor del disco de acero y de aluminio para espesor 0.3mm (arriba) y 0.6 mm(abajo)

Esto demuestra que para recubrimientos delgados la corriente que fluye hacia el aluminio no genera la potencia necesaria para lograr las temperaturas requeridas debido a su baja resistencia. En cambio, para recubrimientos mas gruesos la corriente inducida se pierde en su mayoría en el propio acero por lo que la cantidad de corriente que se pierde en el aluminio no es significativa.

Como la potencia depende de la corriente y de la resistencia de acuerdo a la ecuación 4, entonces mientras mayor cantidad de corriente se pierda en el recubrimiento de acero mayor potencia se puede generar, alcanzando mayores temperaturas. Esto demuestra que el

cambio de tendencia en las curvas de la figura 18 se debe a la presencia del disco de aluminio.y permite identificar que un mayor espesor logra un mejor desempeño finalmente.

Este fenómeno permite eliminar del análisis a los espesores, más delgados, menores a 0.3 mm dado que no tienen la capacidad de calentar y aumentar la temperatura del disco de aluminio a valores de interés. Además de esto los recubrimientos demasiado delgados tienen problemas para ser detectados por los sensores de las cocinas de inducción. Los sensores utilizados para detectar la presencia de materiales ferromagnéticos son del tipo capacitivo o resistivo, los cuales necesitan una mínima cantidad de material para generar una respuesta. Cuando los espesores son muy delgados pueden causar conflicto con su detección y los vuelve poco confiables.

4.2 Resultados Experimentales

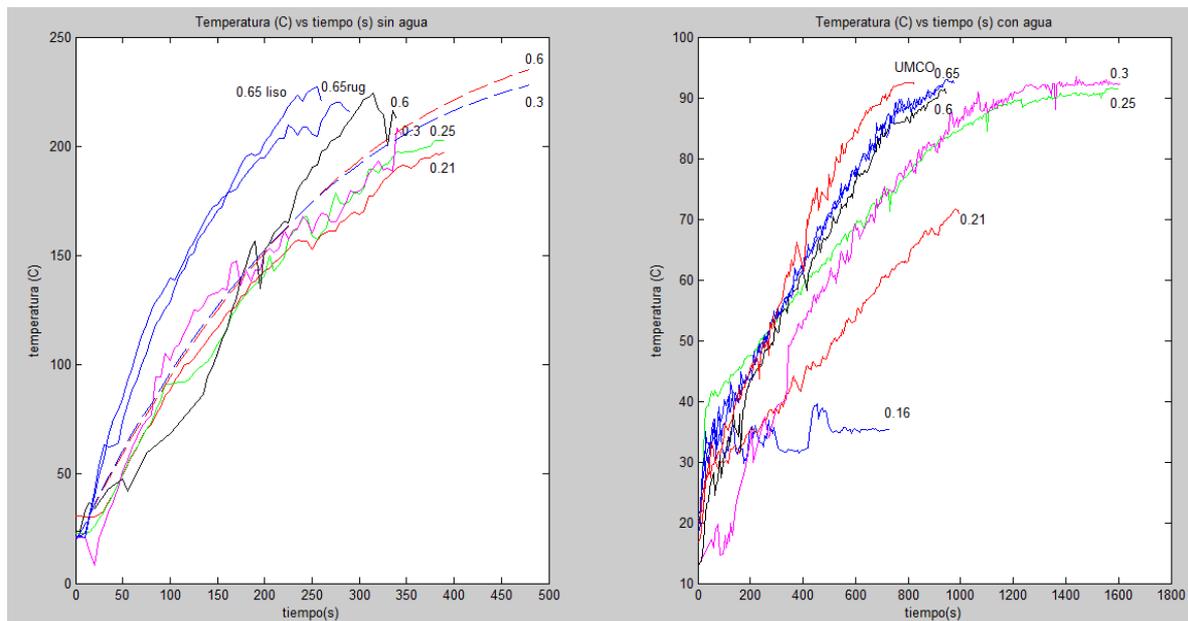


Figura 20: Curvas temperatura vs tiempos experimentales con varios espesores de recubrimiento: sin agua (izq), con agua (der)

Una vez realizada la etapa de simulaciones computacionales, se han obtenido el rango de espesores entre los cuales se encuentra el óptimo para la aplicación de calentamiento por inducción. La Figura 20 muestra las curvas de temperatura tiempo para los espesores que fueron escogidos: 0.21, 0.25, 0.3, 0.6, 0.65mm.: La Figura 20 (izq) muestra el comportamiento de cada probeta (olla) utilizando los distintos recubrimientos pero sin agua en su interior. Para tiempos aproximados de 5 minutos y medio o 330 segundos se puede observar en la Figura 20 (izq) que la tendencia de las curvas es logarítmica y tienden a llegar a los 200°C aproximadamente.

Es importante tomar en cuenta en la figura 20(izq) que las curvas de 0.25, 0.3, 0.6 y 0.65 mm no muestran una diferencia significativa entre ellas en lo que respecta a la temperatura máxima en el estado estable pero si con respecto al tiempo. Esto implica en principio que cualquiera de estos espesores es una opción viable al momento de escoger un

recubrimiento, si se toma en cuenta solo la temperatura máxima alcanzada, Por otro lado, al tomar en cuenta la velocidad de calentamiento (relacionado a la potencia entregada), los recubrimientos más delgados tienen bajos desempeños en comparación con los más gruesos . De esta manera se puede observar que el espesor de 0.65mm, rugoso y liso, es el más eficiente de todos, tanto por alcanzar una mayor temperatura (220°C) como por lograrlo en un tiempo menor al de los demás (250 segundos). A pesar de que todas las curvas tienen un comportamiento similar, se puede destacar que mientras mayor es el espesor de recubrimiento mayores temperaturas alcanza la probeta y en menor tiempo. Esto se comprueba con las curvas de simulación en línea entre cortada, las cuales se ajustan con mucha precisión a las curvas reales. Por tanto, la Figura 18 (der) que muestra las simulaciones previas a la elección del rango de espesores óptimos es una buena referencia, y otorga confiabilidad en que los espesores escogidos a partir de la simulación verdaderamente son los óptimos.

Por otro lado, la Figura 20 (der) muestra la misma tendencia de las curvas temperaturas vs tiempo de los recubrimientos mostrados en la Figura 20 (izq) pero en este caso utilizando 2 litros de agua dentro de la olla. Para este nuevo caso, se observa que el desempeño de los recubrimientos ya no es similar entre todos, incluso el de 0.16mm y el de 0.21 mm ni siquiera cumplen con el requisito de llegar a la temperatura de 92°C necesaria para hervir el agua a la altura de la ciudad de Quito.

Esto demuestra una clara diferencia de desempeño entre los recubrimientos cuando existe agua y cuando no. La principal causa para este cambio en el desempeño se debe a la absorción de calor por calentamiento y la absorción de calor latente consumido al evaporar agua.

Durante el calentamiento del agua dos procesos térmicos suceden simultáneamente en ella. Primero, al transferir calor al agua, ésta incrementa su energía interna (ΔU) o calor

sensible, lo cual produce un incremento en la temperatura. Este incremento inicia en la temperatura ambiente (20°C) hasta llegar a la temperatura de ebullición (92°C en Quito). Un segundo mecanismo que es la evaporización también absorbe energía del fluido para evaporar las moléculas de agua en la superficie. La cantidad de energía que se necesita para la evaporización es la mínima energía necesaria para vencer la tensión superficial.

Una vez que el agua en Quito ha alcanzado los 92°C se produce la ebullición y se genera el cambio de fase de líquido a vapor. El recubrimiento debe ser capaz de generar y transferir un calor igual a la suma del calor sensible y calor latente para lograr hervir el agua.

$$Q_{transferido} = Q_{sensible} + Q_{latente} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Como se puede observar en la Figura 20 (der) el recubrimiento de 0.16 mm no logra proveer de esta cantidad de energía ya que la temperatura del agua no incrementa en más de 10°C y al mismo tiempo se observa que el momento en que empieza a evaporarse parte del agua, la temperatura disminuye drásticamente, por lo tanto, este espesor no es capaz de proveer la energía necesaria para incrementar la temperatura ni para lograr un cambio de fase. Lo mismo ocurre con el recubrimiento de 0.21mm, solo que en este caso se observa que su falencia es respecto al calor sensible ya que necesita mayor cantidad de tiempo para incrementar la temperatura hasta el punto crítico de 92°C. En este caso el calor latente no es un problema ya que no se observa caídas drásticas de temperatura mientras se produce la evaporización.

Para los demás recubrimientos se observa que todos llegan a la temperatura crítica de 92°C y en ninguna de sus curvas se observan caídas abruptas de temperatura, por lo cual se puede suponer que todos los recubrimientos a partir de 0.25 mm son aptos para la aplicación. Sin embargo como sucede en la Figura 20 (der) el espesor de 0.65 mm es el que mejor desempeño muestra respecto a velocidad de calentamiento.

En la Figura 20 también se puede contrastar con la curva de la olla competidora de este proceso, que es de la marca UMCO, la cual utiliza un plato de acero embutido en lugar de un recubrimiento. Según la Figura 20 (der) la diferencia entre la olla UMCO y la probeta con recubrimiento de mejor desempeño (0.65 mm) es de 1 minuto y medio (90 segundos), lo cual demuestra un desempeño aceptable en el recubrimiento de 0.65 mm. Por tanto, este es el espesor que se escoge finalmente como el óptimo y es justamente a este recubrimiento al que se lo va a utilizar para producir una nueva probeta, con el objetivo de replicar los resultados obtenidos.

4.3 Resultados Producto Final

En la Figura 21 se puede observar el comportamiento de las curvas temperatura vs tiempo para la probeta original (P1) y para la probeta replicada (P2). En la Figura 21 (izq) se puede ver la comparación entre las probetas con recubrimiento y la olla UMCO utilizando 2 litros de agua. Para el periodo de tiempo de 16 minutos o 960 segundos, la tendencia de las curvas es muy similar, tanto para el recubrimiento de 0.65 mm rugoso y liso. A pesar de que la olla UMCO tiene una velocidad de calentamiento mayor, es decir, llega a la temperatura crítica de 92°C en 1 minuto y medio antes que la ollas con recubrimiento, esto no representa una diferencia significativa que afecte el rendimiento de las probeta con 0.65 mm de recubrimiento.

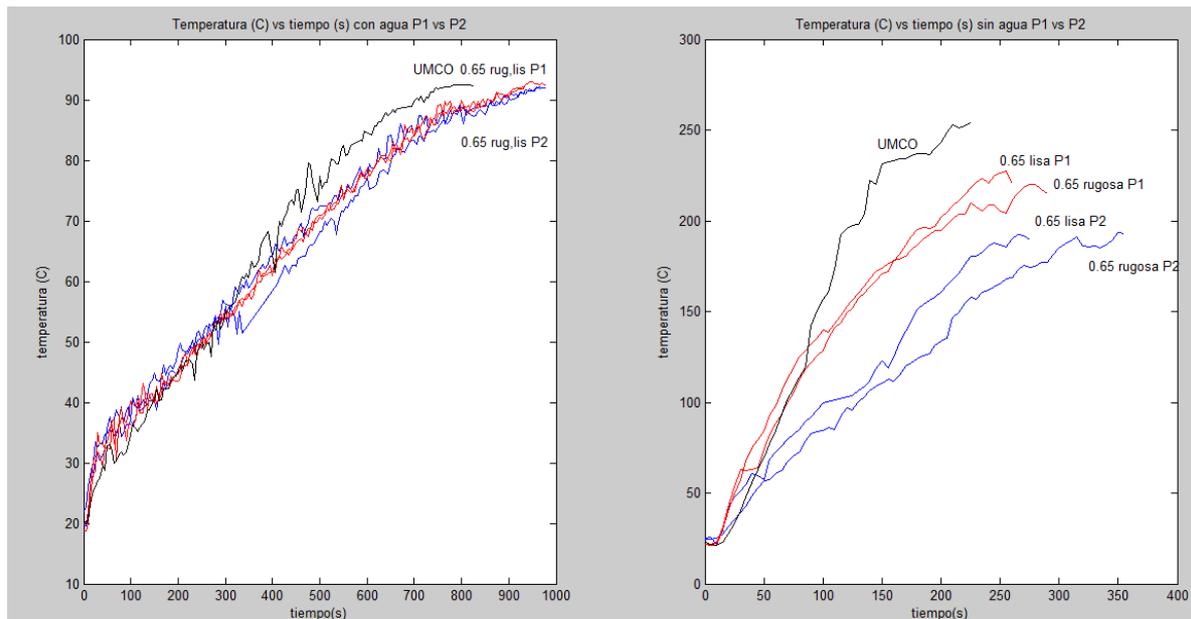


Figura 21: Comparación curvas temperatura vs tiempo P1 vs P2 vs UMCO: con agua (izq), sin agua (der)

Por otro lado, en la Figura 21 (der) se puede observar en cambio, las curvas temperatura vs tiempo de la probeta original (P1) y probeta replicada (P2). En este caso se nota una ligera diferencia entre los comportamientos de los recubrimientos rugosos y lisos. Esto se debe, básicamente, que al no existir agua a donde transferir la energía, todo el calor se transfiere a las probetas por lo que la diferencia en el comportamiento térmico se debe exclusivamente al tipo de acabado que posee la olla.

Se debe tomar en cuenta también que la diferencia existente entre las curvas de la probeta P1 y las curvas de la probeta P2 en la Figura 21 (der) se debe al tipo de acabado final que tienen cada una. La probeta P1 ha sido lijada a mano con una lija 120, mientras que la probeta P2 ha sido lijada con una amoladora y un disco de lija 120. Esto permite inferir que en la probeta P2 se ha removido mayor cantidad de material que la probeta P1 y por lo tanto esta diferencia de material removido provoca que la generación de energía disminuya, al igual que la temperatura máxima que alcanza la pieza.

4.4 Análisis de Corrosión y Metalografía

Los resultados de medición de peso perdido por corrosión de las probetas después de haber sido sometidas a la cámara salina por cuatro horas se los muestra en la figura 22. La figura indica el peso por centímetro cuadrado de la probeta después del transcurso de cada hora que pasó en la cámara salina. Se puede observar que la probeta de acero bajo carbono pierde peso significativamente con el transcurso de cada hora, esto se debe a que el acero no posee ningún tipo de resistencia a la corrosión por tanto se corroe fácilmente en la cámara salina y pierde peso. Esta probeta nos permite observar cual sería el comportamiento del recubrimiento sin la capa de acero inoxidable, que definitivamente muestra poca durabilidad. En cuanto a las demás probetas: probeta lijada, probeta rugosa 1 y probeta rugosa 2, se puede observar un aumento del peso por centímetro cuadrado por cada hora transcurrida, esto implica que las probetas al contrario de perder peso por la corrosión, aumentan el peso al ser sometidas al ambiente salino.

La figura 23 muestra el porcentaje de masa de las probetas con el transcurso de tiempo en la cámara salina. El acero bajo carbono pierde masa porcentual por cada hora transcurrida como en la figura 22. Pero las demás probetas no muestran un aumento de peso continuo como en la anterior figura, estas poseen picos de aumento y disminución porcentual de masa y aparentemente poseen una conducta periódica que podría demostrar un comportamiento estable, sin embargo no se posee mayor cantidad de datos para afirmar esta suposición. Adicionalmente, se puede observar que el comportamiento de las probetas rugosas es muy similar entre ellas, lo que nos demuestra coherencia en el ensayo corrosivo realizado. La diferencia de las probetas rugosas con la probeta lisa recae en el acabado superficial que poseen las probetas ya que mientras más rugosidades presente la probeta, más acumulación de sal se dará en la misma. Es por ello la diferencia de comportamiento.

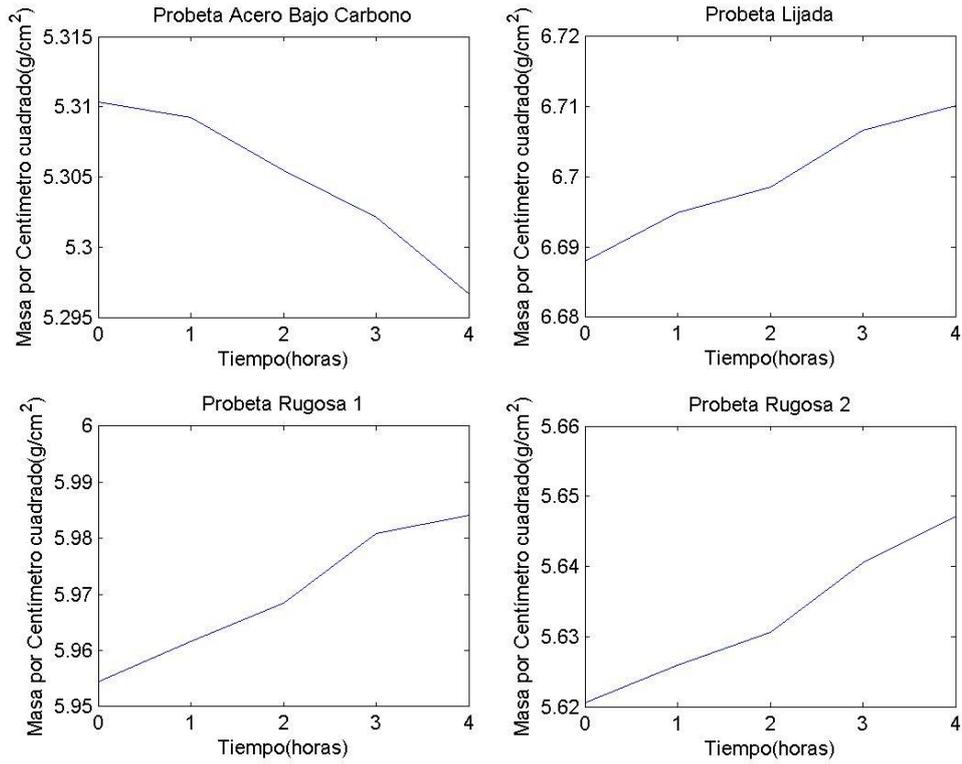


Figura 22: Masa perdida por centímetro cuadrado vs tiempo de exposición en la cámara salina para las probetas; acero bajo carbono, lijada, rugosa 1, rugosa 2.

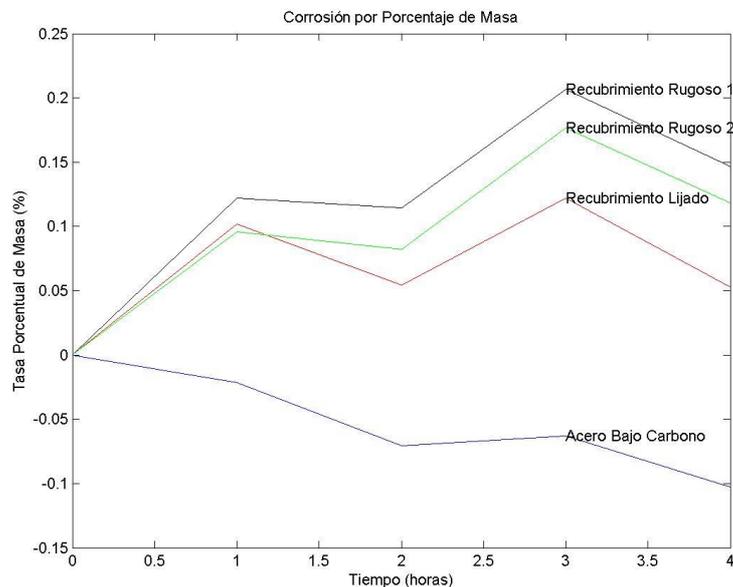


Figura 23: curvas tasa porcentual de masa vs tiempo de exposición en la cámara salina para probetas; acero bajo carbono, lijada, rugosa 1, rugosa 2.

La metalografía nos ayuda a tener una idea más clara de los resultados de la prueba corrosiva. En la figura 24 se muestra la microestructura de una probeta rugosa que fue

sometida a la cámara salina. Se puede observar que el recubrimiento presenta delaminación por la franja negra entre el sustrato y la base. De igual forma se puede distinguir que el recubrimiento presenta óxidos debido al proceso de termorociado en el cual las partículas fundidas al momento de ser disparadas de la termorociadora tienen contacto con el oxígeno presente en el ambiente, formándose así los óxidos observados. También se distinguen porosidades que se deben a la carencia de buena adherencia durante la deposición del recubrimiento.

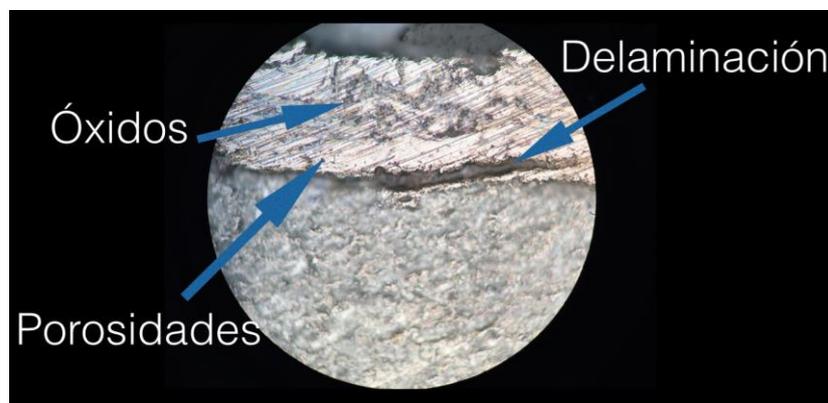


Figura 24: Microestructura de probeta rugosa 1 sometida a la cámara salina.

En la figura 25, se tiene la microestructura de una segunda probeta rugosa sometida en la cámara salina. En dicha microestructura se pueden observar que en la superficie externa del recubrimiento se encuentra una acumulación de sal, lo cual demuestra que a mayor rugosidad presente, mayor es la acumulación de fluidos salinos en la superficie. De igual manera presenta, porosidades y óxidos.

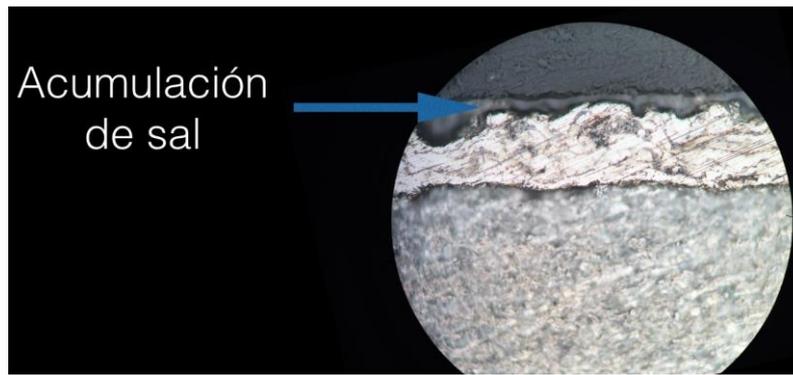


Figura 25: Microestructura de probeta rugosa 2 sometida a la cámara salina.

La microestructura de la probeta lisa sometida a la cámara salina de la figura 26 muestra claramente una delaminación presente ocurrida por la corrosión de la cámara salina en la interface recubrimiento y material base. Sin embargo la probeta no presenta acumulación de sal en la superficie externa como la probeta rugosa debido al acabado liso que posee ésta, o porque probablemente los residuos de sal filtraron a través de la microestructura, y se acumularon en la interface, produciendo posteriormente la delaminación.

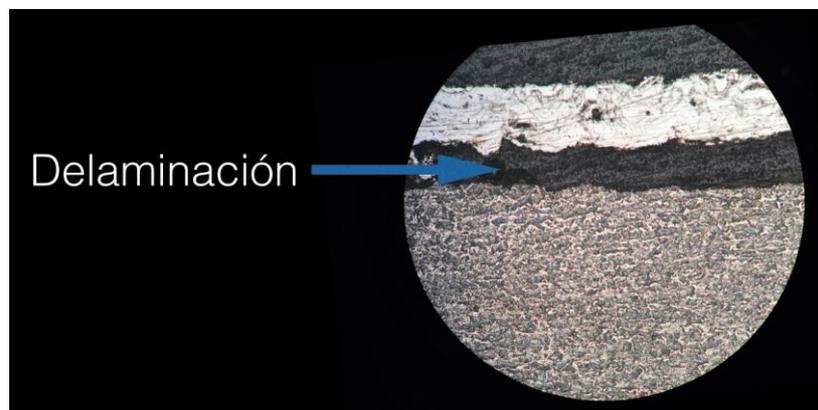


Figura 26: Probeta lisa sometida a la cámara salina.

En la figura 27 se muestra una probeta rugosa sin ser sometida a la cámara salina. Se puede distinguir que no se ha realizado un acabado superficial a la probeta. De igual forma se distinguen franjas negras pequeñas entre el aluminio y el acero, esto se puede deber a problemas de adherencia durante el termorociado o residuos de material de la amoladora en el momento en que se realiza la preparación de la base de la olla.

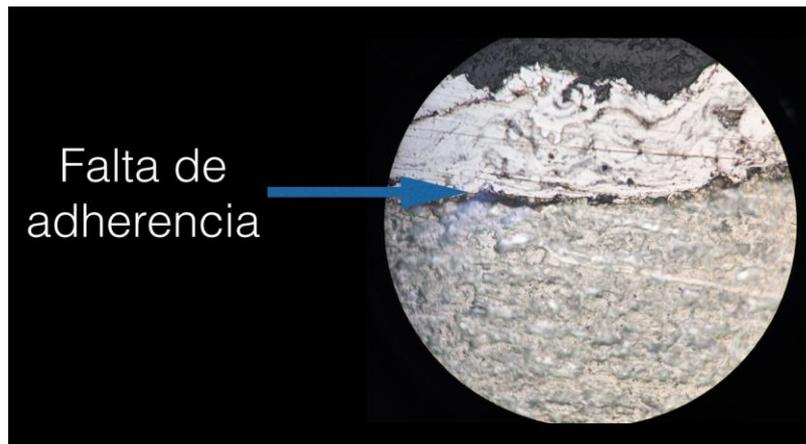


Figura 27: Probeta rugosa sin ser sometida a la cámara salina

La metalografía indica que existe acumulación de sal en el recubrimiento y esto ocasiona delaminación del mismo, además de poca adherencia en el momento de deposición del recubrimiento. Sin embargo, dicha acumulación salina disminuye con un acabado superficial de lijado. En la figura 28 se muestra una probeta de un recubrimiento rugoso delaminado, a la izquierda de la figura se puede observar el material base aluminio y a la derecha el sustrato del recubrimiento realizado. En la figura se puede distinguir la acumulación salina que existe en la interfase del recubrimiento, esto nos indica que la sal se filtra por el recubrimiento y se acumula en la interfaz causando la delaminación. Esta filtración se puede deber primero a porosidad interconectada y segundo a que la capa de acero inoxidable se protege a sí mismo de la corrosión pero no protege al resto del recubrimiento del ambiente salino.



Figura 28: Acumulación de sal debido a filtración presente en la interface entre el material base aluminio (izquierda) y en el recubrimiento de acero (derecha)

4.5 Análisis de Costos

Para realizar el análisis de costos es necesario considerar algunos factores referentes al dimensionamiento del recubrimiento, materiales, tiempos de los procesos (desde el montaje de la pieza en el torno para iniciar el recubrimiento hasta el acabado final) y el costo del operario en cada uno de los procesos. En lo que respecta al dimensionamiento del recubrimiento, se debe obtener su volumen a partir del radio y la longitud transversal que posee. Para el proceso de arc spray se consideran dos costos de material por los dos tipos de alambres utilizados. El alambre base es el acero a bajo carbono utilizado para los primero 0.6mm de recubrimiento, mientras que el alambre de protección a la corrosión tiene que ver con el acero inoxidable que ocupa los últimos 0.05 mm del total.

Así mismo, es necesario conocer la eficiencia del depósito de material que se va a utilizar, lo cual para Arc Spray es de 65%. Adicionalmente, se debe contabilizar el costo de cada uno de los alambres utilizados, para finalmente sumarlos al final en un solo costo total. Con los valores obtenidos se ha descrito la tabla 1, la cual muestra que los costos del

recubrimiento escogido se ajustan al medio social y económico ecuatoriano, lo cual cumple con lo que originalmente se planteaba como posible resultado.

Tabla 1: Costo Metalización Olla

METALIZACIÓN EN AREAS PLANAS			
DATOS	Longitud 1	133.00	mm
	Espesor Relleno	0.05	mm
	Espesor Base	0.55	mm
	Longitud 2	133.00	mm
	Densidad Alambre SS	7.14	g/cm ³
	Densidad Alambre Acero BC	7.80	g/cm ³
	Eficiencia	0.65	%
	Costo Alambre Relleno	72.80	USD/Lb
	Costo Alambre Base	2.27	USD/Lb
	Volumen Alambre Relleno	884.45	mm ³
	Volumen Alambre Base	9,728.95	mm ³
	Masa Alambre Relleno	6.31	gr.
	Masa Alambre Base	75.89	gr.
	Masa Real Alambre Relleno	9.72	gr.
	Masa Real Alambre Base	116.75	gr.
	Peso en Kilos Alambre Relleno	0.01	kg
	Peso en Kilos Alambre Base	0.12	kg
	Peso en Libras Alambre Relleno	0.02	Lb
	Peso en Libras Alambre Base	0.26	Lb
	Costo Alambre de Relleno	1.56	USD
	Costo Alambre Base	0.58	USD
	Costo Total Materiales	2.14	USD
	Costo Total de Metalización	2.14	USD

Sin embargo, a este valor obtenido se le debe aumentar el costo de operador/hora para obtener un estimado lo más cercano a la realidad. Para determinar el costo de operador/hora se debe también considerar cuanto tiempo utilizan para cambiar de una actividad a otra distinta, tomando en cuenta que la operación empieza al montar la pieza en el torno y finalizando con el acabado superficial. Para esto se hace uso de la tabla de ingresos de un operador como se muestra a continuación:

Tabla 2: Tabla de ingresos de un operador

Sueldo Básico vigente (informativo)	340.00	
EMPLEADO		
Sueldo empleado	400.00	
(-) Aporte Personal IESS (9.35%)	37.40	
(=) Total a recibir empleado mensualmente	362.60	
Beneficios mensuales del empleado		
Decimotercera remuneración	33.33	
Decimocuarta remuneración	28.33	
Vacaciones	16.67	
Fondos Reserva	33.33	A partir del segundo año
COSTO EMPRESA		
Sueldo	400.00	
(+) Aporte Patronal IESS (12.15%)	48.60	
(+) Decimotercera remuneración	33.33	
(+) Decimocuarta remuneración	28.33	
(+) Vacaciones	16.67	
(+) Fondos Reserva	33.33	A partir del segundo año
(=) Costo mensual primer año	526.93	
(=) Costo mensual segundo año	560.27	

A partir de la tabla 2 se puede obtener el costo que representa un operador de acuerdo a la ley, si se considera que el operador trabaja más de 2 años en la empresa el costo mensual es de 560.27 USD/mes. Además se debe tomar en cuenta los minutos exactos que se demora el operador en cada etapa del proceso como se muestra en la tabla 3, así como, la cantidad de horas que trabaja al mes. Tomando en cuenta que un operador normalmente trabaja 20 días al mes durante 8 horas, esto equivale a 160 horas al mes.

Tabla 3: Tiempos para cada proceso del Metalizado

Etapa	tiempo	segundos
Preparación	3 min 30 seg	210
Aplicación de acero	2 min	120
Cambio de alambres	1 min 15 seg	75
Aplicación de acero inoxidable	30 seg	30
Pulido	3 min 30 seg	210
Total		645

Tabla 4: Costos directos e indirectos

	USD por cada Olla
Metalizado	\$ 2.14
Maquinaria	\$ 0.16
Trabajadores	\$ 1.04
Costos indirectos	\$ 0.61

De acuerdo a la tabla 3, un operador se demora en todo el proceso del metalizado de la olla alrededor de 645 segundos. Por lo tanto, utilizando los valores obtenidos de la tabla 2 y 3 se realiza el siguiente cálculo:

$$\text{Costo del Operador} = 560.27 \frac{\text{USD}}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{160 \text{ horas}} \times \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ segundos}} \times 645 \text{ segundos}$$

$$\text{Costo del Operador} = 0.62 \text{ USD}$$

Además del metalizado se debe considerar los costos debido a la maquinaria involucrada en el proceso, tanto su costo como su depreciación. En la maquinaria se toma en cuenta la termorociadora, el compresor de aire, el torno y la amoladora. Para cada una de estas máquinas se considera la vida útil y el tiempo de uso. Además se considera el costo de trabajadores involucrados de manera directa (operador) y de manera indirecta en el proceso y se añade el costo indirecto que involucra luz, agua, teléfono y arriendo. Estos costos se encuentran en la tabla 4.

$$\text{Costo Recubrimiento} = 2.14 \text{ USD} + 0.16 \text{ USD} + 1.04 \text{ USD} + 0.61 \text{ USD}$$

$$\text{Costo Recubrimiento} = 3.95 \text{ USD}$$

Finalmente el valor obtenido de la tabla 2, que es de 2.14 USD/unidad se debe combinar con el valor de los costos obtenidos en la tabla 4 para determinar el costo total por pieza que es de 3.95 USD. Adicionalmente se debe considerar el precio de la olla de aluminio puesto que el recubrimiento sirve para re manufactura de ollas, en el caso que ya se posea la olla, y también para manufactura de ollas, en el caso que no se posea la olla. El precio de una olla de aluminio fabricada por repujado es de 12.48 USD, por lo tanto se debe tomar a consideración el siguiente cálculo para el costo final de fabricación:

Costo Total Fabricación = Costo Recubrimiento + Costo Olla

Costo Total Fabricación = 3.95 USD+12.48 USD

Costo Total Fabricación = 16.43 USD

Las opciones presentes en el mercado ecuatoriano son las ollas fabricadas de acero inoxidable y las ollas con incrustaciones de placas de acero inoxidable. Dichas ollas tienen un costo de 62.99 USD para la olla de acero inoxidable y 14.39 USD para la olla con incrustaciones de placas de acero inoxidable. Ambas ollas se presentan en la figura 298



Figura 29: Olla fabricada de acero inoxidable (izquierda) y Olla con incrustación de acero inoxidable (derecha)

El costo total de fabricación de la olla con recubrimiento es significativamente menor comparado con la olla de acero inoxidable y comparado con la olla con incrustación de acero inoxidable el precio muestra una variación de 2.04 USD. El precio de la olla con recubrimiento puede que no sea tan atractivo al consumidor al momento de adquirir una olla nueva para las cocinas de inducción, sin embargo puede ser muy atractivo sí lo que se

requiere es reutilizar las ollas que el consumidor ya posee, ya que en ese caso el costo es de 3.95 USD por olla, mucho menor al precio de la olla de acero inoxidable y con incrustación.

Cabe resaltar que por la versatilidad que presenta el recubrimiento, existen mercados atractivos para este proceso, como lo son las ollas con funciones específicas, ollas de gran tamaño como las tamaleras u ollas de presión. Estas ollas no poseen una alternativa para el modelo de cocina de inducción puesto que las incrustaciones de acero inoxidable ya vienen en un tamaño específico y son importadas al país por lo que no se puede adaptar al tamaño deseado de dichas ollas. En el caso de las ollas de acero inoxidable tampoco muestran ser una opción para este mercado ya que son importadas las ollas al país y la realización de una olla con esas medidas en acero inoxidable representaría un alto costo y no muy rentable para el tamaño de mercado que demandaría dicho producto.

5. CONCLUSIONES

Se determinó que el recubrimiento propuesto con los materiales ferromagnéticos acero y acero inoxidable demuestra un funcionamiento correcto en las cocinas de inducción, haciendo que utensilios carentes de propiedades ferromagnéticas funcionen en cocinas de inducción.

Se analizó un espesor óptimo de recubrimiento por medio de la modelación computarizada en Comsol y la experimentación aditiva, tomando en cuenta el desempeño de varios espesores y seleccionando al de mejor desempeño.

Se ha optimizado el recubrimiento obtenido por medio de análisis de desempeño, corrosivos, metalográficos y de costos, el cual se determinó que es 0.65 mm.

El espesor obtenido presenta igual desempeño que sus competidores en el mercado ecuatoriano. Para determinar aquello, se realizaron pruebas de rendimiento.

Se recomienda una re-manufactura de las ollas actuales de aluminio de la población ecuatoriana por medio del proceso de recubrimiento propuesto en el proyecto, el cual permite reutilizar y reusar las ollas de aluminio en cocinas de inducción, obteniendo un desempeño igual al de las ollas para cocinas de inducción presentes en el mercado ecuatoriano.

El recubrimiento presenta filtraciones de fluido salino hacia la interfase al ser sometido en ambiente corrosivo, estas filtraciones se reducen con el acabado superficial por medio de lija. Dichas filtraciones producen delaminaciones en el recubrimiento que hacen que no presente buena durabilidad en el tiempo.

El costo del recubrimiento partiendo de la manufactura de la olla es bajo comparado con la olla fabricada de acero inoxidable pero presenta un precio mayor en 2.04 usd al compararlo con la olla de incrustación de acero inoxidable.

El costo del recubrimiento partiendo de la re manufactura de la olla es significativamente bajo al compararlo con cualquier olla que se desee adquirir nueva. al reusar la olla, el costo del recubrimiento baja a 3.95 usd.

La versatilidad del proceso permite buscar mayores opciones en mercados específicos como de ollas de mayor tamaño, ollas de presión, tamaleras, etc., debido a que los otros procesos de producción de ollas para cocinas de inducción se dificultan presentar soluciones para este problema por el método de producción y el tamaño del mercado.

6. RECOMENDACIONES

Para realizar próximos recubrimientos, se propone realizarlos con un proceso robotizado y automatizado, en donde se pueda controlar el avance, deposición y alimentación del sustrato para evitar el error humano y garantizar las características buscadas en el recubrimiento.

Se recomienda también realizar el acabado superficial con un sistema más sofisticado que asegure no remover mayor cantidad de espesor de recubrimiento que la deseada.

Se debe utilizar un método alternativo para la preparación superficial del material base (olla) que mejore la adherencia del recubrimiento, por ejemplo sandblasting.

Es importante considerar el uso de otro material anticorrosivo para aplicarlo como capa protectora para no afectar de manera significativa el costo del recubrimiento como, por ejemplo, níquel o aluminio.

Por último se recomienda utilizar otro proceso para la deposición del recubrimiento como, por ejemplo, la técnica de deposición por flama en lugar del termorociado debido al alto costo de la máquina termorociadora.

7. REFERENCIAS

1. **Antonio, C. C., & Tito Saráuz, D. G.** (2009). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA COCINA DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA*. QUITO.
2. **Barragán, I. G.** (2012). *EL CONCEPTO DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ EN CURSOS INTRODUCTORIOS DE FÍSICA EN LA UNIVERSIDAD: Dificultades de Aprendizaje y la Presentación del Concepto en los Libros de Texto*. Valencia.
3. **Beer, F., Russell E., DeWolf, J., Mazurek, D.** Mecánica de Materiales. (2010). México. 5th ed., Mc Graw Hill.
4. **Callebaut, J.** (2011). *APPLICATION NOTE INDUCTION HEATING*. European Copper Institute.
5. **Cengel, Y., & Boles, M.** Termodinámica. (2008). México. Mc Graw Hill.
6. **Colorado.** (s.f.). *ecee.colorado.edu*. Recuperado el 19 de Junio de 2014, de <http://ecee.colorado.edu/~ecen3400/Chapter%2020%20-%20The%20Skin%20Effect.pdf>
7. **Fairchild semiconductor, “Induction Heating System Topology Review”, Julio 2000, <http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9012.pdf>**
8. **Foley, A.** Multiphysics Simulation helps Miele To Optimize Induction Stove Designs. (2013). Internet http://www.comsol.com/story/download/179755/Miele_CN2013.pdf. Recuperado: 09 de Julio 2014.
9. **Giancoli, D.** Física para ciencias e ingeniería con física moderna. Vol II. (2009). México. 4th ed. Prentice Hall.
10. **Gómez, V. E.** (2003). *INFLUENCIA DE LOS COMPONENTES PARÁSITOS EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE INVERSORES RESONANTES PARALELO PARA APLICACIONES DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN*. Valencia: Servei de Publicacions.
11. **Griesmer, A.** Inductive Heating of a Billet Simulation Tutorial. (2013). Internet. <http://www.comsol.com/blogs/inductive-heating-billet-simulation-tutorial/>. Recuperado: 09 de Julio 2014.
12. **Groover, M.** Fundamentals of modern manufacturing. (2007). United States of America. 3th ed. Wiley.

13. **Hauser, W. M. and Lund, R. T.** (May 2008) *Remanufacturing: Operating Practices and Strategies*, Boston University. Available through www.bu.edu/remman
14. **HSEB Notes Applications of Eddy Current - Physics Grade XII**, Internet, <http://www.myhsebnotes.com/2014/01/application-of-eddy-current-physics-grade-xii.html>
15. **Imura Mamoru.** Induction cookware with ferromagnetic coating and coating method. Patente. WO 2006050490 A3. 2005.
16. **Incropera, F. P.** (2011). *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons.
17. **Lund, R. T.** – (January 1985) *Remanufacturing: The Experience of the United States and Implications for Developing Countries*, World Bank, UNDP Project Management Report No. 2.
18. **Madhusoodanan, K.** Finite element simulation of Induction heating of a tubular geometry. (2012). Internet http://www.comsol.com/offers/conference2012papers/papers/file/id/13570/file/16233_madhusoodanan_paper.pdf. Recuperado: 10 de Julio 2014.
19. **Telkomnika, K.** Induction Heating Process Design Using Comsol Multiphysics Software. (2011). Internet <http://telkomnika.ee.uad.ac.id/n9/files/Vol.9No.2Agt11/1RP9.2.08.11.08.pdf>. Recuperado: 10 de Julio 2014.