



PROIAT

2015



Anexo 4: REPORTE TÉCNICO DEL PROYECTO

Desarrollo de Metodología de Simulación Fluidinámica Aplicada a la Optimización del Proceso de Temple de Muelles de Suspensión Automotriz

Dirección General de Industrias Pesadas y de Alta Tecnología

Índice

| | Pág. |
|---|-------------|
| Resumen Ejecutivo | 3 |
| Justificación Científica y tecnológica | 4 |
| Equipo de Trabajo | 5 |
| Etapas del Proyecto y actividades realizadas | 6 |
| Descripción detallada de las Etapas | 7 |
| 1) Capacitación Especializada | 7 |
| 2) Estudios de caracterización y modelación | 8 |
| 3) Experimentación Virtual | 17 |
| 3.1 Desarrollo del modelo CFD y transferencia de calor | 17 |
| 3.2 Desarrollo de experimentos en Prototipo virtual | 22 |
| 3.2.1 Medición en Laboratorio del coef. de transf. de calor | 24 |
| 3.2.2 Definición de parámetros clave | 26 |
| 3.2.3 Optimización de sistema actual de flujo unidireccional | 27 |
| 3.2.4 Experimentación virtual de flujo bidireccional | 28 |
| 3.2.5 Desarrollo de un modelo de deformaciones, FEM | 28 |
| 4) Revisión de Resultados y conclusiones | 33 |

Resumen Ejecutivo:

El proyecto consiste en **Desarrollo de Metodología de Simulación Fluidinámica Aplicada a la Optimización del Proceso de Temple de Muelles de Suspensión Automotriz.**

La distorsión es un fenómeno inherente en el proceso de temple y la presente investigación se enfocó en identificar, modelar, correlacionar y evaluar su comportamiento.

Para ello se planteó la contratación de Consultoría Especializada del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados CINVESTAV Unidad Saltillo, con dos Investigadores con Doctorado en Ciencias de Materiales y experimentados en procesos de Temple y distorsión. De las actividades destacables, se desarrolló una metodología de simulación fluidinámica mediante software avanzado para el desarrollo de modelos numéricos integrando fenómenos de flujo de fluidos, transferencias de calor, transformación de fase y distorsión.

En base a estudios previos realizados, donde se concluyó que la distorsión resultante del proceso de temple y formado en muelles de suspensión se reduce al incrementar su rapidez de transformación martensítica, se planteó la siguiente hipótesis:

“Si podemos incrementar y controlar la transferencia de calor en el proceso de temple y formado de muelles de suspensión, asegurando su completa transformación de fase mediante la optimización del sistema fluidinámico, podremos reducir la distorsión resultante del proceso”.

Es entonces donde se planteó la necesidad de estudiar el fenómeno de flujo de fluidos en el proceso de temple, en base al desarrollo de modelos computacionales de elemento finito que reflejen el comportamiento físico de las muelles durante el tratamiento térmico, a la vez que el personal desarrolle conocimiento especializado en tecnologías de simulación en fluido-dinámica.

Justificación Científica y Tecnológica:

Actualmente, los procesos de manufactura experimentan tendencias a generar cada vez más números de parte y lotes más pequeños. Para los siguientes años, se prevé que este fenómeno continúe presentándose debido a las tendencias del usuario final que busca automóviles cada vez más personalizados. Por otra parte, las exigencias en el control dimensional en las autopartes para suspensión que requieren de los nuevos mercados, como es el caso de los vehículos comerciales, promueve implementar estrategias que potencien ventajas de competencia en los procesos de manufactura a través de nuevas tecnologías.

El principal objetivo buscado con el presente proyecto fue busca potenciar las capacidades humanas y tecnológicas disponibles para la optimización de procesos de temple, con el fin de tener mejor posición competitiva en las plataformas de mercado actuales y las nuevas. Por otro lado, también se buscó aportar al estado del arte de la Ingeniería de los materiales y procesos al incursionar investigación científica y tecnológica en temas de interés industrial; por un lado la predicción del comportamiento geométrico de piezas tratadas térmicamente y por otro las transformaciones de fase difusionales y no difusionales que experimentan los aceros en su conversión a materiales funcionales con alto valor agregado.

El desarrollo del presente proyecto, representa ahorros potenciales en costos de procesamiento y tiempos de manufactura; la solución de raíz de estos problemas promueve que Rassini pueda ofrecer precios más competitivos y que tenga márgenes de ganancia mayores. Así mismo, se fortalece la imagen de empresa desarrolladora de procesos de innovación tecnológica.

Adicionalmente, el presente proyecto abre la oportunidad y genera el reto a la institución de investigación participante para generar Investigación científica aplicada al desarrollo de empresas del ramo automotriz mediante la innovación de sus procesos.

Equipo de Trabajo:

1. Dr. Francisco Alfredo García Pastor, f.g.pastor@microestructura.org,
(844) 438-9600 x8667

CINVESTAV, Doctor en C. de Materiales Manchester University Prof.-Investigador SNI nivel I.

Funciones en el proyecto:

- Desarrollo del modelo de transformación de fase y deformaciones.
- Apoyo en la caracterización fluidinámica del sistema actual de templado.
- Capacitación a Ingenieros y a técnicos de la Empresa.
- Supervisión global de la participación de Cinvestav.

2. Dr. Francisco Andrés Acosta González, andres.acosta@cinvestav.edu.mx,
(844) 438-9600 x8667

CINVESTAV, Doctor en Ciencias de Materiales

Profesor-Investigador. SNI Nivel 2.

Funciones en el Proyecto:

- Desarrollo del modelo de flujo de fluidos y de transferencia de calor.
- Caracterización en laboratorio del coeficiente de transferencia de calor del aceite durante el templado de acero.
- Caracterización fluidinámica del sistema actual de templado.
- Capacitación a Ingenieros y a técnicos de la Empresa.

3. Dr. Eddy Alfaro, ealfaro@rassini.com, (878) 78 26131 X2201

RASSINI

Investigador - Doctorado en Metalurgia y Cerámica - CINVESTAV

Funciones en el Proyecto

- Revisión de pruebas de correlación
- Coordinación de Etapas de validación
- Revisión Reportes
- Implementación de Metodología

4. MC. Jose Carlos Mijares, jmijares@rassini.com, (878) 78 26131 x 2265

RASSINI

Ingeniero de CAE – Pasante de Maestría en Ingeniería Automotriz

Funciones en el proyecto:

- Implementación de Metodología

5. C.P. Edgar Vicente, evicente@rassini.com, (878) 78 26131 x 2104

RASSINI

Coordinador Financiero

6. Ing. Jose G. Ruiz, jose.ruiz@rassini.com, (878) 78 26151

RASSINI Spte CAD/CAE/LAB

Lider de Proyecto

Funciones en el proyecto:

- Responsable Técnico
- Reportes de avance y Final a PRODIAT
- Coordinación de Equipo Investigador, Financiera y Técnica.
- Seguimiento a actividades programadas

Etapas del proyecto y actividades realizadas:

De acuerdo a la propuesta aprobada, el proyecto se desarrollará en 5 Etapas:

| Etapa del proyecto: | Avance |
|---|--------|
| 1) Capacitación especializada para Capacitadores. | 100 % |
| 2) Estudio de caracterización de flujo de calor, desarrollo y validación de modelo computacional del proceso de templado en el sistema actual. | 100% |
| 3) Consultoría especializada para desarrollo de experimentos en Prototipo virtual (modelo computacional) | 100% |
| 4) Revisión de Resultados y Conclusiones: revisión de matriz de resultados, parámetros de control en función a los efectos de distorsión, especificaciones de | 100% |

| | |
|--|------|
| sistemas optimizados. | |
| 5) Transferencia de Conocimiento a Profesionistas y personal técnico de RASSINI. | 100% |

- Ver detalles de las etapas en la siguiente página.

Descripción detallada de las(s) etapa(s) para la que se solicita el apoyo:

1) Capacitación especializada para Capacitadores / Equipo de Investigación.

Esta fase consiste en la realización de un taller especializado de Fluidodinámica Computacional (CFD) por parte de Ansys Inc. y Grupo SSC, líderes en simulación con la técnica de elemento finito y de la dinámica de fluidos.

Los temas de capacitación especializada para Investigadores y capacitadores potenciales son: ANSYS Fluent: CFD Multiphase (16h), CFD Turbulence (16h), y ANSYS Heat Transfer (8h).

Por conveniencia de la didáctica de enseñanza por parte del capacitador, esta etapa ha sido dividida en 2 partes, (1) Capacitación para la preparación de geometrías 3D del dominio de cálculo y (2) Simulación fluidodinámica en sus diferentes modalidades: Mallado de dominios de cálculo, flujo laminar, turbulento, condiciones a la frontera, transferencia de calor. El curso se llevó a cabo en los primeros meses de desarrollo del proyecto y sirvió para generar las habilidades necesarias para alcanzar las metas planteadas en la propuesta.

2) Estudio de caracterización y modelación del proceso de templado en el sistema actual.

Este estudio sirvió de base para validar los modelos y la metodología de simulación de fluidos y funciones de transferencia de calor para la predicción de los esfuerzos residuales de las hojas durante el temple y la predicción de la distorsión.

Adicionalmente, en esta etapa se generaron los modelos geométricos del sistema de cálculo para proceder con la modelación fluidinámica. Adicionalmente, se hizo campaña experimental en la planta, a fin de caracterizar la velocidad de enfriamiento en la tina de temple. Se utilizó un flujómetro Doppler en posiciones específicas del tanque para medir las velocidades relativas del medio de temple y se midió también la rapidez de enfriamiento en probetas instrumentadas.

La Fig. 1 muestra una fotografía del modelo 3D detallado, generado de acuerdo al sistema actual de templado, el cual consiste de un tanque rectangular con recirculación de aceite, un carrusel con los muelles de acero a templar e inmerso parcialmente en el tanque, y un distribuidor de aceite en la parte inferior del tanque nombrado flauta o manifold de agitación.

El medio de temple contenido un sistema tanque, también fue modelado en 3D para replicar el comportamiento de turbulencia del fluido durante el proceso de temple. El modelo tridimensional y sus dimensiones son de gran relevancia para el presente proyecto ya que éste debe cumplir las mínimas características físicas y dimensionales para asegurar la predicción correcta del comportamiento fluido-dinámico al interior del tanque de temple. Para la generación de las geometrías, los dimensionamientos se realizaron en conjunto con el personal de planta y personal del centro de investigación, cada dimensión crítica fue obtenida de los planos originales del tanque de temple y corroborada manualmente.

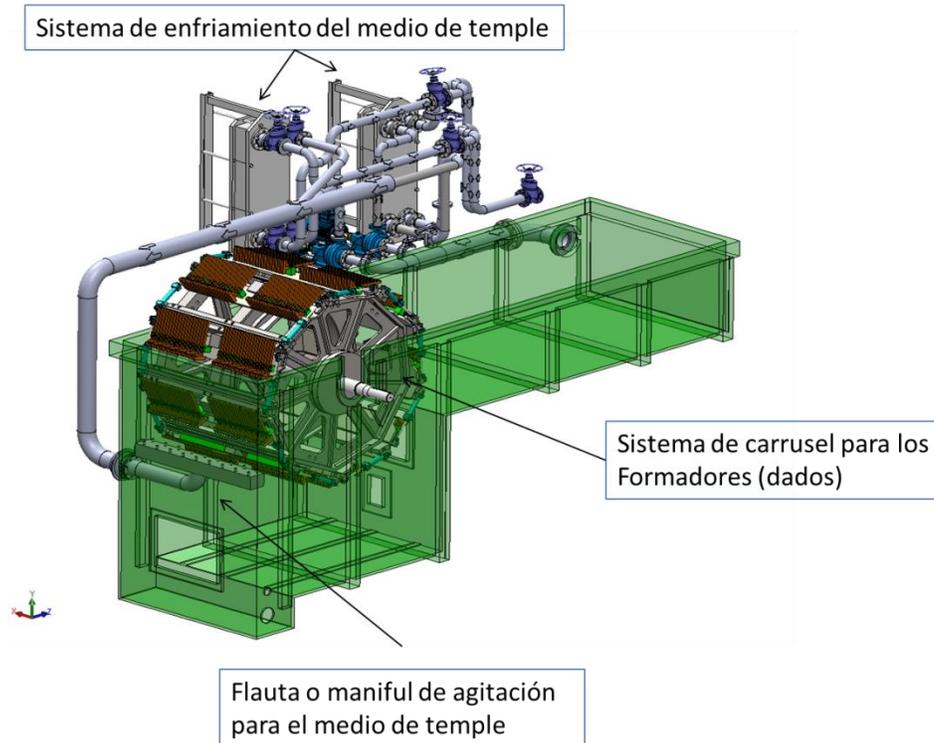


Figura 1. Modelos 3D (vista isométrica y lateral) del tanque de temple que se utilizó para la modelación matemática.

Para ilustrar los fenómenos que involucra el proceso de tratamiento térmico de muelles de suspensión automotriz, tenemos que las muelles automotrices son arreglos de placas de acero que son precalentados en un horno hasta su temperatura de austenizado (800-900 °C). Un operador los coloca sobre un “formador” en forma de “∩” y unos “pisadores” presionan el muelle para que tome la forma respectiva. La Fig. 2 muestra fotografía de un par de muelles durante el proceso de formado a temperaturas entre los 800-900 °C, sobre un “dado formador” y presionados por pisadores, donde adquieren la forma parabólica característica. Como se puede observar, existe transferencia de calor de las piezas calientes hacia el herramental, durante el formado, condición importante al considerar en la modelación matemática. Durante el temple, las piezas son sumergidas con todo y herramental en el medio de temple, el cual es agitado por un sistema de bombeo a través de una flauta o maniful por la parte inferior del tanque.

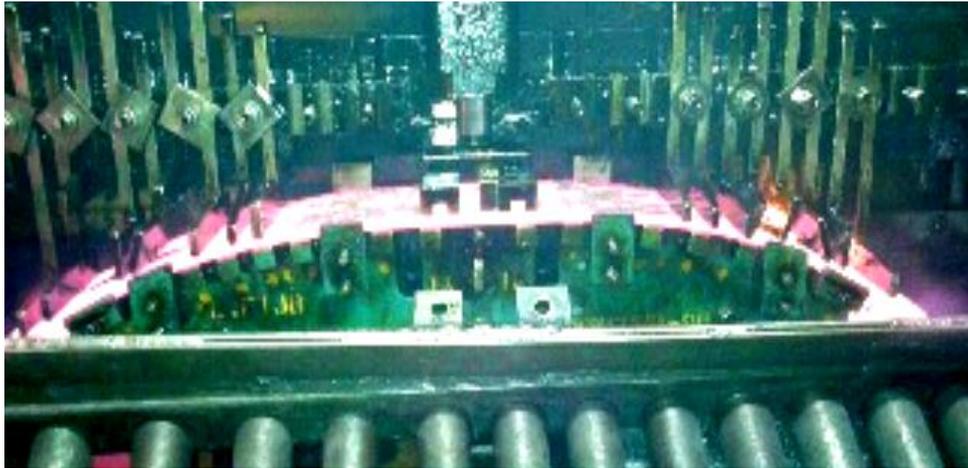


Figura 2. Muelles de suspensión en el proceso de formado y temple.

La caracterización fluidinámica del sistema de agitación consistió en la medición de la velocidad local del aceite en varias posiciones dentro del tanque y la tubería de alimentación del líquido de temple (aceite). La velocidad del aceite se midió con un flujómetro Doppler FD613 (Omega Engineering Inc., Stamford, CT, USA) el cuál es un sensor de la velocidad de partículas suspendidas en el medio de temple líquido, que puede medir la velocidad a la que se mueven partículas con diámetros mayores a 100 micras y concentraciones mayores a 100 ppm. El flujómetro que cuenta con software integrado para promediar la velocidad relativa de las partículas suspendidas en el líquido que fluye la cual está asociada a la velocidad de movimiento del mismo líquido. Este sensor no es intrusivo y se coloca sobre la superficie externa de la pared del tubo que alimenta al distribuidor de aceite o en la pared del tanque en la posición deseada. La Figura 3 muestra la manera en que se realizaron las mediciones de la velocidad de flujo del medio de temple a través de las tuberías durante el proceso de temple de las muelles. Con Esta técnica se evaluaron los flujos característicos de alimentación de aceite de temple al tanque de temple por el sistema actual de recirculación. Los datos sirvieron para validar los resultados de velocidades de flujo generados mediante la modelación matemática realizada.



Figura 3. Caracterización de flujos de aceite de temple durante el tratamiento térmico de muelles automotrices.

Otro parámetro importante para la caracterización de los flujos de calor es la obtención de los perfiles de temperatura de piezas para diferentes condiciones de temple. La caracterización del perfil térmico es un factor clave en la correlación de resultados, ya que la velocidad de enfriamiento y la trayectoria del enfriamiento de las piezas en diferentes posiciones del tanque están directamente relacionadas con la cantidad de calor extraído de las piezas por el sistema de agitación. en este contexto, Para la caracterización de los perfiles térmicos, se hicieron procesos de adquisición de temperaturas con termopares colocados en piezas, donde se obtuvieron datos de tiempos y temperaturas en relación al producto, medio templante y ambiente. Este proceso se llevó a cabo con equipo especializado para adquisición de perfiles térmicos de proceso. La Figura 4 muestra fotografía del equipo de adquisición de datos utilizado para la generación de los perfiles térmicos en piezas instrumentadas con termopares.

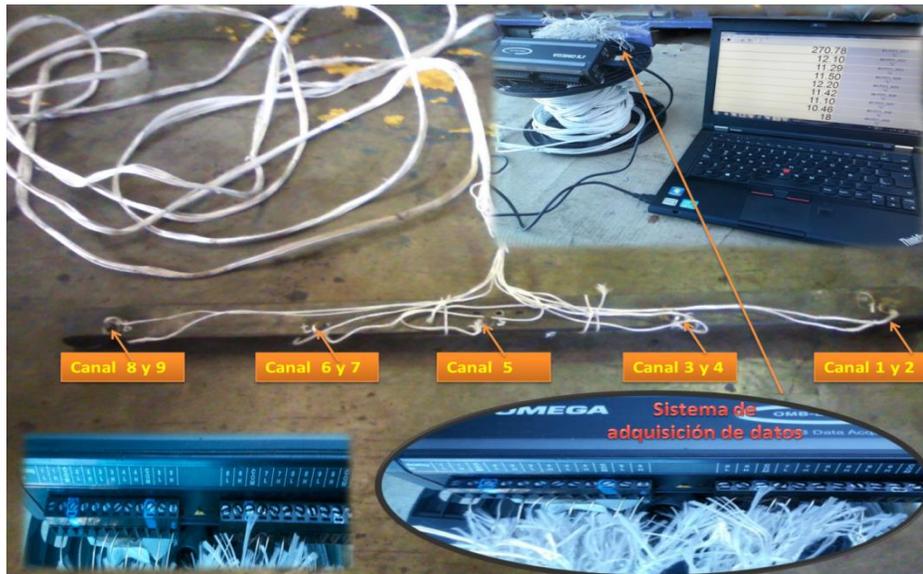


Figura 4. Sistema de adquisición de temperaturas en piezas instrumentadas con termopares.

Las piezas de acero instrumentadas con termopares sirvieron para 2 objetivos, por un lado sirvieron para obtener los diferentes perfiles térmicos a diferentes condiciones de procesamiento y por otro lado, la relación de la historia térmica con la microestructura resultante y los esfuerzos residuales generados en las piezas. Las piezas utilizadas, una vez templadas en el baño fueron posteriormente examinadas metalográficamente para determinar la microestructura formada. Además, se registró la historia de la distribución estadística de las deformaciones fuera de especificación que sufren los muelles. La información recabada sobre la velocidad del aceite, la evolución de la temperatura y la frecuencia e intensidad de las deformaciones permitió la validación de las predicciones del modelo computacional.

La capacidad de enfriamiento del aceite en el tanque de templado se midió con dos métodos distintos. En el primero, se instrumentó una hoja de acero con 9 termopares distribuidos a lo largo de la hoja y sujetos a su superficie con tornillos que presionaban al termopar. La hoja se calentó en el horno de gas de vigas caminantes hasta alcanzar la temperatura de austenización, entre 900 y 930°C. En este horno, la hoja se mueve a una velocidad programada gracias a la acción de las vigas por lo que al llegar a la salida ha completado el período necesario para su austenización, que es de ~20 minutos. Un operario tomó la hoja instrumentada a la salida del horno y la cargó en un formador del nonágono. Desafortunadamente, la manipulación de la hoja instrumentada fue muy complicada ya que los cables se enredan y esto provoca un retraso importante antes de colocar la hoja sobre el

dato de formado. El resultado fue un enfriamiento excesivo de la hoja que alcanzó menos de 700°C antes de sumergirla en el baño de aceite. Este resultado no fue representativo del proceso y se descartó. El segundo método consistió en seccionar una hoja en 3 partes: lado fijo, central y lado móvil. Cada sección, previamente instrumentada con termopares tal como se muestra en la Figura 5, se calentó en una mufla hasta alcanzar la temperatura de austenización. En esta ocasión, la colocación de cada sección en el formador fue menos complicada, y cada pieza se enfrió hasta ~ 820°C durante su manipulación antes de sumergirse en el baño de aceite.

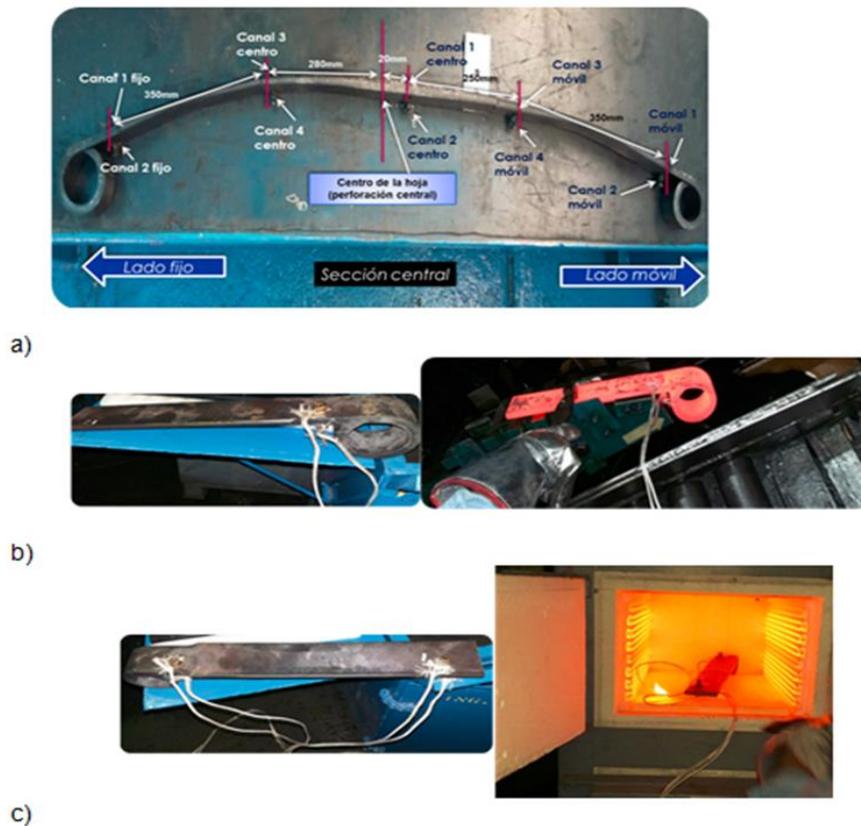


Figura 5. Fotografías de a) una hoja de acero seccionada en tres partes: lado fijo, sección central y lado móvil, indicando la posición de los termopares (canales). b) Lado fijo con dos termopares y precalentado durante su colocación en el formador. c) Lado móvil con cuatro termopares y durante su precalentamiento en una mufla.

De los resultados encontrados en los perfiles de enfriamiento obtenido con el método descrito anteriormente, con piezas instrumentadas con termopares, la Figura 6 muestra la evolución medida de la temperatura en los 10 termopares

instalados en las 3 secciones durante calentamiento y temple. Las líneas horizontales indican las temperaturas para austenización, que son 900 y 920°C.

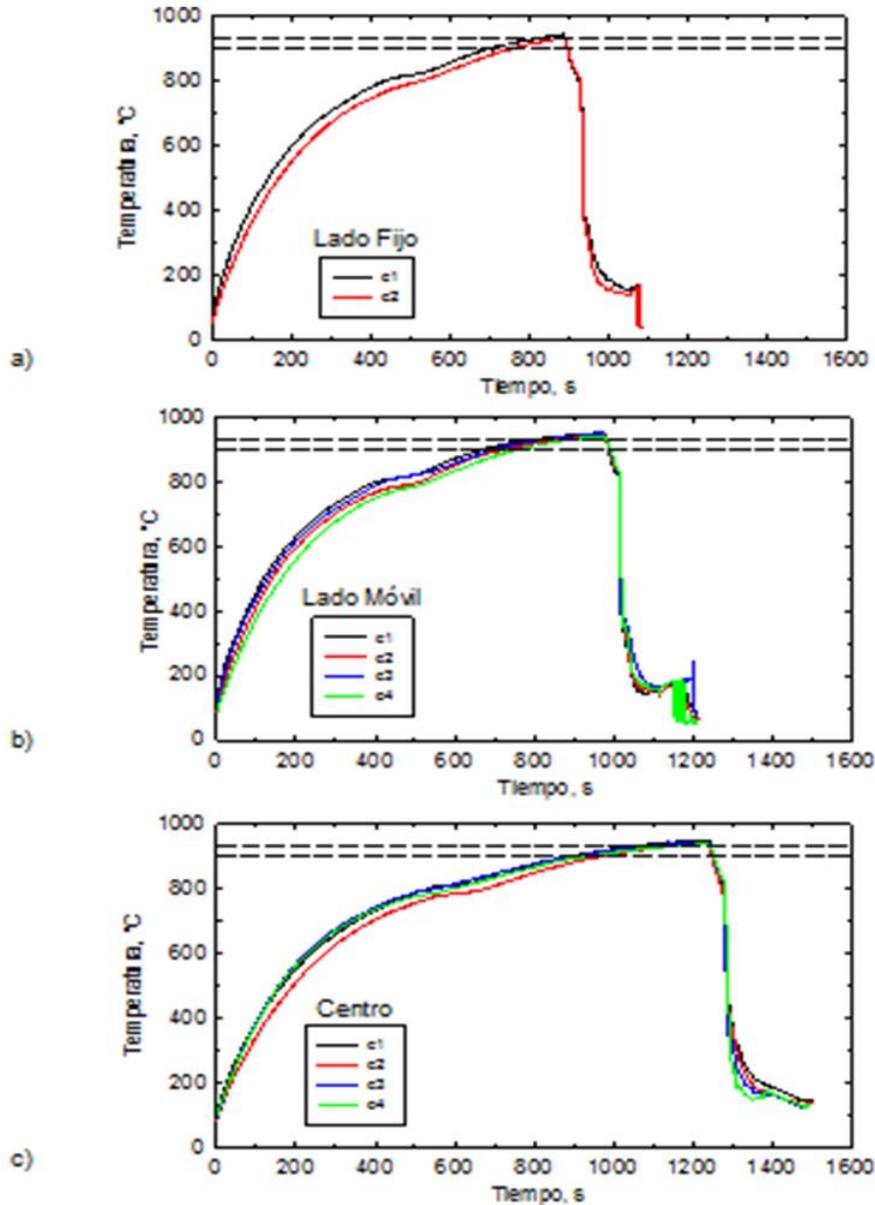


Figura 6. Evolución térmica registrada por termopares durante el calentamiento en mufla y temple en aceite de las secciones instrumentadas de una hoja de acero: a) Lado fijo, b) lado móvil y c) sección central.

La Figura 7 muestra con mayor detalle la evolución térmica medida durante el temple en el tanque con aceite. Puede notarse un enfriamiento inicial a una rapidez moderada que corresponde al transporte de cada sección de la mufla al formador. En este período de ~35 segundos de enfriamiento al aire los termopares

registraron una caída de $\sim 120^{\circ}\text{C}$. Posteriormente, durante la inmersión de cada sección en el aceite se obtuvo una gran rapidez inicial de enfriamiento, $\sim 130^{\circ}\text{C/s}$, que solo dura unos 3 segundos hasta alcanzar los 400°C aproximadamente. Después de este punto, el acero se enfriaba a menor velocidad, alcanzando una rapidez muy baja al aproximarse a 200°C .

En la Figura 8 se muestra la evolución térmica medida por los termopares instalados en la sección del lado móvil, justo desde el momento de su inmersión en el tanque. El nonágono rota para sumergir la hoja de acero hasta la posición de carga siguiente. Las líneas punteadas indican los momentos de llegada a cada posición de carga. La separación de estas líneas es de 36 segundos y corresponde a un tiempo total de inmersión en el tanque de $5 \times 36 = 180$ segundos, donde 5 es el número de posiciones de las hojas en el nonágono que están sumergidas en el aceite. Esta figura indica claramente que el enfriamiento acelerado del acero ocurre únicamente en la primera posición, de 0 a 36 segundos, y posteriormente el enfriamiento es muy deficiente. En realidad, la máxima rapidez de enfriamiento ocurre durante los primeros 3 segundos de la inmersión, que corresponde al tiempo de rotación del nonágono a la siguiente posición de carga. Está en proceso el obtener más datos de otras 3 hojas seccionadas e instrumentadas de la misma forma pero con otras combinaciones de temperatura de austenización y de tiempo entre carga y carga. Esta información se empleará para determinar, mediante la solución del problema inverso de conducción de calor (IHCP), los flujos de calor y los respectivos coeficientes de transferencia de calor como una función de la temperatura superficial.

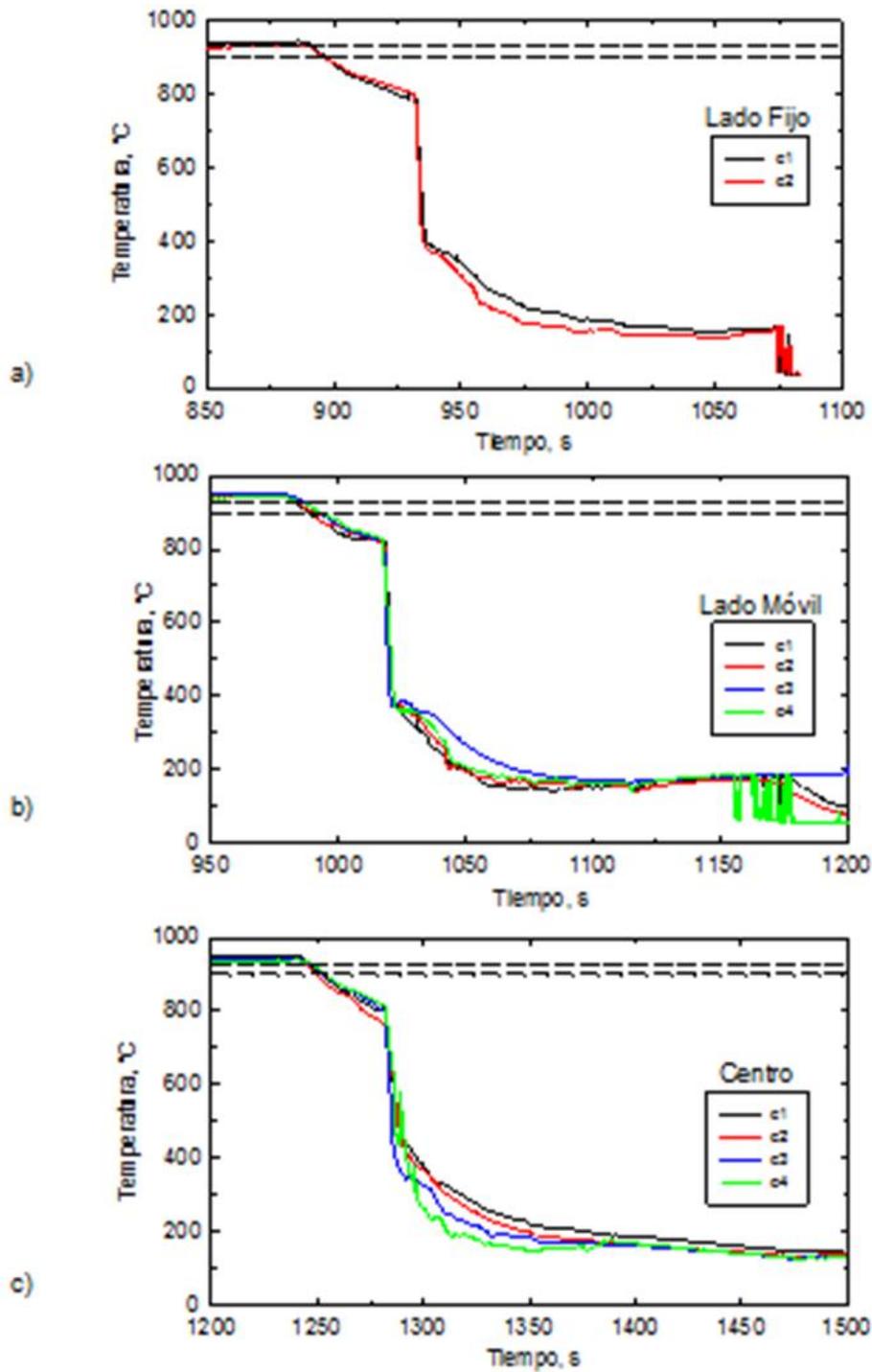


Fig. 7. Evolución térmica desde la salida de la mufla de las secciones de una hoja de acero. a) Lado fijo, b) lado móvil y c) sección central.

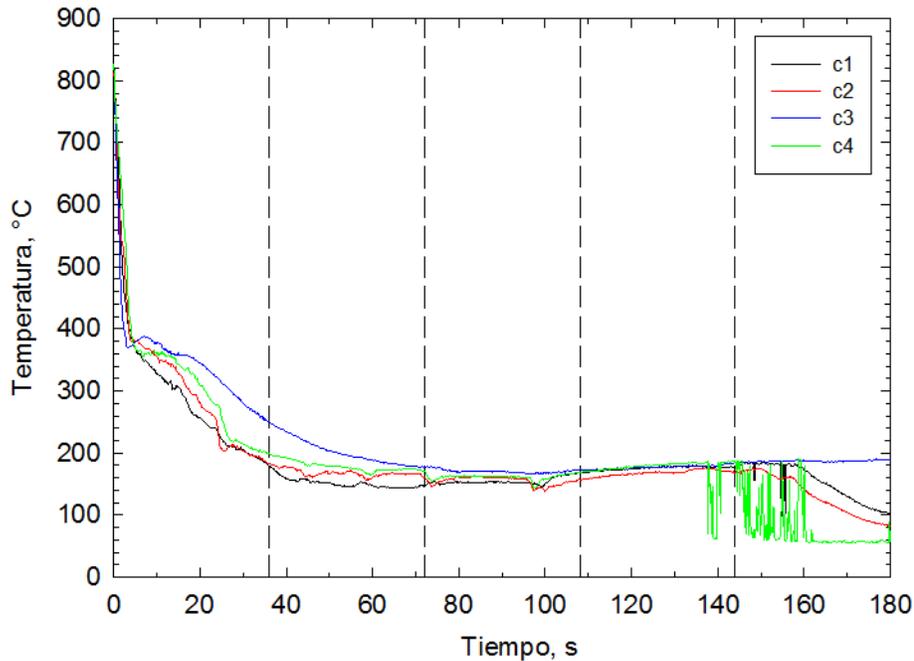


Fig. 8. Evolución térmica medida con termopares en la sección del lado móvil, justo desde el inicio de la inmersión en el tanque. Las líneas verticales punteadas indican los momentos de llegada de la hoja a cada posición de carga.

3) Experimentación Virtual

3.1 Desarrollo del modelo CFD y transferencia de calor

La Figura 9(a) muestra un dibujo del distribuidor de aceite. Este distribuidor de sección cuadrada se alimenta por un tubo conectado a su zona media. El aceite sale verticalmente por dos hileras (a y b) con nueve boquillas cada una. La Figura 9(b) muestra el campo isotérmico de velocidad calculado en 3 planos. Puede notarse que la magnitud de la velocidad se incrementa notablemente cuando el aceite pasa por las boquillas. También puede verse que el líquido abandona al distribuidor con una velocidad esencialmente uniforme y paralela a las boquillas. La Figura 9(c) muestra un histograma con los flujos máxicos calculados que salen por cada boquilla. Puede notarse que dichos flujos son muy parecidos entre sí; su desviación estándar es de solo 3.1% del valor de la media. Este resultado indica que el diseño original de este distribuidor es satisfactorio y que aparentemente no requeriría ningún cambio. Sin embargo, esto será evaluado hasta después de completar los cálculos de la velocidad de aceite en todo el tanque.

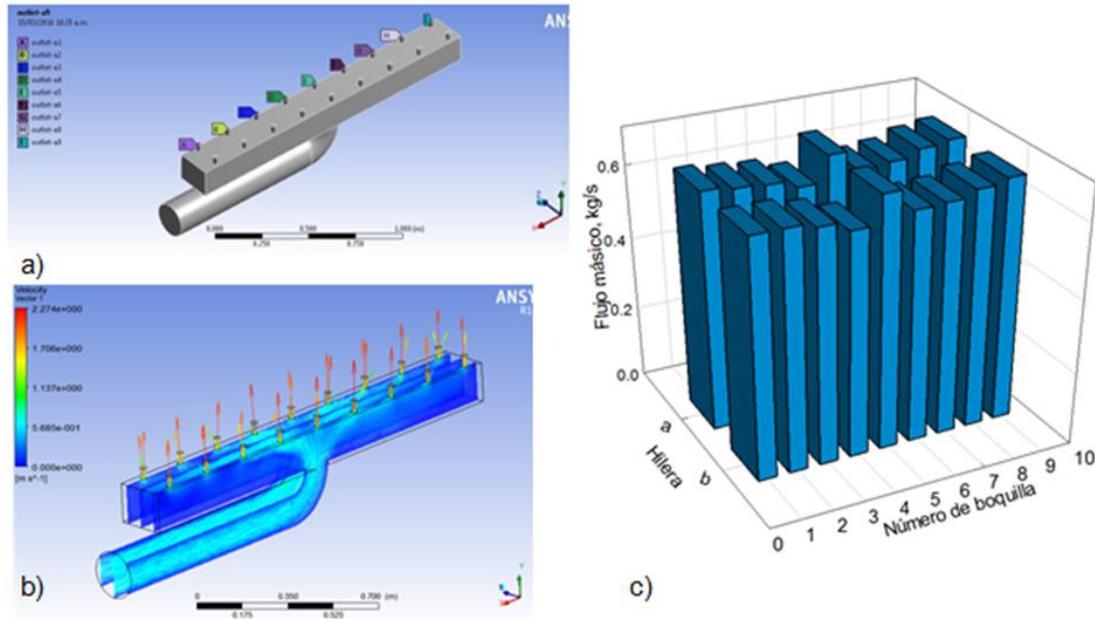


Fig. 9. a) Nomenclatura de las boquillas del distribuidor de aceite indicado la hilera “a”. b) Campo de velocidad calculado en 3 planos y c) histograma del flujo másico de aceite calculado a la salida de cada boquilla.

La Figura 10 muestra los dibujos del tanque L6 a) original con detalle y b) simplificado. Se postula que ambos son dinámicamente equivalentes, es decir el comportamiento fluid-dinámico del aceite es esencialmente el mismo en ambos sistemas ya que contienen los mismos obstáculos significativos al flujo de fluido. El dibujo simplificado descarta muchos detalles con respecto al dibujo original. Con base a la experiencia de los autores de este trabajo se postula que estos detalles como lo son los formadores, pisadores, ranuras, cejas, molduras, etc., no contribuyen de manera importante a la dinámica del flujo de aceite en el tanque, pero su inclusión en un modelo fluid-dinámico del aceite multiplicaría considerablemente el esfuerzo computacional para la discretización del dominio de cálculo y por ende para los cálculos de la distribución de velocidad. En la Figura 11(a) se muestra un dibujo original del nonágono con algunas hojas instaladas sobre sus formadores. En la Figura 11(b) se aprecia un nonágono simplificado que contiene “cajas virtuales” dibujadas alrededor de cada posición con formador. Estas cajas serán los dominios computacionales de una simulación adicional, que se llevará a cabo posteriormente al cálculo de la distribución de velocidad en el tanque. Las velocidades calculadas en las caras de las cajas serán las respectivas condiciones a la frontera.

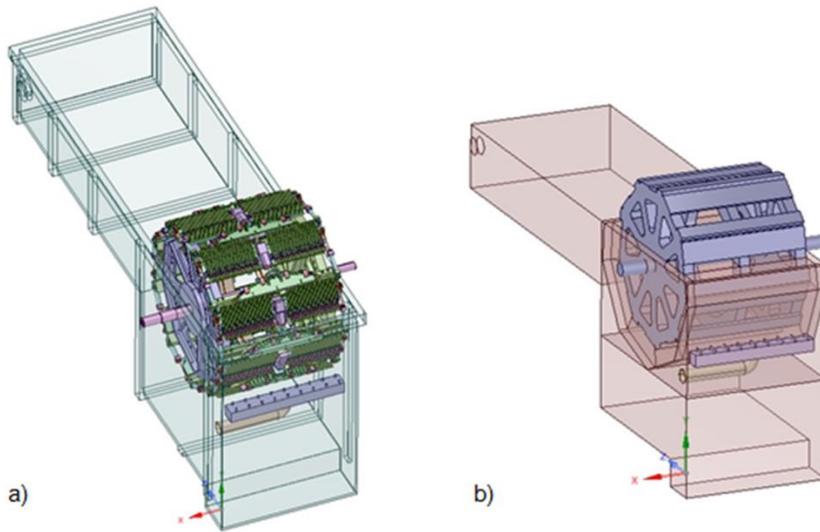


Figura 10. Dibujo en perspectiva del tanque L6 a) original con todos sus detalles y b) simplificado para la simulación fluid-dinámica del aceite.

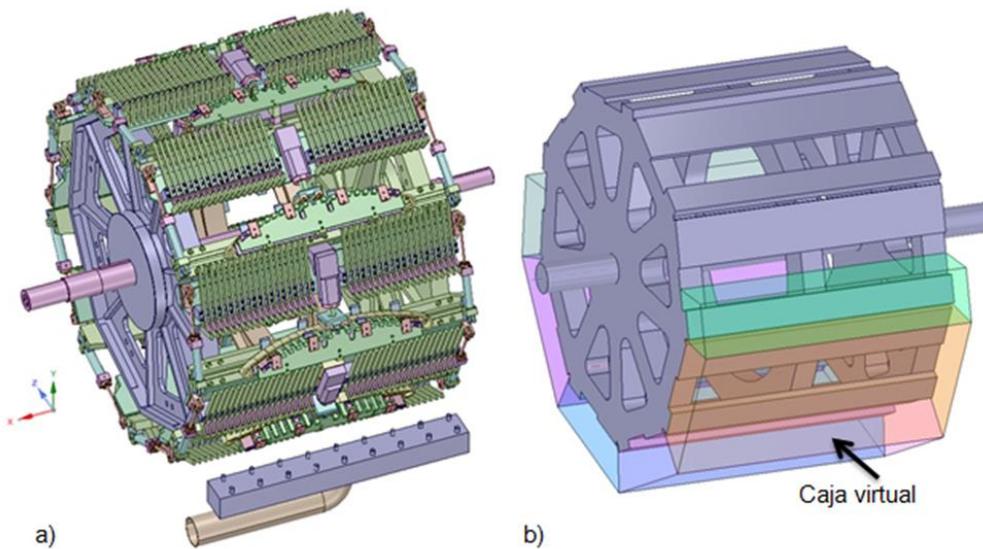


Fig. 11. Dibujo en perspectiva de nonágono a) detallado y b) simplificado con 4 cajas virtuales completas y 2 medias cajas.

La Figura 12 muestra una caja virtual que contiene un formador, una hoja y un número determinado de pisadores. En esta tercera simulación fluid-dinámica “en cascada” se simplificó parcialmente el dibujo detallado original pero se conservó la hoja, los pisadores y el formador.

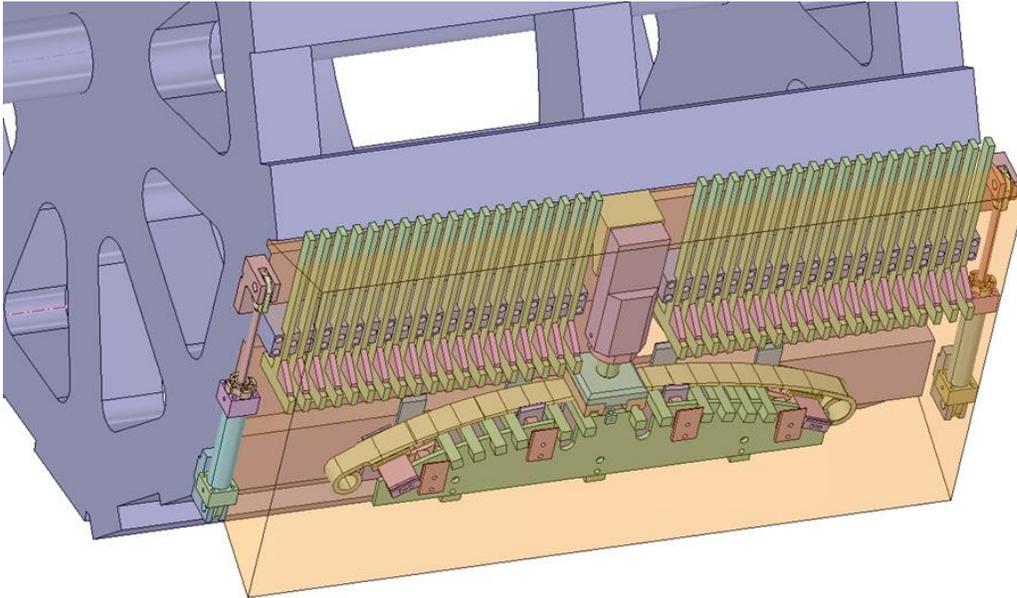


Fig. 12. Dibujo de una caja virtual que contiene una hoja de acero, su formador y los pisadores.

Los cálculos del flujo isotérmico de aceite en el tanque se pueden visualizar mediante las líneas de corriente mostradas en la Figura 13. En esta figura se aprecia al distribuidor que alimenta aceite a través de las 18 boquillas. Las líneas de corriente ascienden hasta llegar al nivel del tanque y continúan moviéndose por la superficie libre. La salida del aceite se encuentra en la zona poco profunda del tanque. Hay algunas líneas de corriente en el fondo del tanque pero su baja densidad numérica indica que el flujo de aceite en el fondo es muy reducido. Es decir, el aceite se mueve muy lento con respecto a cada hoja situada en la mayoría de las cajas virtuales, y solamente se mueve con velocidad considerable en la caja próxima a las boquillas del distribuidor.

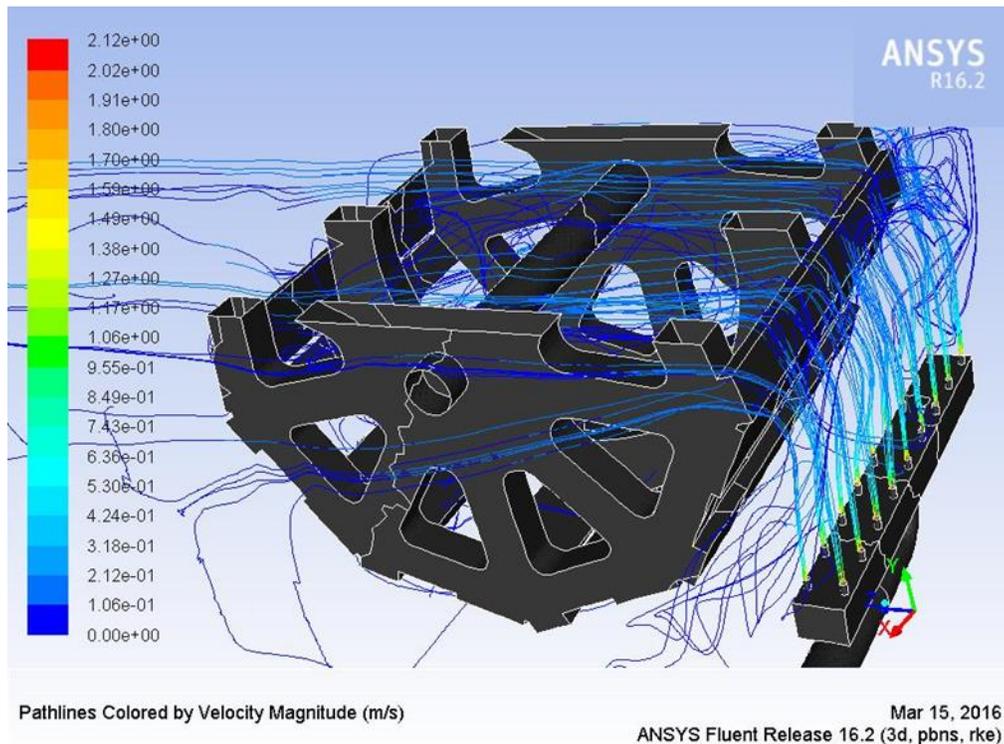


Fig. 13. Líneas de corriente de aceite calculadas para el flujo isotérmico durante la operación en régimen estable del tanque de templado de acero. Solo se muestra la sección del nonágono que está sumergida en el aceite.

La Figura 14 presenta el resultado anterior pero graficando los campos de velocidad y de energía cinética turbulenta en tres planos del dominio computacional. Nuevamente puede notarse que la mayor velocidad y la mayor energía cinética turbulenta se encuentran a la salida de las boquillas del distribuidor. Esto confirma que solo la hoja situada más cerca de dichas boquillas está sujeta a una velocidad de aceite relativamente alta. El resto de las hojas de acero están sumergidas en aceite relativamente estancado. Este resultado sugiere que se obtendrá una condición de enfriamiento eficiente solamente durante el período en que la hoja se encuentra en la posición próxima a las boquillas. Como se presentó en la sección 3.2, los resultados del análisis térmico llevado a cabo en la planta confirmaron lo sugerido por estos cálculos fluid-dinámicos.

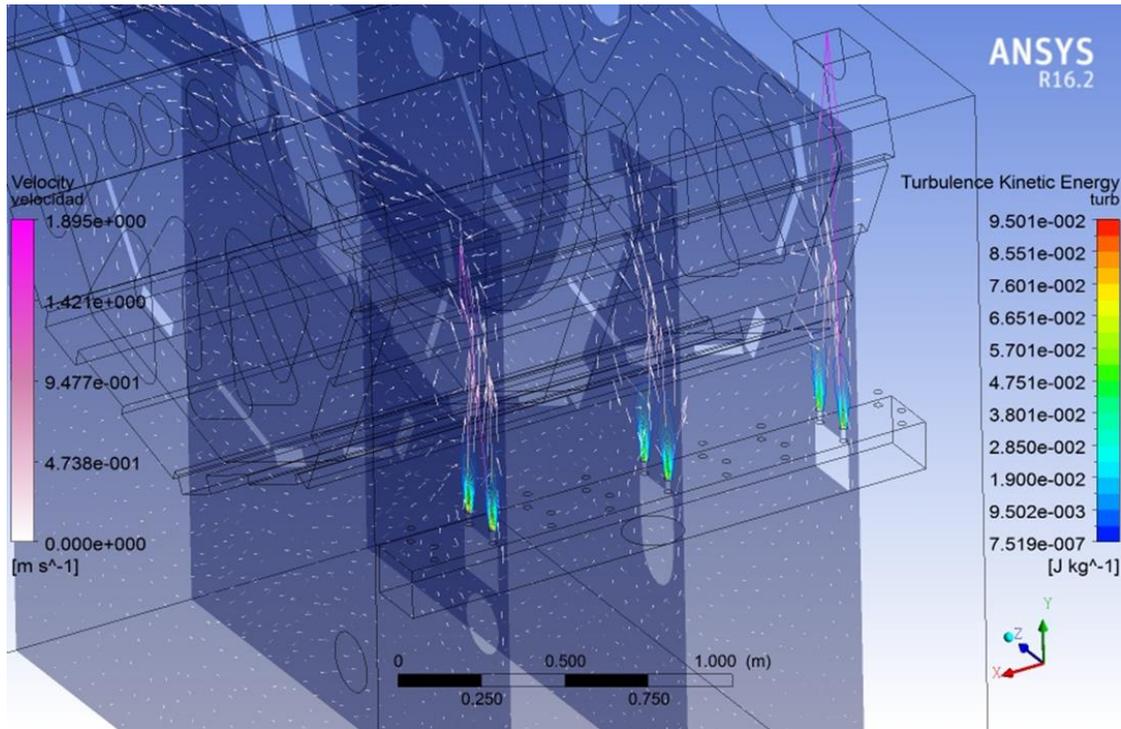


Fig. 14. Campos isotérmicos calculados de velocidad y de energía cinética turbulenta en tres planos del dominio computacional. El flujo sale verticalmente y se mueve por la superficie libre del tanque. Esto también se observa en planta gracias a la espuma formada.

3.2 Desarrollo de experimentos en Prototipo virtual (modelo computacional) para optimización de control de distorsión.

Esta parte del proyecto se desarrolló varias estrategias de modelación, en función al nivel de turbulencia esperado en el sistema. En esta actividad, se efectuó el desarrollo de experimentos en un prototipo virtual (modelo computacional) para conocer las condiciones óptimas de flujo y distribución de velocidad de aceite alrededor de las piezas para obtener un enfriamiento acelerado de las piezas. El modelo final asegura la transformación martensítica completa de las piezas y por lo tanto minimiza las deformaciones indeseables durante su templeado.

Después de haber obtenido los perfiles térmicos y habiendo caracterizado los comportamientos típico de la agitación en el tanque de temple en el proceso actual, se observó que efectivamente el enfriamiento en el tanque de temple

era deficiente. La Figura 15 muestra un análisis de la evolución de la temperatura medida en la sección del lado móvil de las probetas instrumentadas, a partir del momento de inmersión de dicha sección en el tanque de temple. Cuando el operador carga hojas en el nonágono, existen 5 posiciones del nonágono sumergidas en el aceite. Cada hoja permaneció 30 segundos en cada una de ellas para un tiempo total de inmersión en el tanque de 150 segundos. Después, un brazo robot remueve la hoja del formador. Puede observarse en la fig. 15 que la temperatura no es uniforme en los 4 puntos donde se midió, especialmente durante la primera posición en el nonágono. Las distintas velocidades de enfriamiento, promueven variaciones que pueden generar que la microestructura se forme de manera heterogénea en la pieza. Adicionalmente, la velocidad de enfriamiento medida por los 4 termopares decrece considerablemente a partir de la tercera posición en el nonágono, lo que puede dificultar una completa transformación de la austenita a martensita.

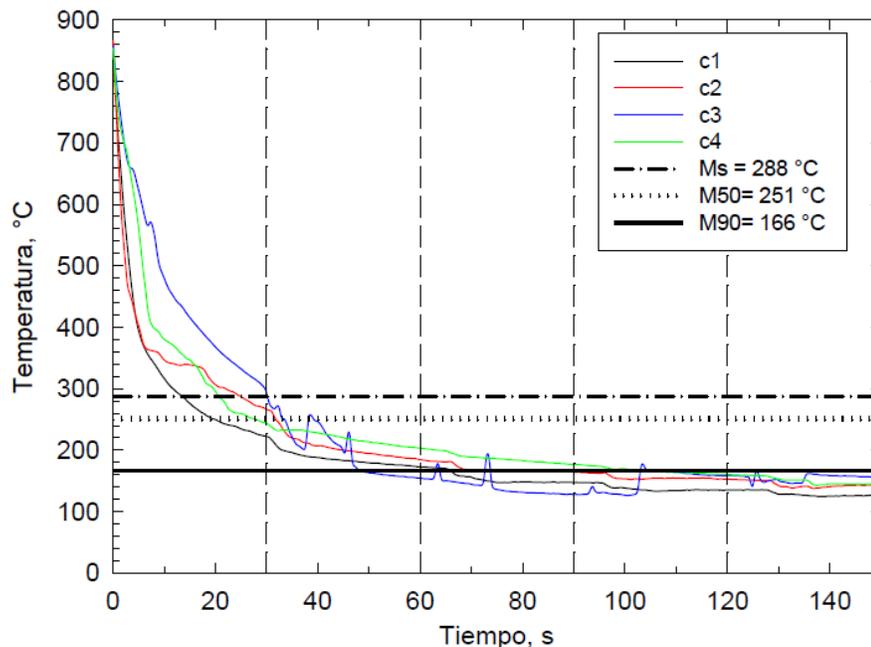


Figura 15. Evolución térmica medida con termopares c1, c2, c3 y c4, en la sección del lado móvil, justo desde el inicio de la inmersión del acero en el tanque. El tiempo en cada posición del nonágono es de 30 segundos para un tiempo total de inmersión de 150 s.

3.2.1 Medición en Laboratorio del coeficiente de transferencia de calor

La Figura 16 muestra una fotografía del sistema de laboratorio para determinar al coeficiente de transferencia de calor durante el templado del acero con aceite. El sistema consiste en un circuito cerrado de aceite a temperatura controlada. Un moto-bomba de 2HP impulsa un flujo medido y controlado de aceite a través de una boquilla de 0.5 pulgadas de diámetro para incidir sobre una probeta cilíndrica precalentada de acero. Dicha pieza cilíndrica tiene una altura equivalente al semi-espesor de la hoja de acero y se instrumenta con un termopar tipo K insertado por su superficie posterior hasta aproximadamente 1 mm de la superficie expuesta al aceite. Se cuenta con un control automático de temperatura para el aceite y para la mufla calefactora de la probeta.

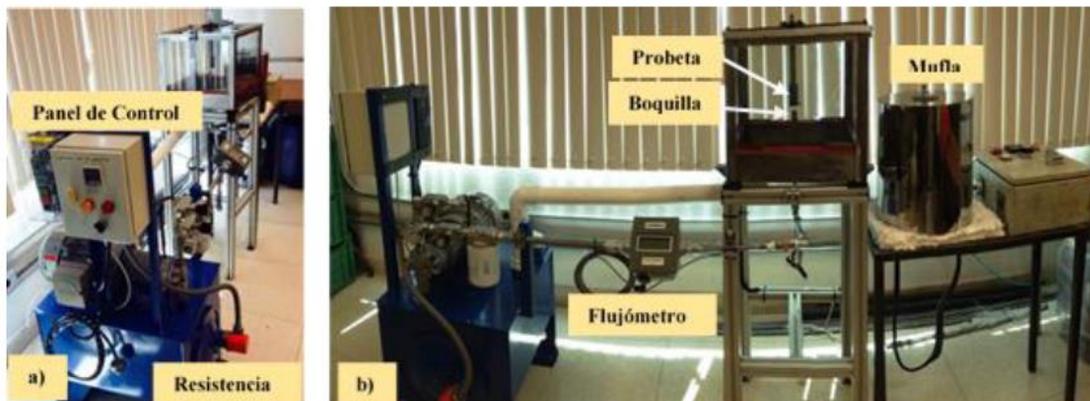
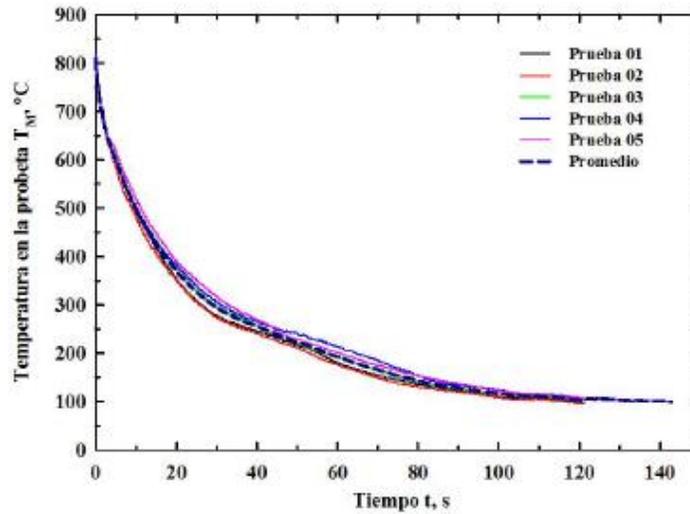
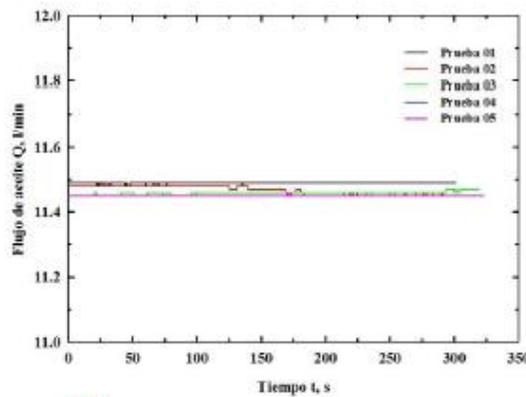


Figura 16. Fotografías del circuito cerrado de aceite diseñado para determinar al coeficiente de transferencia de calor durante el templado del acero. a) Control automático de la temperatura del aceite, b) vista general del sistema de laboratorio.

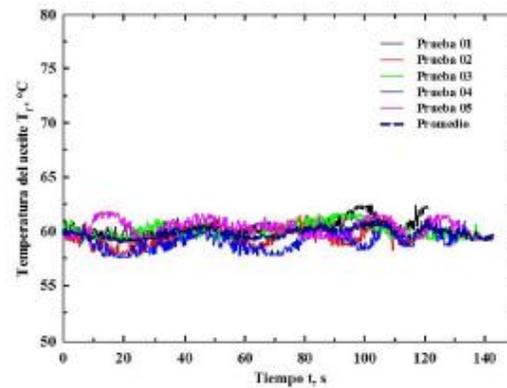
Las temperaturas del aceite y de la probeta, así como el flujo volumínico de aceite se registraron en tiempo real con una frecuencia de 10 Hz en un disco duro. La Figura 17(a) muestra la evolución de la temperatura medida en 5 pruebas de laboratorio con una probeta de acero, bajo las mismas condiciones experimentales. En las Figuras 17(b) y (c) se muestran los respectivos valores del flujo volumínico de aceite y su temperatura, respectivamente. Las figuras indican los errores experimentales respectivos.



a)



b)



c)

Figura 17. Mediciones en el sistema de laboratorio durante el templado de una probeta de acero con aceite a 60°C y un flujo de 11.47 LPM. a) Temperatura en la probeta, b) flujo volumínico de aceite y c) temperatura del aceite.

La Figura 17(a) muestra la reproducibilidad de los experimentos y permite apreciar que es posible alcanzar los 100°C antes de completar los 140 segundos. Esta velocidad promedio de enfriamiento es claramente superior a la obtenida en planta durante el templado de las hojas de acero. Este resultado se obtuvo gracias a una velocidad constante de impacto del aceite sobre la superficie de la probeta a lo largo de todo el período de enfriamiento; esta situación es diferente en el tanque industrial. En este contexto y con los resultados experimentales obtenidos a nivel laboratorio, se procedió a explorar diferentes opciones de configuración de flujos en el tanque de temple.

3.2.2 Definición de parámetros clave: presión, flujo, puntos de aplicación, direccionamiento, posicionamiento, temperaturas y tiempos de aplicación

La Figura 18(a) muestra el dominio computacional para resolver la ecuación de movimiento y obtener el campo de velocidad en estado estable en el aceite. La figura muestra al nonágono en cuyas caras se sitúan los formadores y pisadores que sujetan a las hojas. La figura muestra al distribuidor que actualmente alimenta el aceite al tanque. La Figura 18(b) es una magnificación de la región vecina al distribuidor. Puede notarse que se han dibujado ‘cajas virtuales’ con paredes color rosado que contienen en su interior un formador con pisadores y sus dos hojas de acero. Estas paredes son solo virtuales y se emplearán para graficar la distribución de la velocidad sobre su superficie.

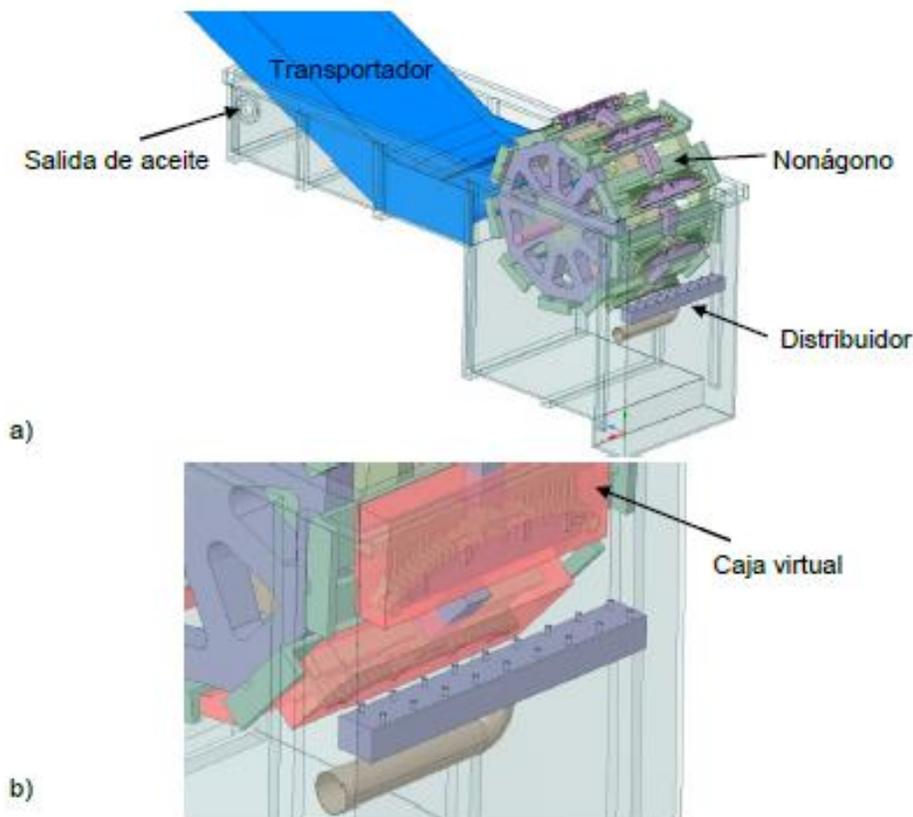


Figura 18. Representación virtual con el software ANSYS-Fluent de: a) Tanque con aceite, y b) magnificación de la zona vecina al distribuidor.

El parámetro clave que se empleó en este trabajo para evaluar los distintos

cambios en el tanque de templado fue la magnitud de la velocidad del aceite que cruza por las paredes de estas cajas virtuales definidas convenientemente para evaluar las diferentes condiciones de flujo de fluidos. Dichas paredes están muy próximas a las hojas de acero, por esto se espera que: a mayor velocidad en las caras de las cajas, mayor será también la velocidad del aceite que pasa cerca de las hojas y por consecuencia mayor será la rapidez de remoción de calor de las mismas.

3.2.3 Optimización de sistema actual de flujo unidireccional (baja turbulencia)

Las Figuras 19(a)-(b) muestran los mapas de velocidad de aceite calculados en las superficies de las cajas virtuales para el sistema actual, es decir con un solo distribuidor. Estas cajas corresponden a las posiciones en el nonágono que se encuentran sumergidas en el aceite del tanque. La Figura 19(a) corresponde a una velocidad promedio de aceite en el tubo de alimentación de 0.5 m/s mientras que la Figura 19(b) representa los resultados para una velocidad de aceite de 5 m/s. Sorpresivamente, una mayor velocidad de alimentación no repercute en una mayor velocidad en la superficie de las cajas virtuales. Este resultado debe corroborarse con cálculos adicionales para ofrecer una explicación racional.

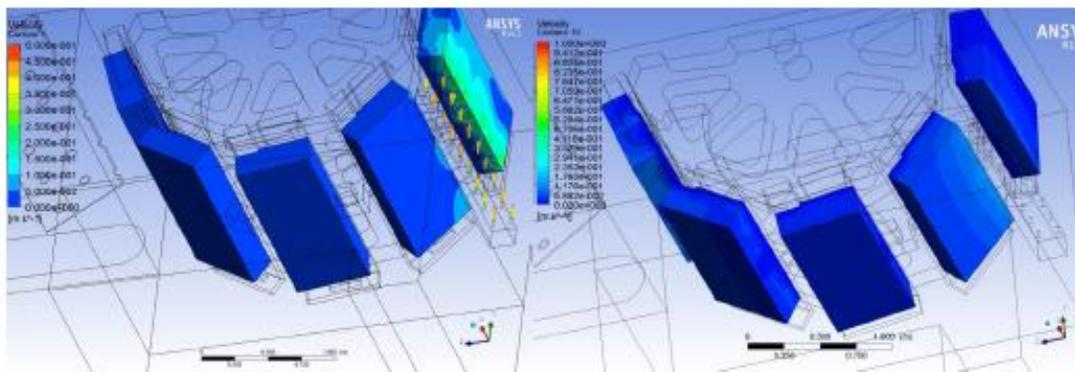


Figura 19. Mapas de velocidad calculados en condiciones de estado estable sobre la superficie de las 5 cajas virtuales sumergidas en el aceite del tanque de templado y empleando un solo distribuidor. Velocidad media del aceite en el tubo del distribuidor (a) 0.5 m/s y (b) 5 m/s.

3.2.4 Experimentación virtual de flujo bidireccional (turbulencia media)

Las Figuras 20(a)-(d) muestran los mapas de velocidad calculados sobre la superficie de las cajas virtuales. Las Figuras 20(a) y (c) corresponden al uso de un solo distribuidor, que es el caso actual, mientras que en las Figuras 20(b) y (d) se muestran los resultados correspondientes al uso de dos distribuidores. Puede notarse claramente la conveniencia de emplear dos distribuidores, en especial al observar la velocidad en la cuarta caja. En este caso, el distribuidor original recibe aceite a una velocidad media de 0.5 m/s a través del tubo de alimentación, mientras que el distribuidor propuesto recibe aceite a 0.75 m/s. Debe señalarse que una velocidad de aceite de 1 m/s en este segundo distribuidor tuvo un efecto contrario al esperado. Es decir, la velocidad en la superficie de las cajas se redujo sorpresivamente.

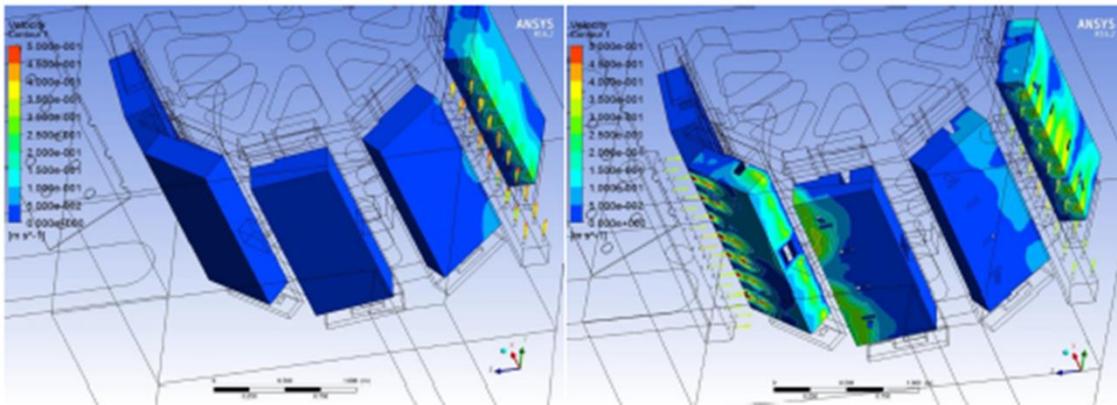


Figura 20. Mapas de velocidad calculados en condiciones de estado estable sobre la superficie de las 5 cajas virtuales sumergidas en el aceite del tanque de templado. (a) y (c) un solo distribuidor, (b) y (d) dos distribuidores.

3.2.5 Desarrollo de un modelo de deformaciones, FEM.

El modelo de deformaciones está basado en la solución por la técnica del elemento finito (FEM) implementada en el código DEFORM de la ecuación de deformación cuando un material sufre deformación por la acción de esfuerzos externos o internos por cambios locales en su densidad. La Figura 21(a) muestra el dominio computacional que incluye una hoja de acero (en azul) el formador y los pisadores (un central y nueve de cada lado) representados por los prismas rectangulares. El programa DEFORM calcula la evolución del campo de temperatura a partir de las condiciones iniciales y de frontera impuestas. Las Figuras 21(b) y (c) muestran la distribución de temperatura en la hoja al cabo de 10.1 y 52 segundos, respectivamente, de inmersión en el aceite. Estas distribuciones son el resultado de aplicar los

coeficientes de transferencia de calor inferidos a partir de las mediciones de temperatura en las secciones de una hoja templada en el tanque industrial. Claramente, la temperatura evoluciona a velocidades distintas, tal como se registró con los termopares de las piezas instrumentadas corridas en el proceso de temple.

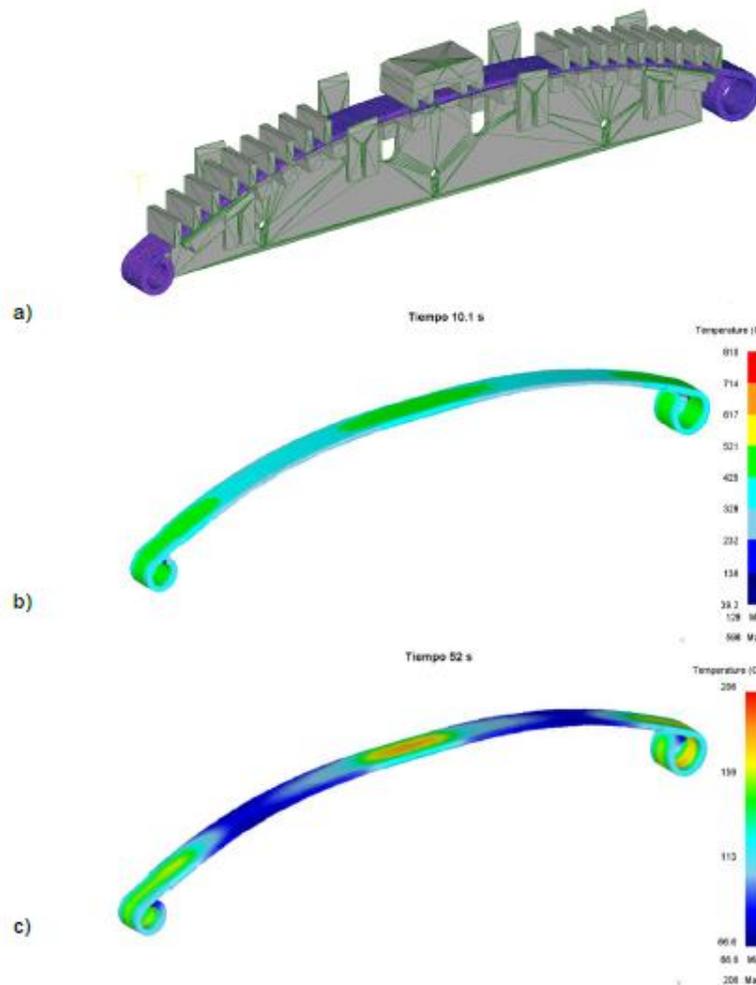
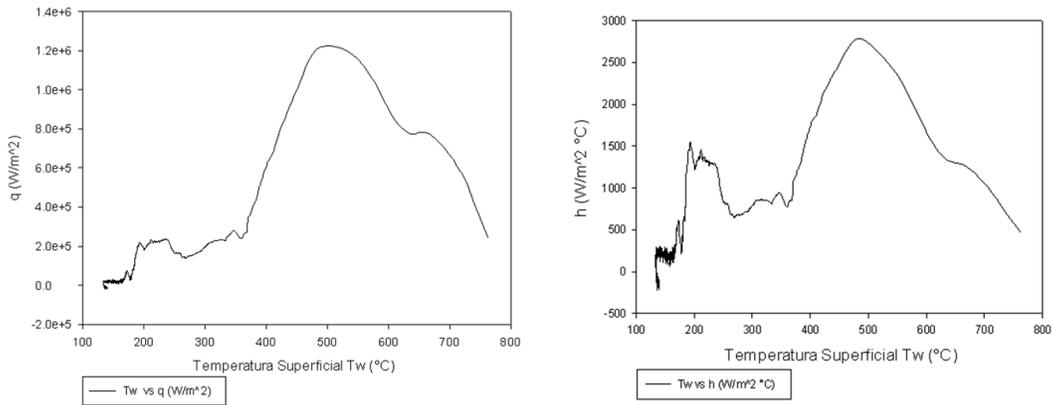


Figura 21. Representación virtual mediante el software DEFORM de a) dominio computacional que incluye hoja, formador y pisadores (prismas rectangulares), y distribución calculada de temperatura en la hoja después de b) 10.1 segundos y c) 52 segundos de inmersión en el tanque con aceite.

Dentro del trabajo de preparación para el desarrollo del modelo matemático de elemento finito para la modelación de la evolución térmica y microestructural de las piezas, se

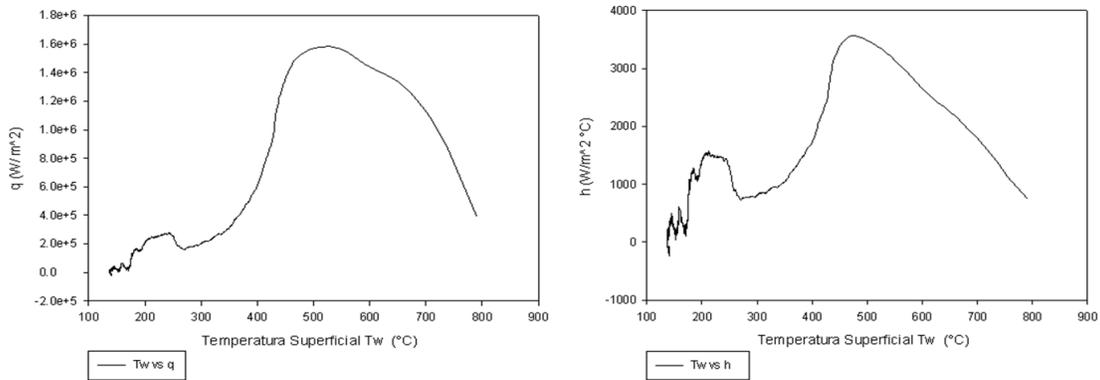
evaluó el coeficiente de transferencia de calor como función de la temperatura superficial del acero a partir de la evolución térmica medida en planta. Esta evaluación se llevó a cabo usando el método inverso de transferencia de calor y se consideraron para 3 condiciones distintas. Los resultados se muestran en las Figuras 22-24. El resultado fue introducido como coeficientes de transferencia de calor en función de la temperatura en el software Deform 3D.



a) Flujo de calor q (W/m^2)

b) Coef. de transferencia de calor h ($W/m^2\text{°C}$)

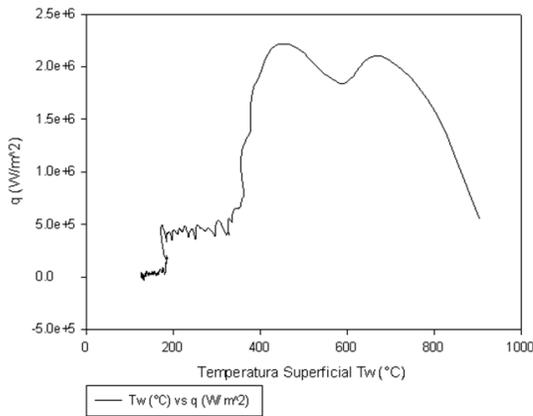
Figura 22. Flujo y coeficiente H, determinados en función de la temperatura superficial del sólido para la sección central de una hoja de acero templada bajo un ciclo de **duración normal** y temperatura normal de austenizado.



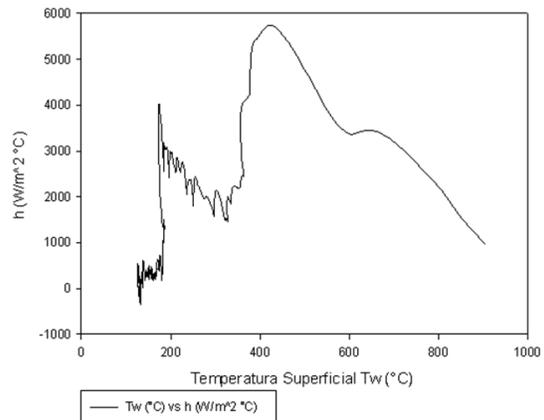
a) Flujo de calor q (W/m^2)

b) Coef. de transferencia de calor h ($W/m^2\text{°C}$)

Figura 23. Flujo y coeficiente H, determinados en función de la temperatura superficial del sólido para la sección central de una hoja de acero templada bajo un ciclo de **duración corta** y temperatura normal de austenizado.



a) Flujo de calor q (W/m^2)



b) Coef. de transferencia de calor h ($W/m^2°C$)

Figura 24. Flujo y coeficiente H, determinados en función de la temperatura superficial del sólido para la sección central de una hoja de acero templada bajo un ciclo de **duración corta y temperatura alta** de austenizado.

A partir de estos coeficientes de transferencia de calor, se han llevado a cabo diversos experimentos numéricos para estudiar el efecto de estas condiciones de enfriamiento en la fracción transformada de martensita. Esto puede apreciarse en la Figura 25 que muestra mapas en la superficie de la hoja de proporción de martensita formada a diferentes tiempos desde la inmersión de la hoja en el aceite. Claramente esta proporción no se distribuye uniformemente y la conversión completa a martensita ocurre en tiempos relativamente largos.

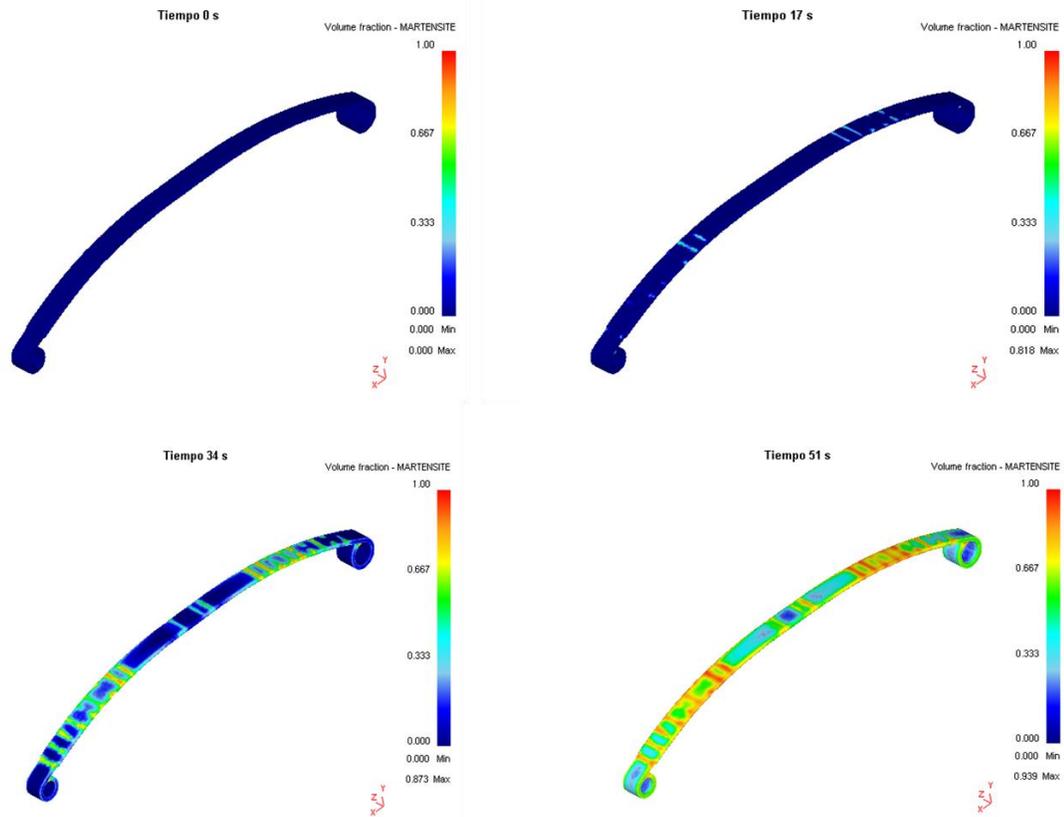


Figura 25. Simulación numérica de la evolución de la fracción de martensita durante el proceso de temple de una hoja de acero en un baño de aceite.

La distorsión es el resultado de la expansión y contracción no uniforme durante el ciclo de calentamiento y enfriamiento en un proceso de tratamiento térmico. Se encontró que buena parte de la distorsión que presentan las piezas de acero templadas está relacionada a la contracción térmica y al cambio volumétrico debido a la transición austenita – martensita (transformación de fase). La proporción heterogénea de martensita en combinación con una distribución térmica también heterogénea conlleva a una distribución de esfuerzos heterogéneos tal como se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Distribución calculada del esfuerzo máximo principal a 10.1 segundos del inicio del templado en un baño de aceite.

4. Revisión de Resultados y Conclusiones.

En esta parte, se hizo una revisión del conocimiento generado, resultados y correlaciones, de matriz de resultados y de parámetros de control y parámetros de salida y su efecto en la distorsión resultante. Además se generaron especificaciones y tolerancias de los sistemas optimizados para su posterior diseño. Esta etapa consistió en el análisis de resultados y conclusiones del equipo de desarrollo, con el fin de validar la hipótesis planteada originalmente, la cual propone reducir el tiempo de transformación incrementando la velocidad de transferencia de calor entre el medio templante y la pieza austenizada. En esta etapa se evaluó el resultado del proyecto y se generó la información a compartir en los cursos de la fase de difusión de conocimiento.

La Figura 27 muestra el resultado final, donde se sugiere por parte del centro de investigación y de acuerdo a los resultados de los cálculos fluidinámicos la colocación de un sistema de alimentación de aceite, al lado contrario al sistema de alimentación actual, con flujos laterales.

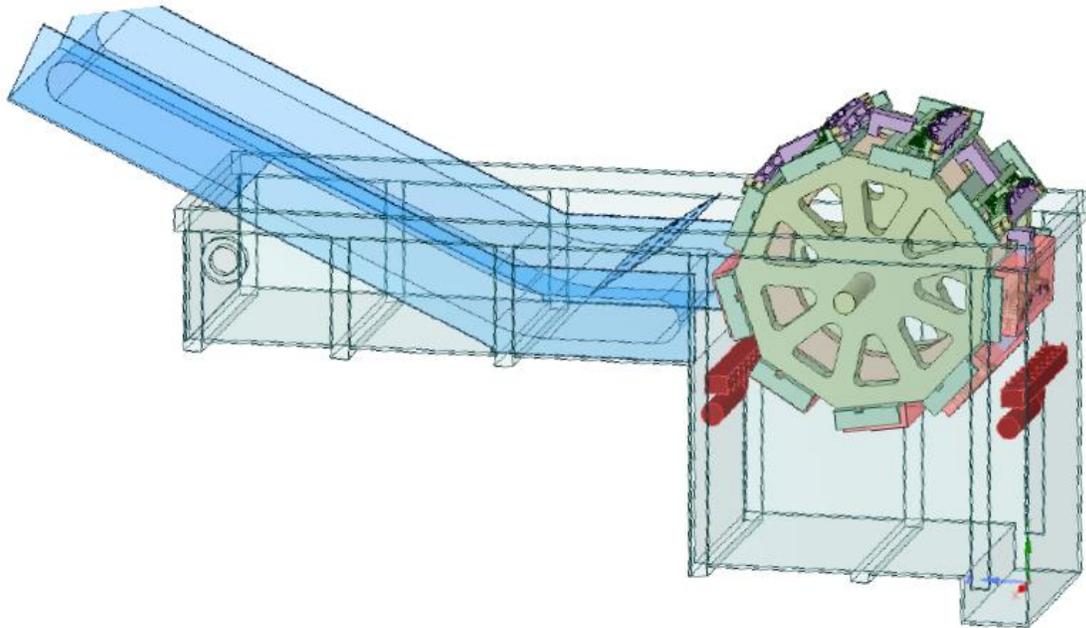
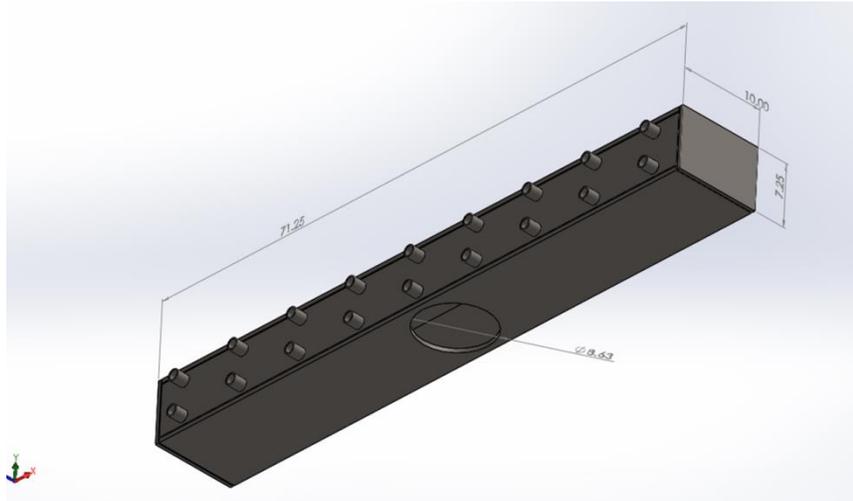


Figura 27. Propuesta para la modificación del sistema de temple de muelles de suspensión automotriz.

Lo importante en este caso es mantener la geometría y dimensiones de las hileras de boquillas. El tubo de alimentación es de 20 cm de diámetro y puede entrar al tanque desde cualquiera de las dos caras laterales. Es muy importante posicionar de manera precisa al distribuidor dentro del tanque, ya que cualquier variación notable puede conducir a un campo de velocidad de aceite muy distinto al esperado. La velocidad de alimentación de aceite en el distribuidor derecho es igual a la actual, 0.50 m/s, mientras que en el alimentador izquierdo es 0.75 m/s. En la implementación física de este sistema es muy conveniente considerar un bombeo mutuamente independiente de aceite en los distribuidores, de tal manera que los flujos de aceite en cada distribuidor puedan controlarse, medirse y registrarse de manera independiente. La salida de aceite del tanque puede ser por dos orificios en lugar de uno. Por ejemplo, considere un segundo orificio frente al ya existente. Las figuras 28 y 29 muestran los detalles de la geometría propuesta para la segunda flauta o manifull para el tanque de temple.



Espesor de placa= 0.5 in

Volumen interno= 3951.56 in³

Ancho 2= 9 in
Diámetro interno de boquillas= 0.5 in

Largo =70.25 in
Ancho 1= 6.25 in

Figura 27. Manifull de alimentación de aceite propuesta para la modificación del tanque de temple.

Por otra parte, se menciona que considerando que actualmente el aceite recirculado se enfría en torres de enfriamiento, este sistema no permite un control deseable de la temperatura ya que la temperatura del aceite fluctúa hasta en ~20°C en función de la estación del año. El flujo actual de aceite, que corresponde a una velocidad de alimentación de 0.5 m/s, es de aproximadamente 12.5 kg/s. Al introducir un segundo distribuidor con una velocidad de alimentación de 0.75 m/s, se obtiene un flujo de más del doble que el original. Además, al incrementar la velocidad de producción de la máquina se requiere remover más cantidad de energía del aceite. La implementación física de uno o varios intercambiadores de calor debe considerar el aumento del flujo de aceite, el mejor control de su temperatura, por ejemplo que no haya variaciones de más de 5°C, y la mayor tasa de remoción de calor que resulta de aumentar el volumen de piezas templadas por unidad de tiempo. En este sentido, se sugiere también considerar el cálculo térmico para la remoción de calor del aceite en el sistema de alimentación de aceite propuesto para no afectar la eficiencia actual.



PROIAT

2015



**Anexo 2: DIPLOMAS DE CURSO DE
CAPACITACIÓN PARA CAPACITADORES**

**Proyecto: Desarrollo de Metodología de Simulación
Fluidinámica Aplicada a la Optimización del Proceso
de Temple de Muelles de Suspensión Automotriz**

Dirección General de Industrias Pesadas y de Alta Tecnología



www.grupossc.com


Omar Rodríguez
Instructor

Grupo SSC Certifica que:

Eddy Alfaro López

Completo satisfactoriamente el curso de capacitación:

ANSYS SpaceClaim y ANSYS Fluent

Con una duración de:

40 horas

Monterrey, N.L., Marzo del 2016



www.grupossc.com


Omar Rodríguez
Instructor

Grupo SSC Certifica que:

José Carlos Mijares Ruíz

Completo satisfactoriamente el curso de capacitación:

ANSYS SpaceClaim y ANSYS Fluent

Con una duración de:

40 horas

Monterrey, N.L., Marzo del 2016



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a José Carlos Mijares Ruiz

por haber concluido satisfactoriamente el diplomado “Aplicación de metodología de simulación fluidodinámica en el proceso de temple de muelles de suspensión”, impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido del 19 al 23 de septiembre del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 23 de septiembre de 2016



El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a **Eddy Alfaro López**

Cinvestav
Unidad Saltillo

SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA

por haber concluido satisfactoriamente el diplomado “Aplicación de metodología de simulación fluidodinámica en el proceso de temple de muelles de suspensión”, impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido del 19 al 23 de septiembre del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 23 de septiembre de 2016

PROIAT 2015

Rassini



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a **Jesús Álvaro Padilla González**

por haber concluido satisfactoriamente el diplomado “Aplicación de metodología de simulación fluidodinámica en el proceso de temple de muelles de suspensión”, impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido del 19 al 23 de septiembre del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 23 de septiembre de 2016

PROIAT 2015

Rassini



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a **Orlando López Saldaña**

por haber concluido satisfactoriamente el diplomado “Aplicación de metodología de simulación fluidodinámica en el proceso de temple de muelles de suspensión”, impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido del 19 al 23 de septiembre del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 23 de septiembre de 2016

PROIAT 2015

Rassini



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a Julio Cesar Hernández Carrillo

por haber concluido satisfactoriamente el diplomado "Aplicación de metodología de simulación fluidodinámica en el proceso de temple de muelles de suspensión", impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido del 19 al 23 de septiembre del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 23 de septiembre de 2016

PROIAT 2015

Rassini



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a **Jesús Ernesto Meza Delgado**

por haber concluido satisfactoriamente el diplomado “Aplicación de metodología de simulación fluidodinámica en el proceso de temple de muelles de suspensión”, impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido del 19 al 23 de septiembre del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 23 de septiembre de 2016

PROIAT 2015

Rassini



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a Vicente Guerrero Ordaz

por haber concluido satisfactoriamente el diplomado “Aplicación de metodología de simulación fluidodinámica en el proceso de temple de muelles de suspensión”, impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido del 19 al 23 de septiembre del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 23 de septiembre de 2016

PROIAT 2015

Rassini



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a José Guadalupe Ruiz Juárez

por haber concluido satisfactoriamente el diplomado “Aplicación de metodología de simulación fluidodinámica en el proceso de temple de muelles de suspensión”, impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido del 19 al 23 de septiembre del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 23 de septiembre de 2016

PROIAT 2015

Rassini



PROIAT

2015



**Anexo 6: DIPLOMAS DE CURSO DE
CAPACITACIÓN PARA PERSONAL TÉCNICO**

**Proyecto: Desarrollo de Metodología de Simulación
Fluidinámica Aplicada a la Optimización del Proceso
de Temple de Muelles de Suspensión Automotriz**

Dirección General de Industrias Pesadas y de Alta Tecnología



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a **Gustavo Armendáriz Corpus**

por haber concluido satisfactoriamente el curso "Capacitación para el diagnóstico y corrección de factores que afectan a la distorsión de muelles de suspensión generada durante su proceso de templado", impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido el 18 y 19 de agosto del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 19 de agosto de 2016



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a Carlos Enrique Martínez

por haber concluido satisfactoriamente el curso "Capacitación para el diagnóstico y corrección de factores que afectan a la distorsión de muelles de suspensión generada durante su proceso de templado", impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido el 18 y 19 de agosto del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 19 de agosto de 2016



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a Julio Cesar Hernández Carrillo

por haber concluido satisfactoriamente el curso "Capacitación para el diagnóstico y corrección de factores que afectan a la distorsión de muelles de suspensión generada durante su proceso de templado", impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido el 18 y 19 de agosto del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 19 de agosto de 2016



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a **Orlando López Saldaña**

por haber concluido satisfactoriamente el curso "Capacitación para el diagnóstico y corrección de factores que afectan a la distorsión de muelles de suspensión generada durante su proceso de templado", impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido el 18 y 19 de agosto del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 19 de agosto de 2016



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a **Ricardo Martínez Muñoz**

por haber concluido satisfactoriamente el curso "Capacitación para el diagnóstico y corrección de factores que afectan a la distorsión de muelles de suspensión generada durante su proceso de templado", impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido el 18 y 19 de agosto del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 19 de agosto de 2015

PROIAT 2015

Rassini



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a **Eliud Eduardo Ledezma Martínez**

por haber concluido satisfactoriamente el curso "Capacitación para el diagnóstico y corrección de factores que afectan a la distorsión de muelles de suspensión generada durante su proceso de templado", impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido el 18 y 19 de agosto del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 19 de agosto de 2016

PROIAT 2015

Rassini



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a **Jesús Fidencio Marfil Cruz**

por haber concluido satisfactoriamente el curso “Capacitación para el diagnóstico y corrección de factores que afectan a la distorsión de muelles de suspensión generada durante su proceso de templado”, impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido el 18 y 19 de agosto del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 19 de agosto de 2016

PROIAT 2015

Rassini



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a Ernesto Peña Malacara

por haber concluido satisfactoriamente el curso "Capacitación para el diagnóstico y corrección de factores que afectan a la distorsión de muelles de suspensión generada durante su proceso de templado", impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido el 18 y 19 de agosto del presente.

Dr. Francisco Alfredo García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 19 de agosto de 2016



SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



Cinvestav
Unidad Saltillo

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo extiende la
presente

CONSTANCIA

a Gerardo Medina Luna

por haber concluido satisfactoriamente el curso "Capacitación para el diagnóstico y corrección de factores que afectan a la distorsión de muelles de suspensión generada durante su proceso de templado", impartido en el marco del proyecto PROIAT en la empresa San Luis Rassini, impartido el 18 y 19 de agosto del presente.

Dr. Francisco ~~Alfredo~~ García Pastor

Instructor del curso

Ramos Arizpe, Coah., 19 de agosto de 2016

PROIAT 2015

Rassini