

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FUNDICIÓN DE LA ALEACIÓN 1E-1076 Y DE LA FAMILIA DE PIEZAS PROTECTOR AS, UTILIZANDO EL SOFTWARE MAGMASOFT”

Por:

IVÁN DAVID MARTÍNEZ SALAZAR

EN OPCIÓN AL GRADO DE:

MAESTRIA EN CIENCIA DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

Junio 2023

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Optimización del proceso de fundición de la aleación 1E1076 y de la familia de piezas protector AS, utilizando el software Magmasof", realizada por el estudiante Iván David Martínez Salazar, con número de matrícula 2082179, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Arturo Juárez Hernández
Director

Dr. Marco Antonio L. Hernández Rodríguez
Revisor

Dr. Edgar Omar García Sánchez
Revisor

M. en C. Idalia Guadalupe Rodríguez Leal
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 557546

Acta Núm. 4184

Ciudad Universitaria, a 15 de junio del 2023.

RESUMEN

En los procesos de fundición ocurren una serie de defectos de diferentes orígenes, los softwares de simulación son una herramienta muy importante para predecir y optimizar este proceso, por lo que es importante desarrollar una metodología que permita hacer una predicción adecuada de estos defectos. En la planta de Caterpillar Ramos Arizpe, durante el 2020, se produjeron 3881 piezas de la familia “Protector AS”, de la aleación 1E-1076, de las cuales 822 presentaron el defecto de grieta en la zona “Radio” de la parte interna de la pieza. Este represento un 21% de producto no conforme, el cual no pudo ser reparado, significando una pérdida de aproximadamente \$550K USD. Por el impacto monetario que genero este defecto se determina la necesidad de un análisis del defecto, estudios de simulación del proceso y del diseño de la pieza, para determinar la causa raíz del defecto y dar una propuesta para disminuir su frecuencia a un nivel aceptable para la compañía. Se realizaron los siguientes análisis; microscopia óptica, ensayo no destructivo de partículas magnéticas, análisis de dureza Brinell y espectrometría de emisión de chispa, para hacer el análisis de falla y encontrar la causa raíz de la grieta. Posteriormente se realizaron análisis de simulación de los procesos del llenado de los moldes, solidificación, enfriamiento y de esfuerzos del estado actual, para posteriormente realizar una propuesta de diseño donde disminuyamos la presencia del defecto. Finalmente se realizaron pruebas en planta, con el propósito de validar la propuesta.

DEDICATORIO

*A mis padres Beatriz Salazar Gallegos y Melitón
Martínez Martínez.*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el soporte de la empresa CATERPILLAR RAMOS ARIZPE, por lo que quisiera agradecer al director de planta el ingeniero Fernando Lopez Villicaña, a M.C. Idalia Rodriguez, a los ingenieros Arturo Gamboa Valero y Cesar Rivera Aspiazu y a la licenciada Martha Menese Rey, por darme la oportunidad de continuar mi desarrollo profesional al permitirme estudiar esta maestría y el proporcionar los recursos necesarios para realizar el presente proyecto de tesis.

Al Doctor en ciencias Zhiping Lin; tu orientación, apoyo y sabiduría han sido invaluable en mi crecimiento personal y profesional. Gracias por compartir tus conocimientos y experiencias conmigo y por alentarme a dar lo mejor de mí.

Un profundo agradecimiento a mis compañeros del departamento de ingeniería y herramientas; los ingenieros Eduardo S. Mendez Rangel, J. Alberto Robles Castillo, M.C. Miguel A. Lopez soto y la ingeniera Evelyn N. Balderas de la Rosa, ya que su apoyo y trabajo fue esencial para la culminación de este proyecto.

Al Dr. Arturo Juarez Hernandez, gracias por tu generosidad, paciencia y compromiso con mi éxito. Por aceptarme bajo su tutela para el desarrollo de esta tesis y el guiarme hasta su finalización.

Quisiera agradecer a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a sus docentes del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación

en Materiales, por sus conocimientos impartidos en clase y el apoyo brindado durante mi tiempo en el programa.

Un especial agradecimiento al ingeniero Gilberto Escobedo Camarena, M. C. Pablo Córdova Rivera y al Dr. Efraín Almanza Casas; todos docentes de la carrera de Ingeniería en Materiales en el Glorioso Instituto Tecnológico de Saltillo, con quienes lleve clase e inspiraron mi pasión por el estudio de la metalurgia.

Finalmente quisiera dar el mayor de mis agradecimientos a mis padres, Beatriz Salazar Gallegos y Meliton Martínez Martínez, por darme la vida y los medios para vivirla, por empujarme a seguir mis aspiraciones y nunca limitar mi desarrollo profesional, por su amor, su cariño y su apoyo. ¡Los amo y gracias!

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	3
DEDICATORIO	4
AGRADECIMIENTOS	5
ÍNDICE GENERAL	7
1. INTRODUCCION	8
OBJETIVO GENERAL	12
OBJETIVO ESPECIFICOS	13
HIPOTESIS	13
2. MARCO TEORICO	14
2.1. SIMULACIÓN DE PROCESOS DE FUNDICIÓN	14
2.2. CRITERIO DE NIYAMA	18
2.3. MAGMASOFT.....	21
2.4. METODOS DE EXAMEN NO DESTRUCTIVOS (NDE).....	22
2.5. CHILLS	27
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	30
3.1. ANÁLISIS DE FALLA EN CAMPO	30
3.2. ANÁLISIS DE FALLA DURANTE PRODUCCIÓN.	31
3.3. SIMULACIÓN DEL ESTADO ACTUAL	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	42
4.1. DEFINICIÓN DEL DEFECTO	42

4.2.	SIMULACIÓN DEL ESTADO ACTUAL	49
4.3.	SIMULACIÓN DE PROPUESTA	56
4.4.	VALIDACIÓN EN PLANTA	58
5.	CONCLUSIONES.....	61
	REFERENCIAS	62
	INDICE DE FIGURAS	64
	INDICE DE TABLAS	66

INTRODUCCION

Caterpillar es una compañía líder a nivel mundial, en la fabricación de equipos de construcción y minería, de motores diésel y de gas natural, turbinas industriales de gas y locomotoras diésel-eléctricas. [1]

La planta de Caterpillar Ramos Arizpe (CRA) inicio en el año de 1999, cuando se fundó Aceros Fundidos Internacionales (AFI) como una empresa conjunta entre Caterpillar Inc. y Citation Co. La planta se desarrolló para la fabricación de piezas de fundición de acero, para cumplir con parte de la demanda de “GETs”

(Ground Engaging Tools o herramientas de contacto con el suelo) de los clientes. Cat GETs (Figura 1) son los componentes de los equipos CAT que asisten en el movimiento de la tierra y a su vez sirven como material de desgaste que protege al cucharón y permiten prolongar su vida útil.

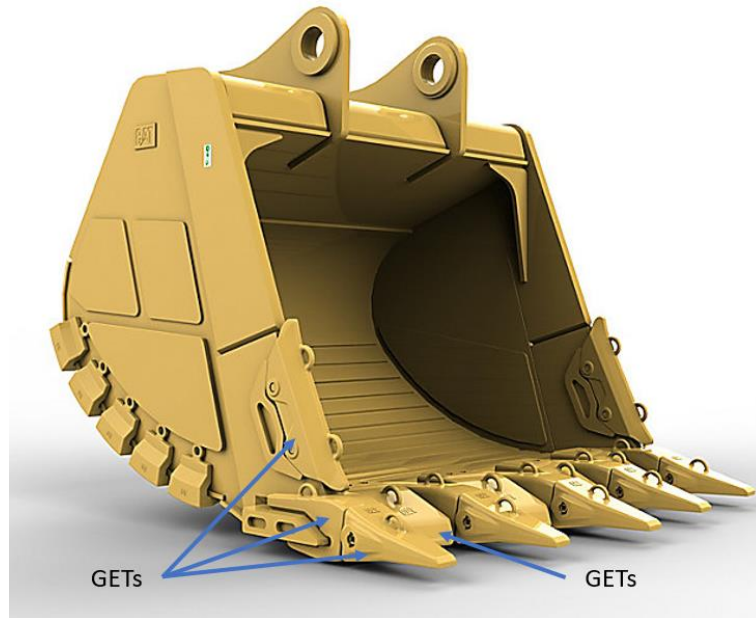


Figura 1: Cucharón marca Caterpillar ensamblado con CAT GETs advancys.

La planta hizo su primera colada en octubre de 1999 y produjo su primera pieza al mes siguiente. En ese momento, la plantilla total era de 102 empleados. En 2003, la empresa conjunta AFI pasó a ser 100 % propiedad de Caterpillar Inc., y la instalación pasó a llamarse oficialmente Caterpillar Ramos Arizpe en 2004. [2]

En el presente trabajo se analizó el defecto de grieta encontrado en las piezas de la familia “Protector / Shroud” (Figura 2), estos componentes son fabricados con la aleación de acero con 0.29% de carbono que cumple con la

especificación, interna de Caterpillar, 1E-1076 para piezas tratadas térmicamente expuestas a abrasión severa por ranurado.



Figura 2: GET Protector.

Durante su uso, una de las piezas de la familia “Protector” fracturo en el cambio de sección, resultando en una queja del cliente.

La pieza que fracturo es enviada a laboratorio metalúrgico de Caterpillar, en Mapleton, IL, para su análisis. Se realizaron inspecciones visuales, análisis químico y de propiedades mecánicas; además se tomaron muestras de la zona donde fracturo la pieza y se les realizaron análisis metalográficos. Los resultados de estas pruebas concluyeron que tanto las propiedades mecánicas como la química de las piezas cumplieron con la especificación 1E-1076, por lo que el proceso de fusión y tratamientos térmicos fueron descartados con los causantes de la falla; sin embargo, las metalografías mostraron la presencia de porosidad, causada por solidificación, cerca de la superficie de la fractura.

En planta se detectaron piezas con grietas en la superficie del radio en el cambio de sección, mediante la técnica de partículas magnéticas; se seleccionó una pieza y fue analizada en el laboratorio metalúrgico. Los resultados de las pruebas de químicos y mecánicas mostraron nuevamente que estas propiedades estaban dentro de especificación; sin embargo, al realizar metalografías, en la sección transversal a la grieta, se encontró que el área alrededor estaba descarbonada indicando que esta se generó antes de tratamiento térmico. Las metalografías también mostraron la presencia de porosidades e inclusiones no metálicas.

Los resultados de las pruebas llevaron a la conclusión de que la fractura de la pieza fue ocasionada por defectos de solidificación y una grieta formada durante la solidificación y enfriamiento.

Se realizaron análisis de simulación de solidificación natural de la pieza y el resultado que resalto más fue el del criterio de Niyama, el cual indico una alta tendencia a generar microporos en el cambio de sección, donde la grieta y la fractura fueron encontrados. Se simulo el proceso de llenado, solidificación y enfriamiento, además de simular la concentración de esfuerzos de estos dos últimos procesos, del diseño actual. Los resultados que resaltaron fueron los altos niveles de aire atrapado durante las primeras etapas del llenado del molde, esto puede favorecer la generación de inclusiones por re-oxidación, nuevamente el criterio de Niyama, indicando la tendencia a generar porosidad en la zona del

cambio de sección, y la concentración de esfuerzos donde la grieta fue encontrada.

Con los resultados de simulación de la condición actual se concluyó que la causante de la falla fue la presencia de porosidad, lo que debilitó el material y favoreció la aparición de grietas causadas por los esfuerzos que se generan durante el proceso de solidificación y enfriamiento del metal en el molde. Se realizó la propuesta de utilizar un “chill” para modificar el perfil de solidificación y con esto eliminar los defectos internos y que el material sea capaz de soportar los esfuerzos y no presentar grietas.

Se realizaron pruebas en piso, incluyendo el “chill” en el corazón que forma la zona donde se presentaron las grietas, y se redujo el porcentaje de rechazo del 21% a menos del 1%.

OBJETIVO GENERAL

Análisis del proceso de fundición por gravedad para una aleación 1E-1074 en molde pet-set de arena sílice y el diseño de las piezas de la familia Protector AS, a través del software de simulación de procesos de fundición MAGMAsoft y generar una propuesta para reducir el nivel de producto no conforme a menos del 4%.

OBJETIVO ESPECIFICOS

1. Hacer el análisis de fallas para encontrar los factores que ocasionan la formación de grietas, en este caso se hizo un estudio metalográfico y se seleccionó partículas magnéticas como prueba no destructiva.
2. Realizar un análisis de esfuerzos en las zonas críticas durante el proceso de solidificación en el molde en el módulo MAGMAstress del software MAGMAsoft.
3. Realizar análisis de llenado y solidificación con el criterio de Niyama para buscar zonas susceptibles a la formación de defectos de solidificación.
4. Proponer un cambio en el sistema de moldeo para direccionar la solidificación y disminuir los defectos internos.
5. Simular el sistema propuesto.
6. Validar la nueva propuesta de diseño en planta.

HIPOTESIS

Los diseños de las familias de piezas “Protector AS” de la aleación 1E-1076 presentan defectos internos en la zona de radio, los cuales disminuyen la capacidad del material de soportar los esfuerzos generados durante los procesos de solidificación y enfriamiento del metal, ocasionando que las piezas presenten grietas. Al modificar el perfil de solidificación, para eliminar los defectos internos de las piezas, el material será capaz de soportar los esfuerzos y no agrietarse.

MARCO TEORICO

2.1. SIMULACIÓN DE PROCESOS DE FUNDICIÓN

La colaboración entre el diseño y la manufactura es importante en el desarrollo de productos e introducción de los mismos ya que es un enfoque necesario que a menudo da como resultado una mejora en la calidad y el costo de la pieza de fundición. Siguiendo esta práctica, se pueden evitar una serie de pruebas que pueden ser costosas y se pueden eliminar los retrasos que invariablemente aparecen cuando se ignoran las consideraciones de la ingeniería de fundición.

En los últimos años varias tecnologías asistidas por computadora han avanzado mucho en el proceso de desarrollo de productos. Con ellas, las fases de diseño, verificación del diseño y la planificación de la fabricación tienen el potencial de volverse procesos simultáneos, reduciendo drásticamente el tiempo de ciclo entre el diseño a la fabricación.

2.1.1. SIMULACIÓN DE SOLIDIFICACIÓN

La predicción precisa de la ubicación de los defectos relacionados con la solidificación es una de las preocupaciones principales del ingeniero de fundición. Esta tarea se ha llevado a cabo tradicionalmente analizando un número variado de relaciones geométricas dentro de la pieza de fundición y aplicando diferentes fórmulas, derivadas experimentalmente. Una dificultad principal es poder visualizar y medir con precisión volúmenes y superficies en configuraciones de fundición complejas, mientras se trabaja con secciones y vistas bidimensionales. Otro problema es la aplicación de datos experimentales obtenidos de formas de fundición simples, como placas y barras, a configuraciones curvas, secciones de espesor variable, uniones complejas y áreas centrales con flujo de calor restringido. En vista de todo esto, los programas que simulan la solidificación de una pieza fundida se están convirtiendo en una de las herramientas CAD/CAM (CAD: Diseño asistido por computadora; CAM: Maquinado asistido por computadora) más efectivas disponibles para el productor de fundición de acero [3, 4, 5, 6]. Los diversos tipos de programas de simulación de solidificación cubren

una amplia gama de resultados, calidad de resultados, facilidad de uso, tiempo de ejecución y costo.

La simulación de solidificación tridimensional es quizás el avance más importante en la aplicación CAD/CAM al proceso de fundición de acero. Varios potentes programas actualmente disponibles intentan dar una representación cercana de lo que realmente ocurre dentro de la fundición, desde el momento en que se vierte el metal líquido en el molde hasta que se solidifica. Esto brinda, a las fundiciones de acero, la capacidad de probar el diseño de la pieza de fundición antes de la producción de patrones, lo que ahorra una cantidad significativa de tiempo y dinero asociados con los métodos convencionales.

Los diversos programas disponibles ofrecen diferentes ventajas, desventajas y opciones y cada uno de ellos es el más adecuado para una operación en particular. Por ejemplo, los programas que proporcionan una salida de contornos de solidificación, basados en una fórmula de relación de volumen a superficie, pueden realizar la simulación de una pieza compleja en solo unos minutos. La velocidad y la facilidad de uso de estos programas los hace más adecuados para trabajos de fundición donde es necesario procesar muchas piezas diferentes y el tiempo de cálculo es un problema.

Por otro lado, los sofisticados programas FEM (método de elementos finitos) y FDM (método de diferencias finitas) se basan en la ejecución simultánea de cálculos complejos de transferencia de calor en cada elemento o bloque de

una malla tridimensional fina [7]. Esto exige una gran potencia computacional y un tiempo de procesamiento prolongado, así mismo, proporciona una mayor precisión y una representación fiel de lo que realmente sucede en el molde, incluso teniendo en cuenta los efectos térmicos que se producen durante el llenado del molde.

2.1.2. SIMULACIÓN DE FLUJO DE FLUIDOS

Otra consideración importante para el ingeniero de fundición es diseñar métodos de llenado de moldes que minimicen una gran variedad de problemas de calidad, en la pieza de fundición, asociados con ese proceso. Los problemas tales como el atrapamiento de gas, la erosión del molde y los defectos de desprendimiento de molde y las inclusiones de escoria, los fallos en el llenado completo del molde y los gradientes térmicos no deseados dentro de la pieza de fundición se han abordado tradicionalmente mediante el diseño de sistemas de colada que proporcionan un flujo de suave, un tiempo de llenado adecuado, dispositivos de atrapamiento de escoria y reducción de la aspiración de aire. Los datos experimentales, las fórmulas de diseño basadas en principios hidráulicos, las reglas generales y la experiencia, son algunos de los enfoques utilizados para abordar estos problemas tan complejos y difíciles. Esta variedad de métodos es necesaria debido al hecho de que no hay dos aleaciones iguales en términos de fluidez, densidad, tensión superficial o tendencia a la formación de óxido viscoso.

Se han desarrollado programas que dan información sobre las condiciones de flujo de fluidos durante el llenado de un molde con metal fundido [8]. A medida que los ingenieros de fundición los utilicen cada vez más, estos programas eliminarán gran parte de las conjeturas involucradas en el diseño de los sistemas de llenado de moldes, mejorando así la calidad y la consistencia.

Debe enfatizarse que la dificultad para generar mallas FEM para simulaciones de flujo de líquido es generalmente mayor que para el análisis de solidificación, ya que requieren una cantidad mínima de elementos en los espesores de la sección de la pared. Esto afecta particularmente a piezas de fundición de paredes delgadas, donde el número de nodos de malla puede aumentar a números inmanejables.

2.2. CRITERIO DE NIYAMA

El criterio de Niyama es un parámetro térmico local, calculado por paquetes de software de simulación, que se usa comúnmente para predecir la porosidad de contracción relacionada con la alimentación causada por gradientes de temperatura poco profundos. Se define como:

$$N_y = G / \sqrt{\dot{T}}$$

donde G es el gradiente térmico y T es la velocidad de enfriamiento. El criterio de Niyama se evalúa cerca del final de la solidificación, cuando normalmente se forma la contracción por solidificación. Se espera que la porosidad por

contracción se forme por debajo de un valor mínimo crítico de Niyama, donde el valor mínimo de Niyama se define como el valor más bajo encontrado en la región de interés [9]. La relación entre el valor mínimo de Niyama y la porosidad de contracción se muestra esquemáticamente en la Figura 3.

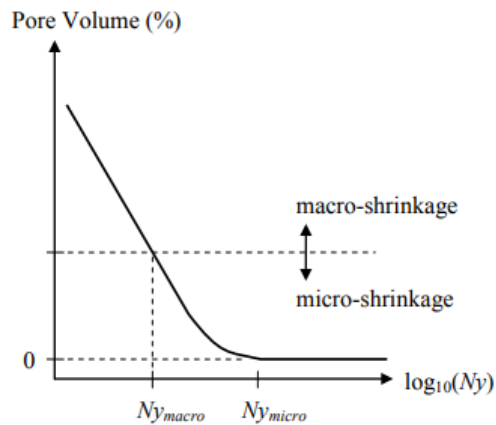


Figura 3: Esquema que muestra la correlación cualitativa entre el criterio de Niyama y la porosidad de contracción.

Para valores de Niyama mínimos grandes, no se espera porosidad de contracción. Cuando el valor mínimo de Niyama disminuye por debajo de cierto valor crítico (N_{y_micro}), comienza a formarse una microcontracción (es decir, una pequeña contracción de solidificación que no es visible en una película radiográfica estándar). A medida que el valor mínimo de Niyama disminuye aún más, la cantidad de contracción aumenta hasta que se alcanza otro valor crítico (N_{y_macro}). En este punto, la cantidad de contracción es lo suficientemente grande como para denominarse macrocontracción (es decir, contracción de solidificación visible, que puede detectarse mediante técnicas radiográficas comunes). La cantidad de macrocontracción aumenta a medida que el valor mínimo de Niyama disminuye por debajo de N_{y_macro} [10].

Se ha encontrado que el criterio de Niyama, evaluado en el software de simulación de fundición, proporciona una predicción sólida de la contracción relacionada con la alimentación. Predice tanto la macrocontracción como la microcontracción no detectable mediante radiografía. Estudios previos, usados como referencia para este trabajo, [11, 12, 13, 14, 15] indican que los valores mínimos críticos de Niyama que se muestran en la Fig. 3 tienen los siguientes rangos para el acero y algunas aleaciones base de níquel investigadas: $Ny_{macro} = 0.1 - 1.0 (\text{°C} \cdot \text{seg})^{1/2}/\text{mm}$, dependiendo de la sensibilidad radiográfica; y $Ny_{micro} = 2.0 - 3.0 (\text{°C} \cdot \text{seg})^{1/2}/\text{mm}$. La figura 4, muestra la correlación obtenida por los profesores Kent D. Carlson y Christoph Beckermann, de la universidad de Iowa, en su trabajo titulado “Development of Thermophysical Property Datasets, Benchmark Niyama Results, and A Simulation Qualification Procedure” [10]; donde se comparan los resultados de las radiografías, de dos placas vaciadas con acero inoxidable CN3MN, y los resultados del criterio de Niyama obtenidos a través de simulación.

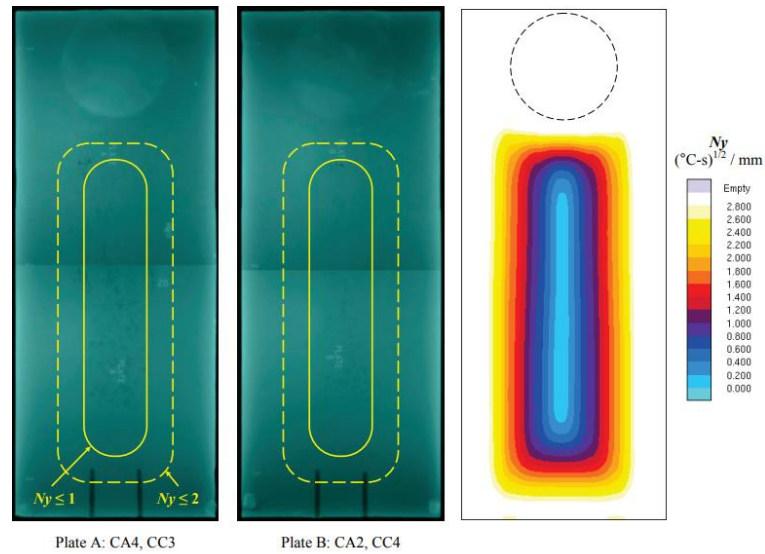


Figura 4: Comparación de las radiografías de ambas placas CN3MN (las indicaciones de contracción de la prueba radiográfica (RT) de ASTM se enumeran debajo de cada radiografía) con los contornos del criterio de Niyama simulados en el plano medio de la placa.

2.3. MAGMASOFT

MAGMASOFT® es la herramienta de optimización completa y eficaz para mejorar la calidad de la fundición de metales, optimizar las condiciones del proceso y reducir los costos de producción. Por lo tanto, al utilizar la metodología de diseño virtual de experimentos y optimización autónoma, se pueden establecer parámetros de proceso sólidos y diseños de fundición optimizados para todos los materiales y procesos de fundición, incluido el tratamiento térmico y la metalurgia de fusión, de manera eficiente y completa al mismo tiempo.

Por medio de Autonomous Engineering™, las simulaciones con MAGMASOFT® se pueden usar en un plan de prueba virtual automatizado para perseguir diferentes objetivos de calidad y costo simultáneamente. Se generan amplios conocimientos e instrucciones/medidas prácticas tangibles teniendo en

cuenta las condiciones de diseño y proceso para el llenado, la solidificación y el enfriamiento del molde. El rango de resultados comprende esfuerzos residuales y distorsiones, formación de microestructuras y propiedades locales. [16]

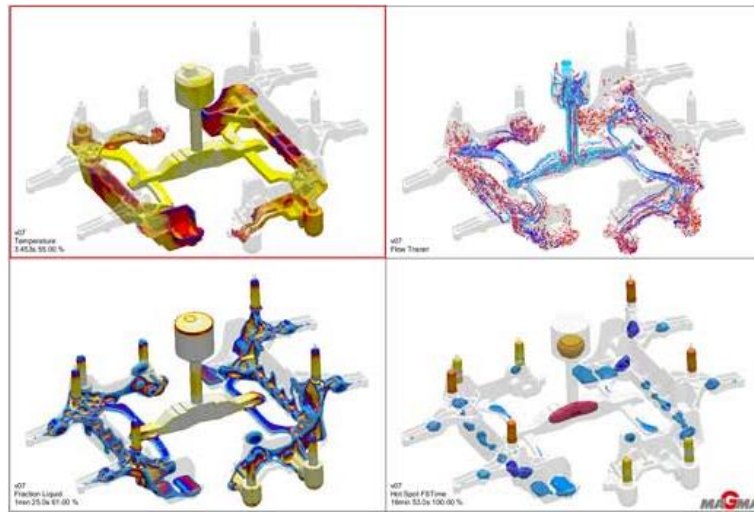


Figura 5: Ejemplos de resultados de simulaciones realizadas con el software MAGMAsoft.

2.4. METODOS DE EXAMEN NO DESTRUCTIVOS (NDE)

Examen no destructivo (NDE) es un término general utilizado en esta guía para identificar todos los métodos que permiten la evaluación de soldaduras y áreas adyacentes sin destruir su utilidad. El propósito de esta cláusula es familiarizar al lector con algunos de los métodos de examen no destructivos más utilizados y las condiciones fundamentales para su uso. El examen visual es el más común de todos los exámenes no destructivos.

2.4.1. PARTÍCULA MAGNÉTICA (MT)

Este método NDE se utiliza para localizar discontinuidades superficiales o cercanas a la superficie en materiales ferromagnéticos. El examen de partículas magnéticas se basa en el principio de que las líneas de fuerza magnéticas se distorsionarán por un cambio en la continuidad del material; es decir, una discontinuidad que crea un campo magnético o una fuga de flujo (Figura 6).

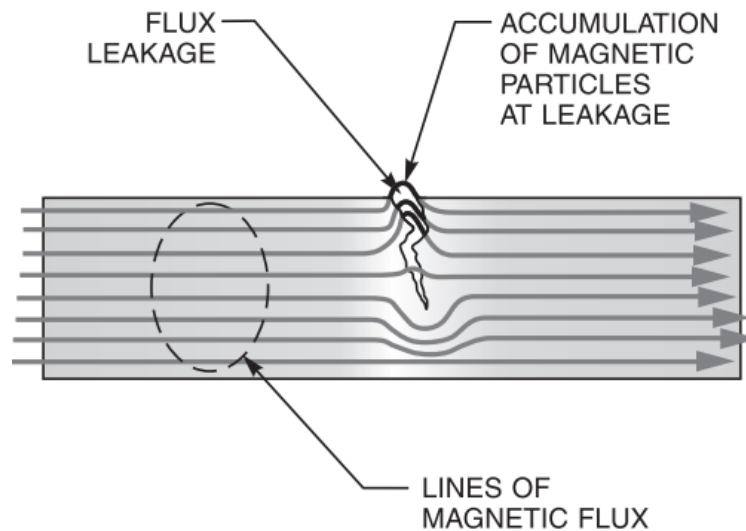


Figura 6: Fuga de campo magnético.

Una soldadura puede magnetizarse pasando una corriente eléctrica a través del área de soldadura (magnetización directa) o colocando la soldadura en un campo magnético (magnetización indirecta). La corriente eléctrica crea un campo magnético perpendicular al flujo de corriente. Por esta razón, los campos magnéticos se aplican en al menos dos direcciones, perpendiculares entre sí, para asegurar que las áreas de examen se evalúen completamente.

El método de magnetización directa se usa normalmente con corriente continua (CC), corriente continua de media onda (hwdc) o corriente continua de onda completa (fwdc) (Figura 7). Este tipo de corrientes tienen capacidades de penetración que generalmente permiten detectar pequeñas discontinuidades en el subsuelo. La magnetización directa también se puede utilizar con corriente alterna (AC), que se limita únicamente a la detección de discontinuidades superficiales. La corriente alterna también es el método de elección para la ubicación de discontinuidades de fatiga relacionadas con el servicio.

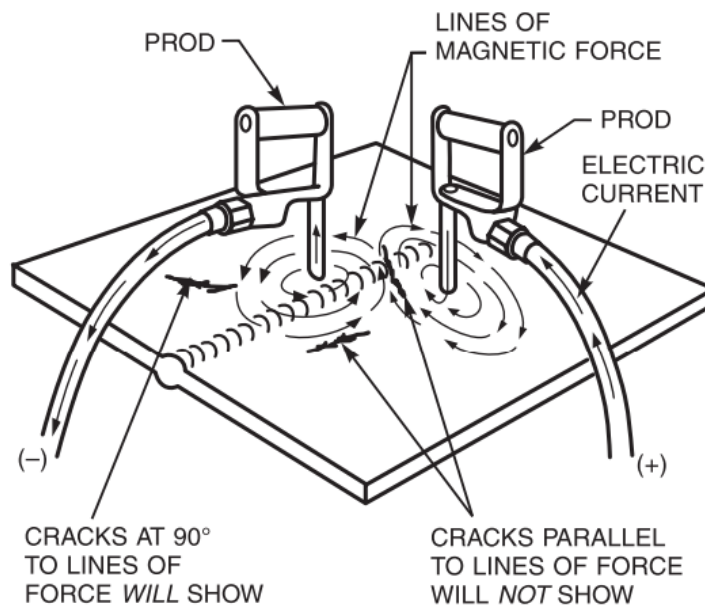


Figura 7: Magnetización directa.

La detección de discontinuidades leves bajo la superficie depende de varias variables, incluido el método de magnetización, el tipo de corriente, las direcciones y la densidad del flujo magnético y las propiedades del material de la

soldadura. Al evaluar las discontinuidades de la superficie solamente, se prefiere la corriente alterna (AC) con el método de magnetización indirecta (Figura 8).

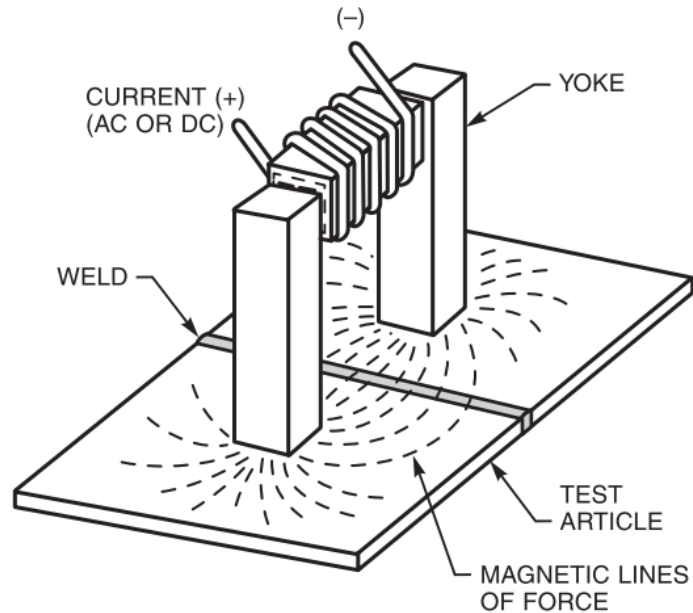


Figura 8: magnetización indirecta.

La corriente alterna invierte continuamente la polaridad (dirección) del campo magnético y hace que las partículas magnéticas tengan una mayor movilidad que la que es posible con la corriente continua. La movilidad de las partículas promueve la detección de fugas de flujo débiles producidas por pequeñas discontinuidades que rompen la superficie. Sin embargo, la corriente alterna tiene una capacidad de penetración muy baja porque el campo magnético alterno se concentra en la superficie del metal.

Cuando el campo magnético se ha establecido dentro de la pieza de trabajo, se aplican partículas magnéticas (medio de examen) a la superficie a

examinar. Las partículas magnéticas pueden estar secas o suspendidas en un líquido. Las discontinuidades se pueden mejorar aún más utilizando partículas magnéticas fluorescentes y observándolas bajo luz negra. Después de eliminar el exceso de partículas, el campo de fuga de flujo magnético en una discontinuidad detectable revela su ubicación, forma y tamaño. Estas indicaciones generalmente se distinguen por su apariencia como líneas de medio nítidas y bien definidas contra el fondo de la parte que se está inspeccionando.

El examen de partículas magnéticas puede ser muy beneficioso como técnica de evaluación durante el proceso. La garantía de una soldadura sólida antes de que se complete la soldadura puede evitar reparaciones costosas del producto final. El examen de partículas magnéticas en proceso se ha convertido en una práctica más común debido a la portabilidad de los equipos ligeros modernos. Esta ventaja ayuda a reducir el tiempo de producción. Ejemplos de exámenes de partículas magnéticas en proceso son soldaduras con ranuras traseras y excavaciones de reparación para garantizar la eliminación de discontinuidades.

El examen de partículas magnéticas es menos costoso que el examen radiográfico (RT) o ultrasónico (UT). El equipamiento necesario para realizar el examen de partículas magnéticas es menos costoso que el equipo utilizado para exámenes radiográficos o ultrasónicos. La formación y la experiencia necesarias para realizar exámenes de partículas magnéticas son menos amplias que las necesarias para realizar exámenes de radiografía y ultrasonidos. Usando MT, el

inspector obtiene una indicación visible instantánea del tamaño y la orientación de la discontinuidad. En comparación con PT, el método MT tiene la ventaja de revelar discontinuidades que no están abiertas a la superficie y, por lo tanto, no son detectables por PT. El examen con partículas magnéticas es generalmente más rápido, requiere menos preparación de la superficie y, por lo tanto, suele ser más económico que el examen con líquidos penetrantes (sin tener en cuenta los costos del equipo).

El método MT está limitado a materiales ferromagnéticos. Las uniones soldadas entre metales de características magnéticas diferentes pueden crear indicaciones de partículas magnéticas no relevantes, incluso aunque las soldaduras en sí sean sólidas. La mayoría de las superficies de soldadura son aceptables para el examen de partículas magnéticas después de eliminar la escoria u otro material extraño que pueda retener mecánicamente el medio de prueba o bloquear el medio de una verdadera discontinuidad. Los requisitos de preparación de la superficie antes de la MT generalmente se abordan en los requisitos del código aplicable. [17]

2.5. CHILLS

Los bloques de enfriamiento, templaderas, enfriadores o chills (por su nombre en inglés) se insertan en el molde para mejorar la distancia de alimentación al crear un gradiente de temperatura más pronunciado. La superficie fría, en contacto con el metal fundido, debe estar limpia y seca. La rugosidad de

la superficie tiene poco efecto sobre las características de transferencia de calor. Los enfriadores se pueden usar con una fina capa refractaria o con negro de humo. Los enfriadores de hierro fundido o acero, para todos los propósitos prácticos, son igualmente efectivos. Los enfriadores de cobre enfriados por agua son más efectivos que los de hierro fundido o grafito sin enfriar; sin embargo, la efectividad de estos enfriamientos externos se reduce en gran medida por la formación de un espacio en la interfaz de fundición/ bloque de enfriamiento a medida que la fundición se contrae y se aleja del enfriador. Los bloques de enfriamiento se pueden utilizar al final de las secciones de la pieza de fundición ("end chill") y como "drag chill" entre dos alimentadores. [18]

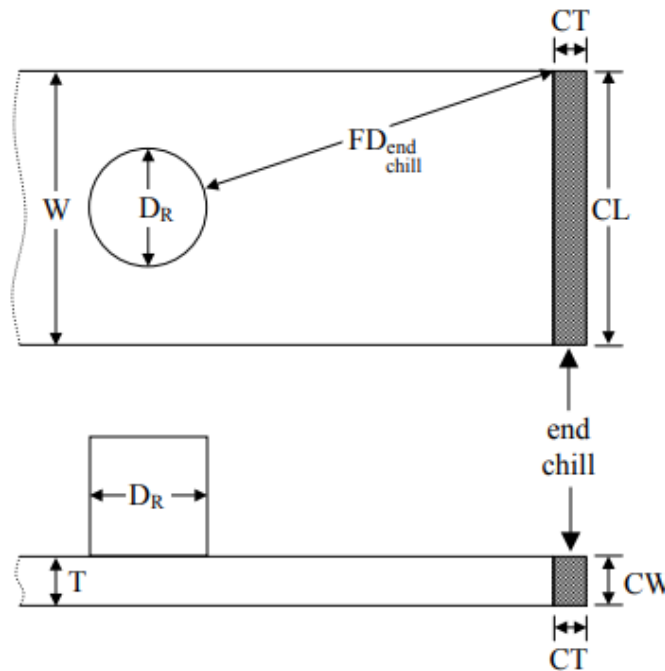


Figura 9: Diagrama representativo de un "End Chill"

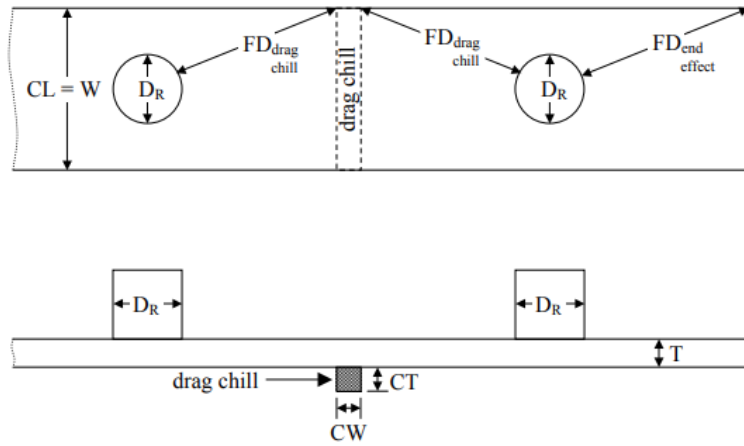


Figura 10: Diagrama representativo de un "Drag Chill"

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. ANÁLISIS DE FALLA EN CAMPO

Dos componentes que corresponden al mismo número de parte, de la familia Protector AS y de la aleación 1E-1076, fallaron en campo al fracturarse completamente; como se muestra en la figura 11. Estos componentes fueron enviados al laboratorio metalúrgico de la planta de Caterpillar en Morton, Illinois.



Figura 11: Pieza del número de parte 346-7772 que fallo en campo.

Se realizaron análisis de la superficie de la fractura y se tomaron muestras de la zona donde está inició, estas fueron pulidas y atacadas con 3% nital para analizar la microestructura. Se creó un mapeo de durezas en la zona X-X, especificada en el dibujo técnico de la pieza (Figura 12), para corroborar que las propiedades mecánicas de las piezas estén conforme a la especificación interna de Caterpillar 1E-0106A. Finalmente se analizó la composición química de cada una de las piezas, para verificar que este con los rangos establecidos en la especificación de la aleación 1E-1074.

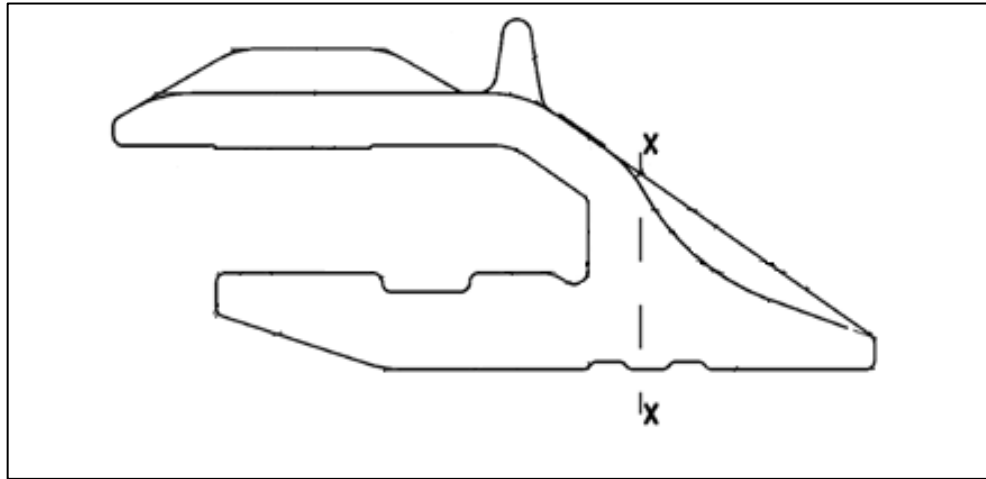


Figura 12: Dibujo técnico, donde se muestra la zona X-X.

3.2. ANÁLISIS DE FALLA DURANTE PRODUCCIÓN.

Durante la producción de las piezas de la familia Protector AS, se encontraron grietas en el radio interno de la zona de ensamble (Figura 13). La grieta fue encontrada por medio de una inspección con partículas magnéticas que se realiza después del proceso de tratamiento térmico.

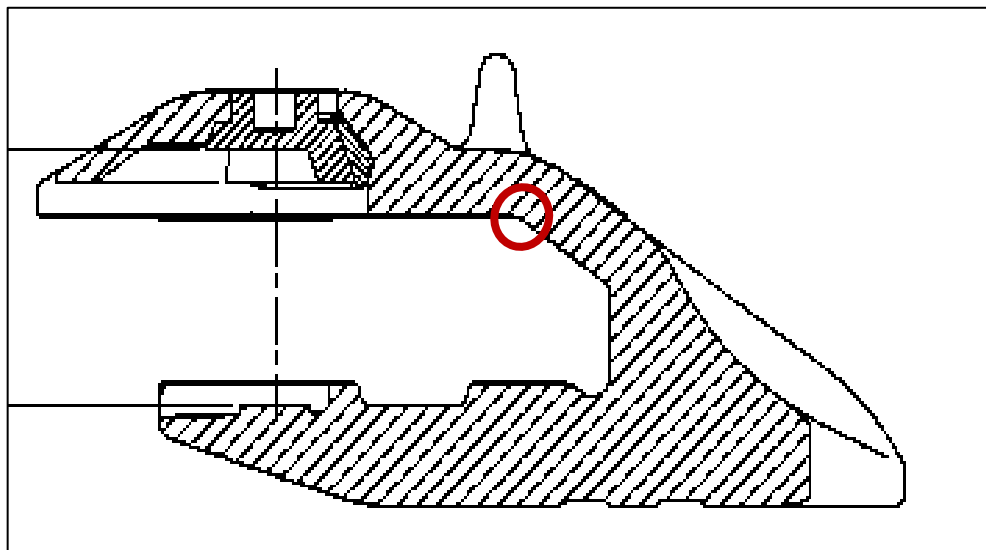


Figura 13: Radio donde se presenta la grieta.

La pieza fue enviada al laboratorio metalúrgico de ACM México en García Nuevo León, donde se realizó un análisis de fallas para determinar la causa de la grieta. Se cortó la pieza, como se muestra en la Figura 14, para aislar el área donde se ubica la grieta y facilitar el análisis.

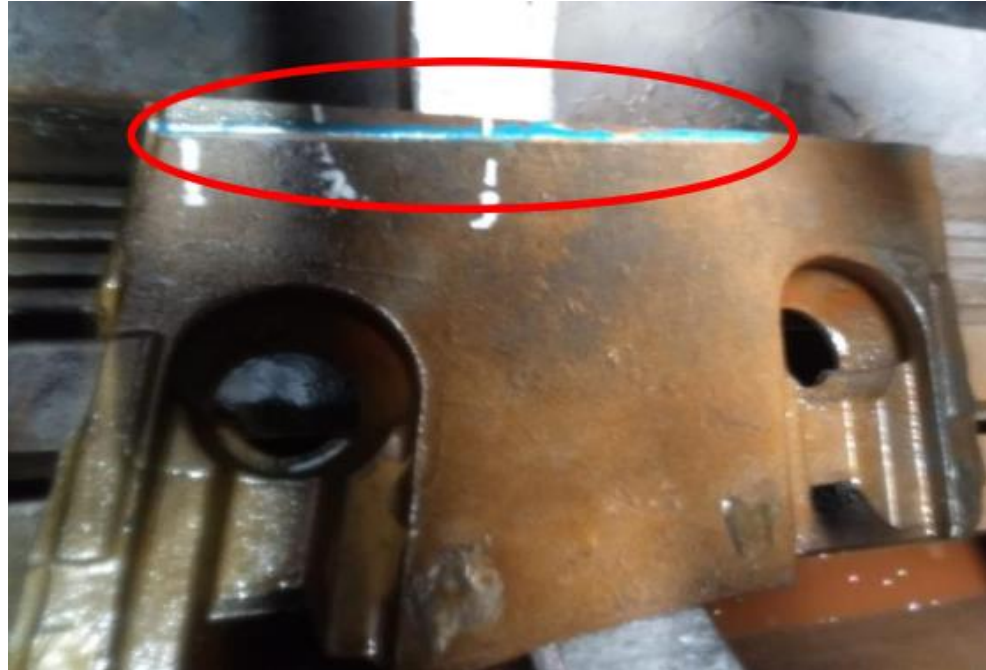


Figura 14: Pieza detectada durante el proceso, cortada para facilitar su análisis.

Se cortaron 3 muestras a través de la grieta y se realizaron análisis metalográficos para buscar el inicio de la grieta. Las muestras también fueron atacadas con nital al 3% para revelar su microestructura.

Se analizó la composición química, por medio de espectrometría de chispa, en la zona cercana a la grieta y en el centro de la pieza. También se realizaron pruebas de dureza Brinell, para validar las propiedades mecánicas.

3.3. SIMULACIÓN DEL ESTADO ACTUAL

3.3.1. SIMULACIÓN DE SOLIDIFICACIÓN NATURAL

Se realizó una simulación de solidificación natural de la pieza, en el paquete de simulación MAGMASoft, y se analizaron los resultados de “Hot Spots” (puntos calientes), “Niyama Criterion” y “Fraction Liquid” (fracción líquida); estos resultados dieron un panorama general del efecto que tiene el diseño de la pieza en general defectos de solidificación, macroporosidad y microporosidad. En esta simulación solo se tomaron en cuenta la geometría de la pieza, asignándole el “ID Casting”, y con la función de “Automatic mold” se generó una geometría de molde sencilla, para el cálculo de la transferencia de calor entre el molde y el metal (Figura 15).

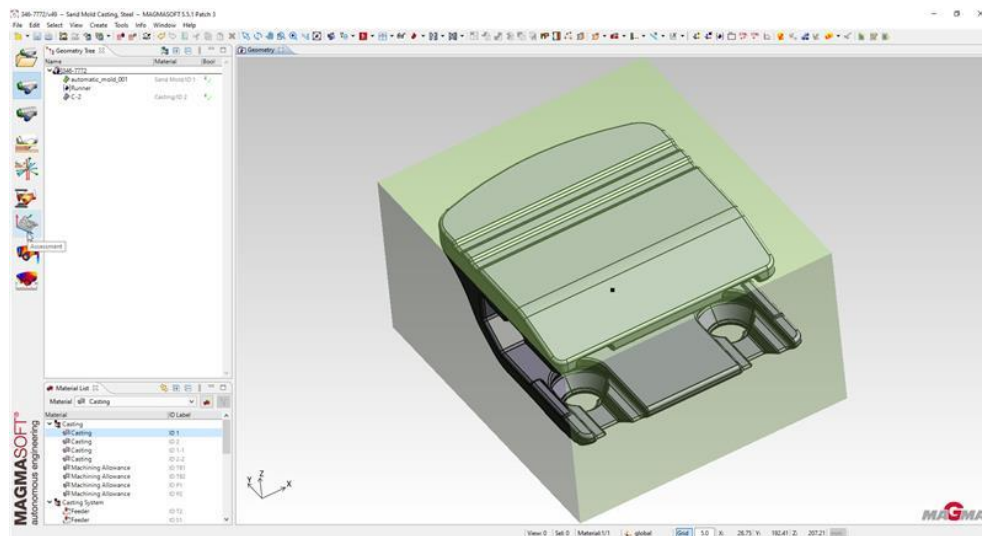


Figura 15: Perspectiva de geometría del software MAGMASoft con diseño de la pieza 346-7772.

Posteriormente se realizó una simulación de solidificación natural con el sistema de mazarotas incluido, se evaluaron los mismos resultados con el

objetivo de evaluar la capacidad de alimentación del diseño de mazarotas actuales para eliminar defectos internos. Se incorporaron las geometrías actuales del sistema de alimentación, como se ve en la Figura 16, y a cada mazarota se le asignó un “ID Feeder” específico; también se le incorporo las geometrías de las camisas exotérmicas a las cuales se les asigno un “ID Sleeve” a cada una. Para estas simulaciones se utilizó la temperatura inicial de 1550°C, el molde se le asignó el material de “Coldbox Silica”, la aleación utilizada fue la “GS30NiCrMo2_2” y a las camisas se les asigno el material EXACAST (Figura 17); esto de acuerdo con las recomendaciones realizadas por el proveedor del software MAGMASoft, para que represente de manera más aproximado posible las condiciones del proceso que se lleva actualmente en Caterpillar Ramos Arizpe.

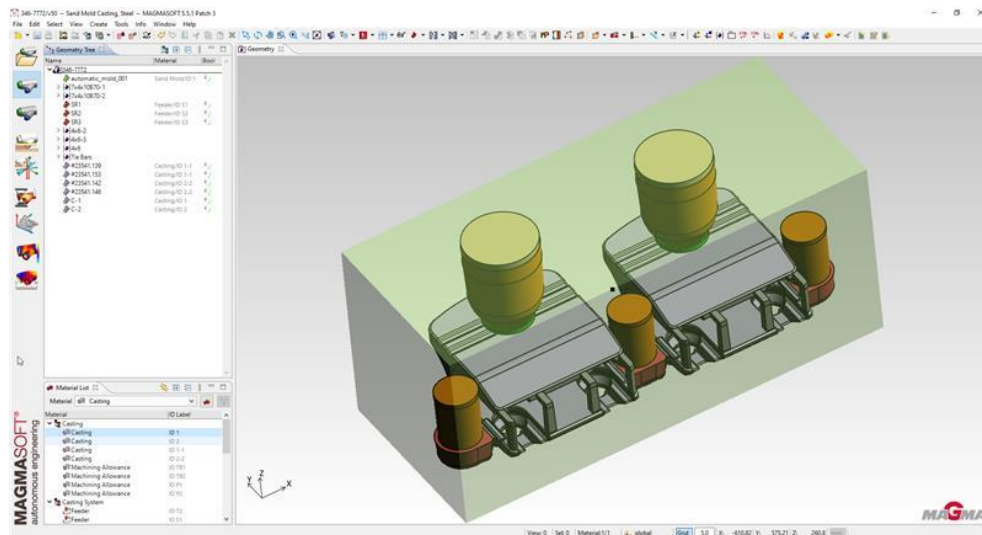


Figura 16: Perspectiva de geometría del software MAGMASoft con el diseño de alimentadores y camisas.

Material	Mat ID	Database/FileName	Initial Temperature (°C)	Feeding Effectivity (%)	Steel Composition
Cast Alloy		Global/SS316Mo2.2	1550.0	40.0	Al (Aluminum) 0.0 % C (Carbon) 0.3 % Co (Cobalt) 0.0 % Cr (Chromium) 0.3 % Cu (Copper) 0.0 % Mn (Manganese) 0.8 % Mo (Molybdenum) 0.2 % Ni (Nickel) 0.55 % P (Phosphorus) 0.02 % S (Sulfur) 0.02 % Si (Silicon) 0.25 % Ti (Titanium) 0.0 % V (Vanadium) 0.0 % W (Tungsten) 0.0 %
Sand Mold		MAGMA/CoMBox_alica	30.0		
Sieve		ASK Database/AMERICAS_EI_EXA	30.0		
Breaker Core		MAGMA/CoMBox_alica	30.0		
Hot Topping		ASK Database/EI-ExF20	30.0		

Figura 17: Perspectiva de definición del software MAGMASoft.

3.3.2. SIMULACIÓN DE LLENADO Y SOLIDIFICACION

Se tomó el diseño actual del sistema de colada (Figura 18) y nuevamente se utilizó el paquete de simulación MAGMASoft para ahora simular el llenado y la solidificación de la pieza, con el propósito de evaluar los resultados de “Air Entrapment” (aire atrapado) y “velocity” (velocidad), para determinar la susceptibilidad del sistema en generar inclusiones no metálicas en la pieza, ya sean por re-oxidación (Air Entrapment) o por arrastres de arena (velocity). El simular en conjunto llenado y solidificación modifica los resultados de este último, ya que el perfil de temperatura al momento del inicio de la simulación de solidificación es diferente a cuando se simula la solidificación natural y esto puede cambiar los resultados. Las simulaciones se realizaron con las mismas bases de datos, para los materiales, que las simulaciones de solidificación, se tomó el tiempo de llenado real de 26s y una temperatura inicial de 1570°C.

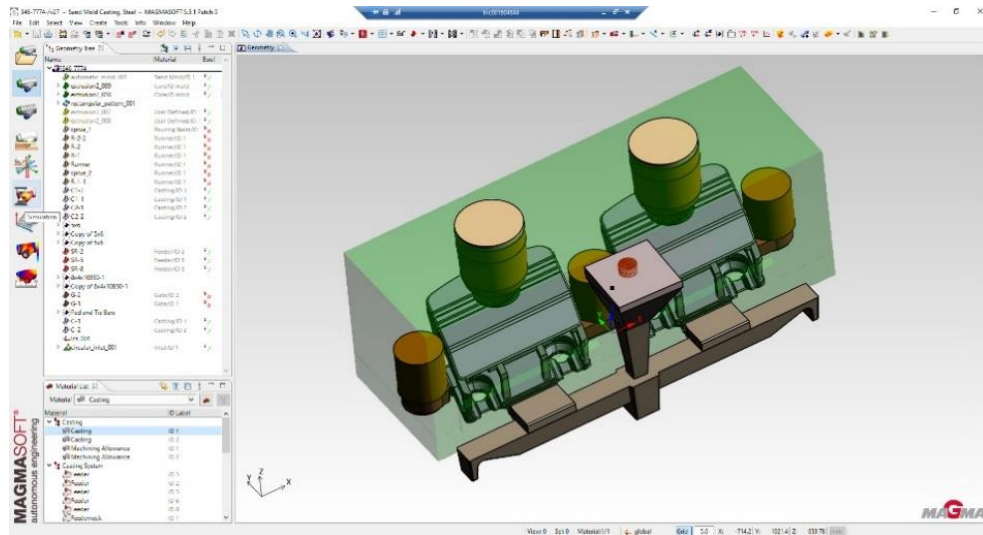


Figura 18: Perspectiva de geometría del software MAGMASoft con diseño del sistema de alimentación y de colada.

3.3.3. SIMULACIÓN DE ESFUERZO DURANTE EL PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN Y ENFRIAMIENTO.

Se tomó en cuenta el historial térmico de los procesos de llenado, solidificación y enfriamiento para el cálculo, mediante el módulo MAGMAstress, de los esfuerzos internos de la pieza y así determinar las áreas susceptibles a grietas durante dichos procesos. Para el tiempo de enfriamiento se determinó la cantidad de 20hr (Figura 19), siendo este el tiempo estándar de permanencia de los moldes vaciado en la zona de enfriamiento antes del proceso de “Shake Out” donde se remueve la mayor parte de la arena del metal.

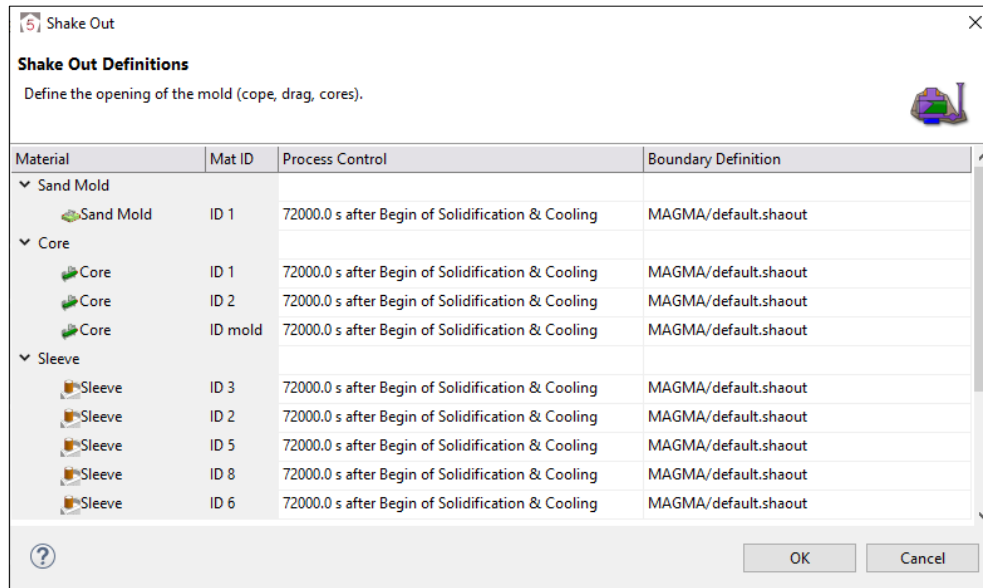


Figura 19: Perspectiva de definición del software MAGMAsoft, parámetros de “Shake Out”.

Para la realización de esta simulación se generó una geometría con el “ID Core” (Figura 18), con una tonalidad verde oscuro, y así calcular los esfuerzos en el molde y corazón que se encuentran en contacto con las piezas y mazarotas, despreciando el resto del molde, para disminuir el tiempo de simulación. Para optimizar el tiempo de simulación, solo se tomaron en cuenta las geometrías de los castings, mazarotas y corredores, despreciando las camisas, la copa y el molde (Figura 20).

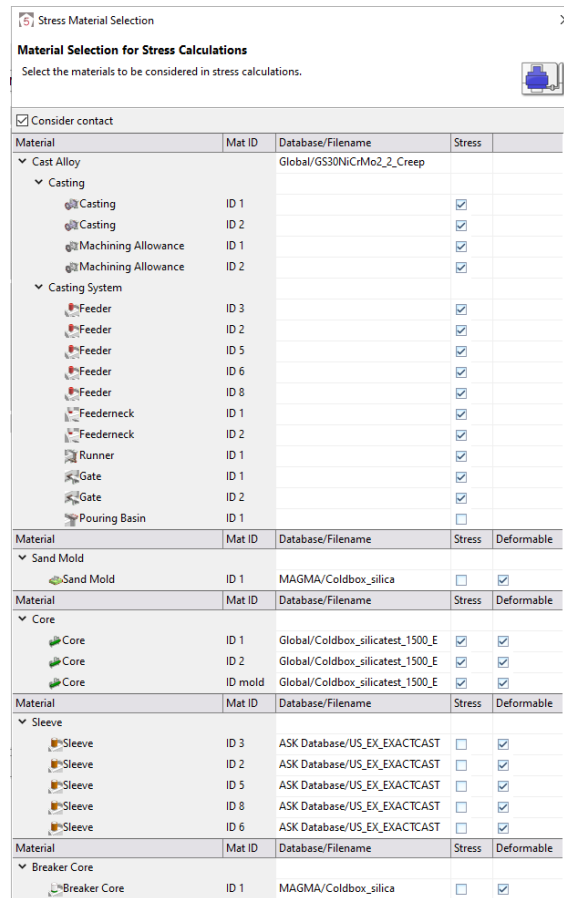



Figura 20: Perspectiva de definición del software MAGMAsoft, materiales seleccionados para el cálculo de esfuerzos.

Se analizó la deformación de las piezas, durante su solidificación y enfriamiento, para obtener una idea general de donde se ubican las zonas sujetas a mayor esfuerzo. Posteriormente se realizó un análisis combinando dos resultados obtenidos en la simulación, se dividió el esfuerzo máximo principal (Maximum Principal Stress) entre la resistencia a la tensión inicial (Initial Tensile Strength) durante la solidificación y enfriamiento del metal en el molde; se entiende que las áreas donde encontremos valores mayores a 1, el esfuerzo máximo supera la resistencia del material en ese punto del proceso y son susceptibles a agrietarse.

3.3.4. SIMULACIÓN DE PROPUESTA.

Se determinó que el modificar el sistema de moldeo para obtener una solidificación direccional mediante la implementación de un “chill” lo más cerca posible del área donde se presenta la grieta (Figura 14). El tamaño de “chill” se definió mediante un diseño de experimentos (DOE) donde se variaron los valores de espesor, longitud y altura; en la Tabla 1 se representan los valores utilizados y esto no dio como resultado resultando en 24 diseños diferentes. También se varió la posición del chill (Figura 21) y se seleccionó el que presento mejores resultados con respecto al criterio de Niyama.

Tabla 1: Perspectiva de optimización del software MAGMAsoft, variables de dimensión del chill.

 Design Variables				
	Design Variable	Lower Limit (mm)	Upper Limit (mm)	Step (mm)
<input checked="" type="checkbox"/>	Geometry Chill_W - Espesor del Chil	20.0	40.0	10.0
<input checked="" type="checkbox"/>	Geometry Chill_L - longitud del Chill	150.0	350.0	50.0
<input checked="" type="checkbox"/>	Geometry Chill_H - Altura del Chill	20.0	40.0	10.0

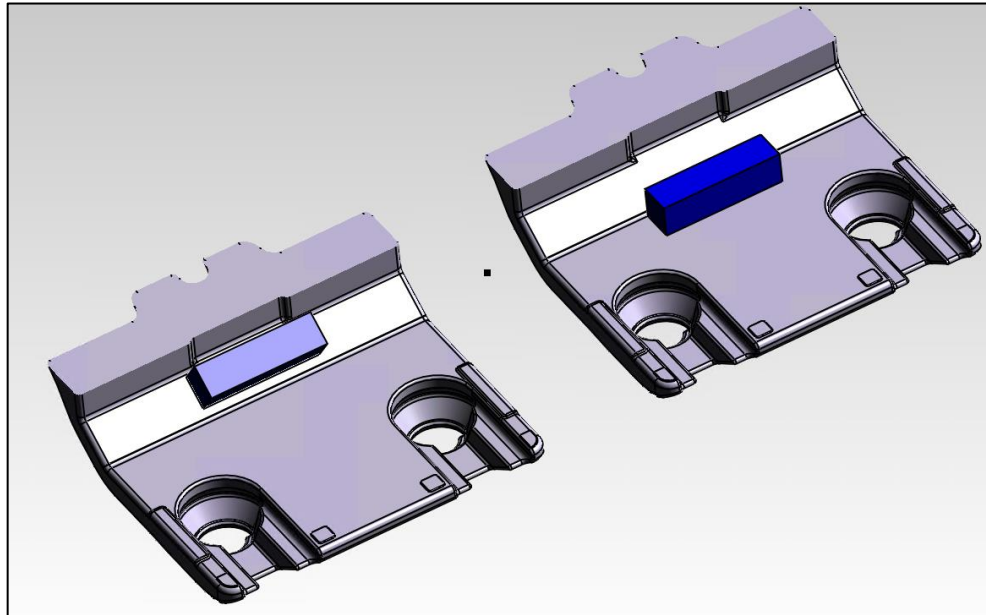


Figura 21: Opciones de posición del chill (color azul), opción A (izq.) y opción B (der.)

Se realizó la simulación de llenado, solidificación, enfriamiento y análisis de esfuerzos de los últimos dos procesos, respetando los mismos parámetros y base de datos que las simulaciones del estado actual con la adición del “chill” el cual se le asignó el material de acero de bajo carbono, con propiedades similares a la aleación vaciada. Los resultados de los diferentes procesos simulados, así como los resultados de esfuerzos durante la solidificación y enfriamiento, fueron analizados para determinar las mejoras con respecto al estado actual.

3.3.5. VALIDACIÓN DE NUEVA PROPUESTA.

El “chill” fue incorporado a la caja de corazones, que nos forma la parte interna de la pieza, para que este quede en la zona simulada (Figura 22), posteriormente se recubrió con pintura cerámica, lo cual es parte del proceso normal en el área de corazones, que nos ayudaría a prevenir erosión del área y

a formar una barrera que evitara que haya difusión entre el acero vaciado y el chill y así facilitar su remoción.

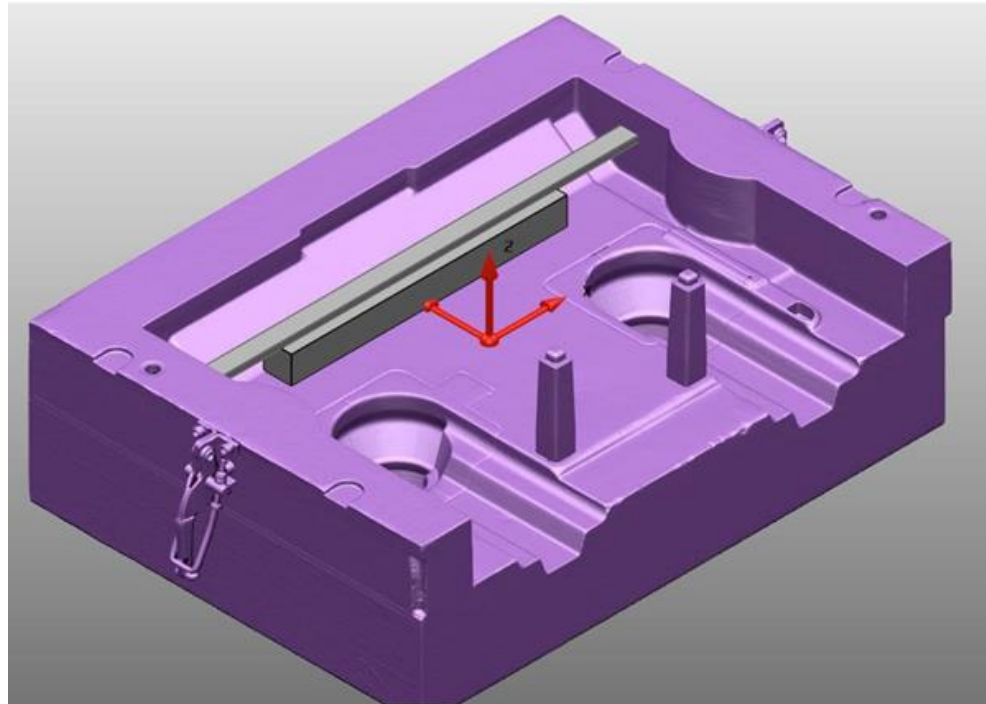


Figura 22: Digitalización de caja de corazones con el diseño del chill.

Los corazones fabricados con “Chill” fueron ensamblados en los moldes de la pieza 7772 y fueron vaciados con la aleación 1E-1076, en total fueron 30 piezas / 15 moldes, los que se produjeron. Todas las piezas pasaron por los siguientes procesos; vaciado, solidificación, enfriamiento, “Shake Out”, martillo de impacto (remoción de sistema de colada), normalizado, limpieza y acabado, al finalizar todas las piezas fueron revisadas por partículas magnéticas, para detectar la presencia de grietas en la zona radio del área critica interés y los resultados fueron reportados en porcentaje de piezas rechazadas por grietas en zona radio.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. DEFINICIÓN DEL DEFECTO

4.1.1. FALLA EN CAMPO

Al limpiar la superficie de la fractura se identificaron dos zonas, una de una tonalidad clara y otra más oscura (Figura 23) esto nos indica que la zona oscura se fracturo primero y la pieza se mantenida unida por la parte clara hasta su fractura final.

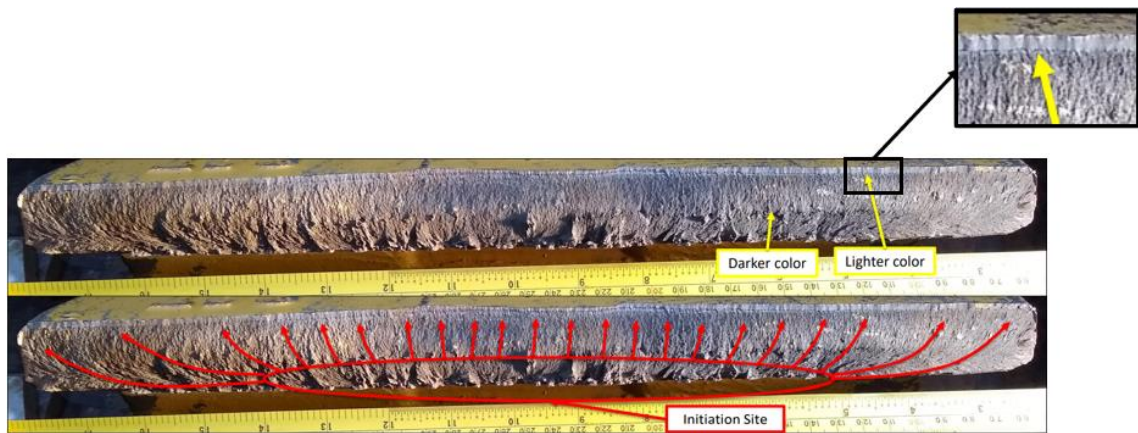


Figura 23: Superficie de la fractura, las diferentes coloraciones y donde inicio la falla.

Se encontró pintura en la superficie de la fractura lo que nos sugiere que la falla había iniciado desde antes de que la pieza fuera pintada (Figura 24).

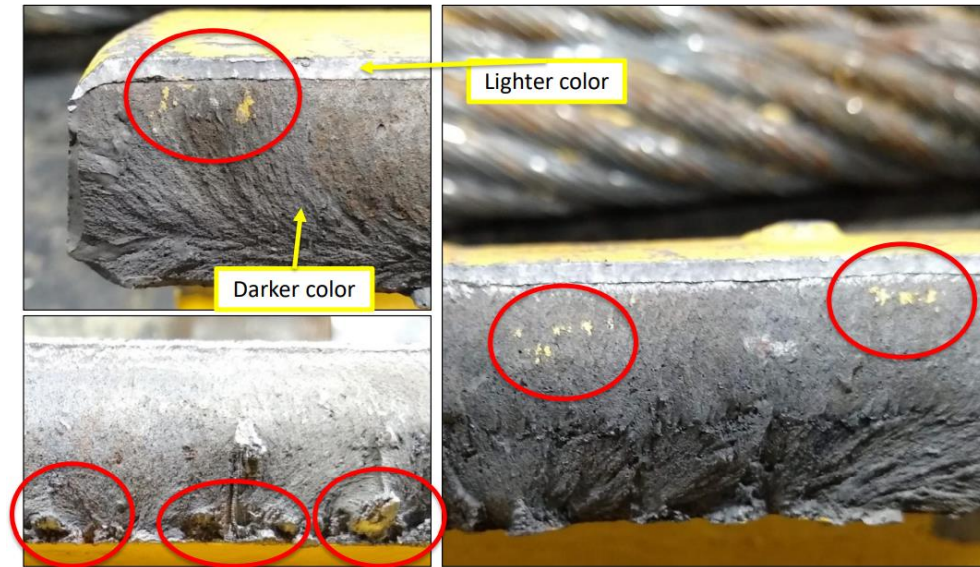


Figura 24: Superficie de la fractura y las zonas donde podemos ver que la pintura de la pieza entro a la grieta antes de que esta fracturara por completo.

Las micrografías, tomadas de la zona donde inicio la fractura (Figura 25), muestran una estructura martensítica con segregación de aleación y algo de porosidad por contracción. En el centro de la pieza también se encontraron poros generados por la contracción durante la solidificación del metal. Se encontraron microgrietas en la zona de iniciación de la fractura, las cuales pudieron contribuir a la fractura de la pieza.

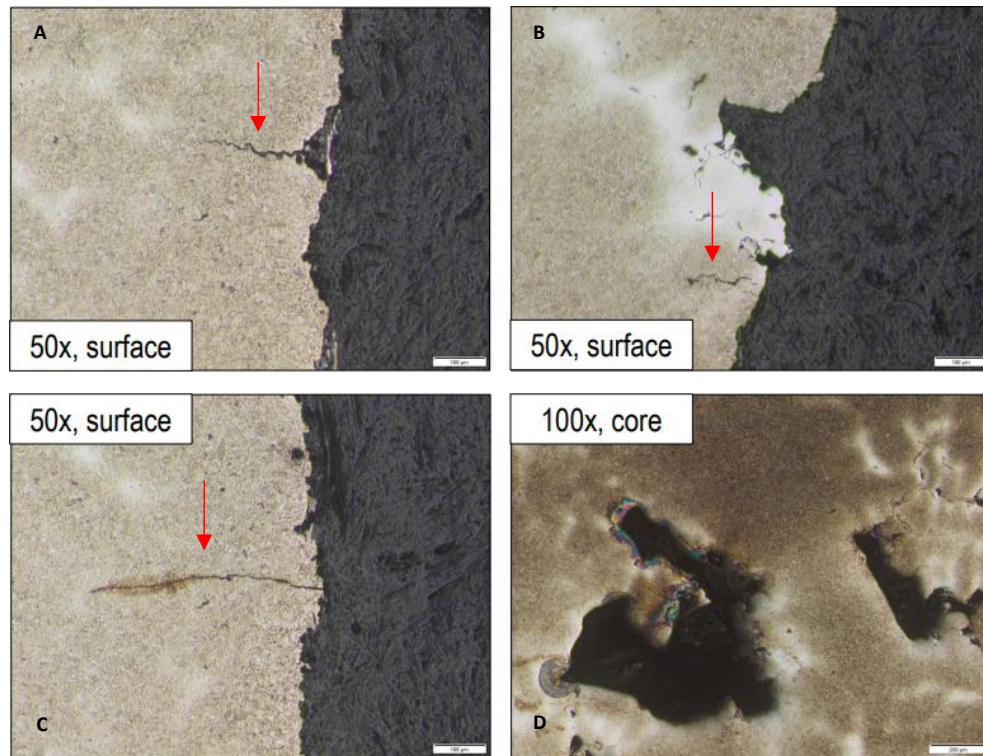


Figura 25: Micrografías, atacadas con 3% Nital. A, B y C muestran superficie de la fractura a 50X, donde se aprecian microgrietas conectadas a la superficie. D fue tomada en el centro de la pieza a 100X, se muestran porosidades relacionadas a defectos de solidificación.

Los resultados de las pruebas mecánicas, realizadas en la zona X-X (Figura 26), fueron de 2.85 a 2.92 mm de diámetro de indentación de dureza Brinell en la superficie del material, siendo la especificación de 2.7 a 3.0 mm de diámetro de indentación o de 415 a 515 de dureza Brinell, y de 2.84 a 3.04 mm de diámetro a 67 mm de profundidad, siendo la especificación de un diámetro máximo de 3.1 mm para la dureza del centro de la pieza (Figura 27); estos resultados sugieren que el tratamiento térmico de la pieza fue el adecuado.

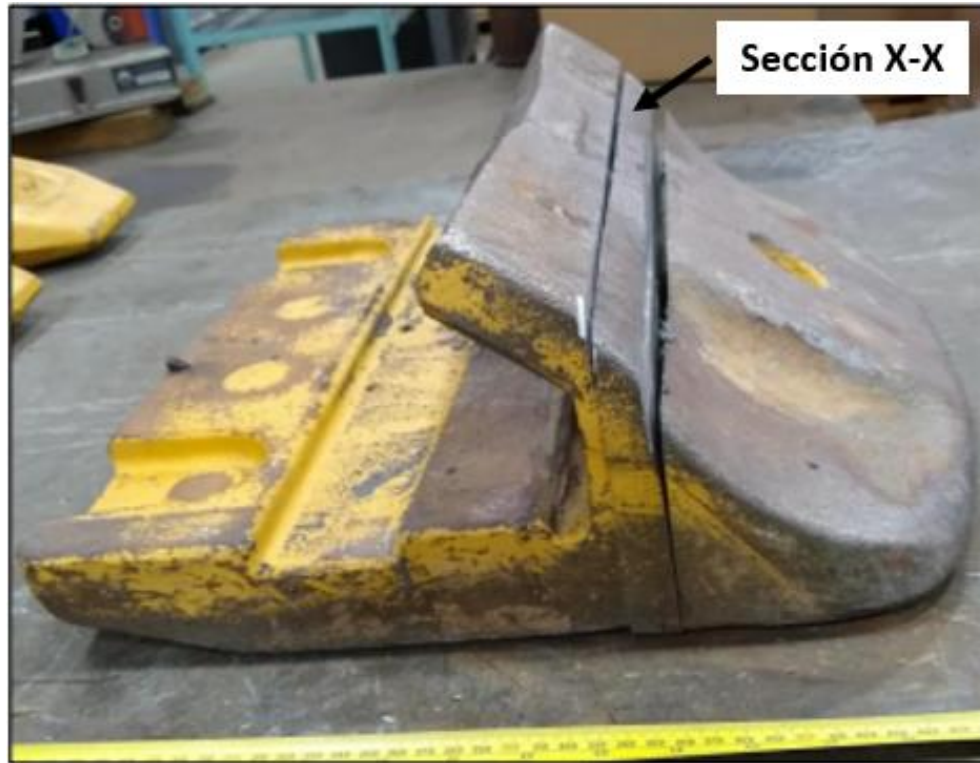


Figura 26: Corte realizados para análisis de dureza.

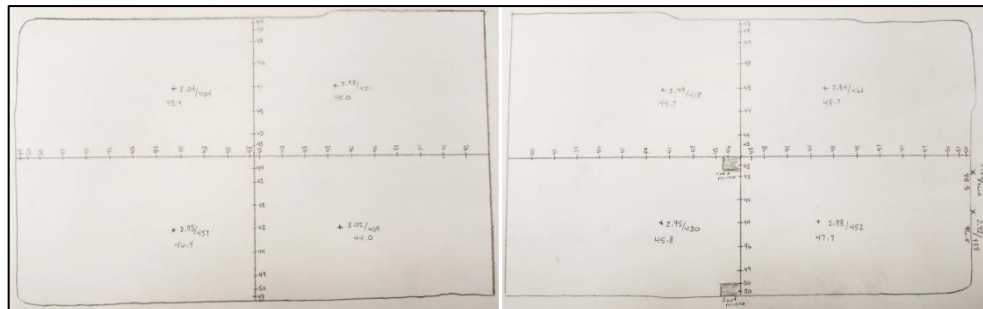


Figura 27: Mapeo de durezas Brinell, realizadas en la sección X-X.

Los resultados del análisis químico nos muestran que la pieza se encontraba dentro de la especificación de la aleación 1E-1076, especificación interna de Caterpillar. Al no presentar elementos que no se encuentren dentro de la especificación, descartando que sea un problema de la composición química.

4.1.2. FALLA DURANTE PRODUCCIÓN.

Por medio de partículas magnéticas, realizado después del proceso de tratamiento térmico, se encontró una grieta en la zona donde se presentó la fractura de la pieza analizada anteriormente (Figura 28).

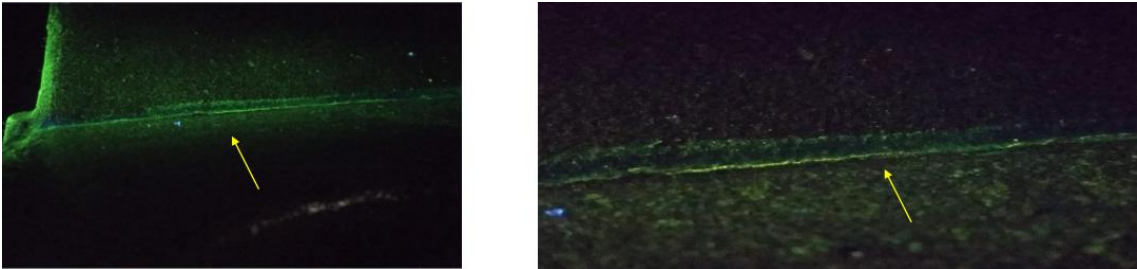


Figura 28: Fotografía de grieta en radio, tomada en la cabina de inspección por partículas magnéticas en la planta Caterpillar Ramos Arizpe.

Las metalografías realizadas a la sección transversal a la grieta, Figura 29, mostraron que la pieza contaba con una estructura martensítica con segregaciones de aleación y en el área rodeando la superficie de la grieta vemos descarburación, lo que es un claro indicador de que la grieta estaba presente antes del tratamiento térmico; por lo que este proceso se descarta como causante de las grietas. Entonces estas grietas se forman durante el proceso de solidificación, ya que presentan una morfología dendrítica observándose brazos secundarios a través de la discontinuidad.

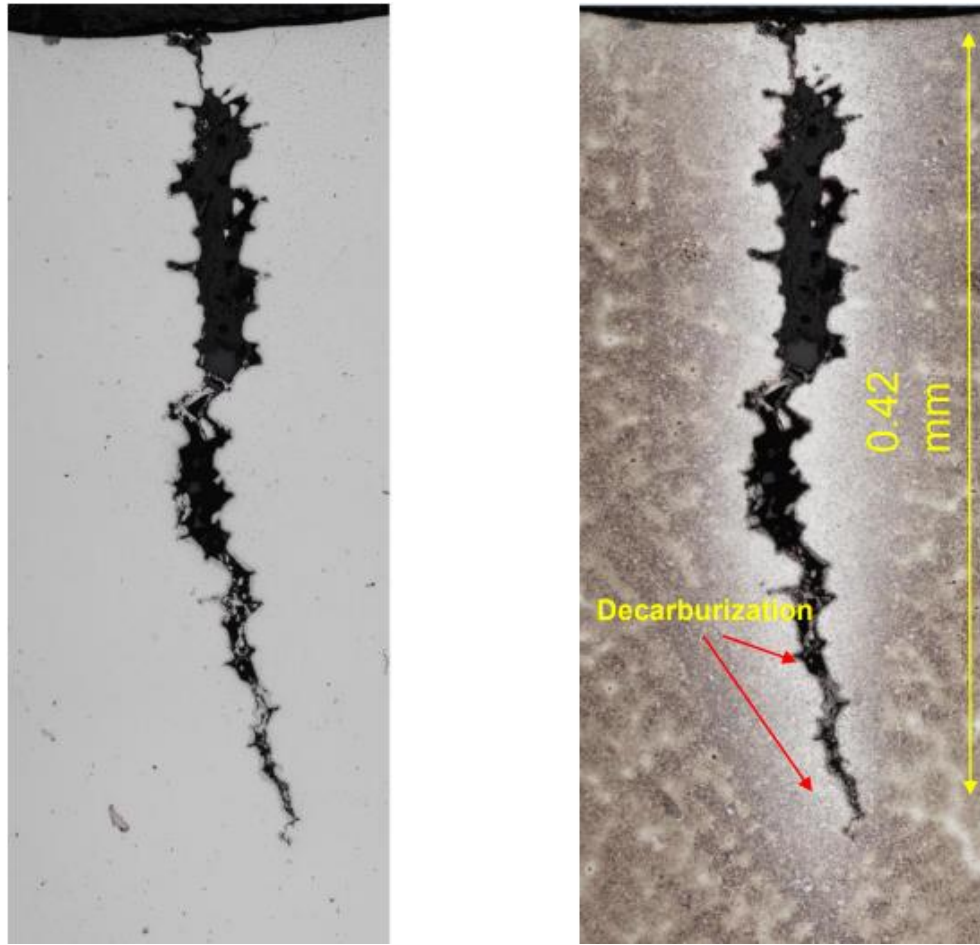


Figura 29: Micrografías a 20X, antes de atacar (izq.) y micrografía después de ser atacada con 3% Nital (der.).

A 100X y 500X, en la superficie (Figura 30A), encontramos la presencia de óxidos dentro de la grieta. En el centro de la grieta (Figura 30B), a las mismas magnificaciones, encontramos nuevamente óxidos y ramas intergranulares en dirección a la grieta. Observaciones similares, fueron hechas en la parte final de la grieta (Figura 30C).

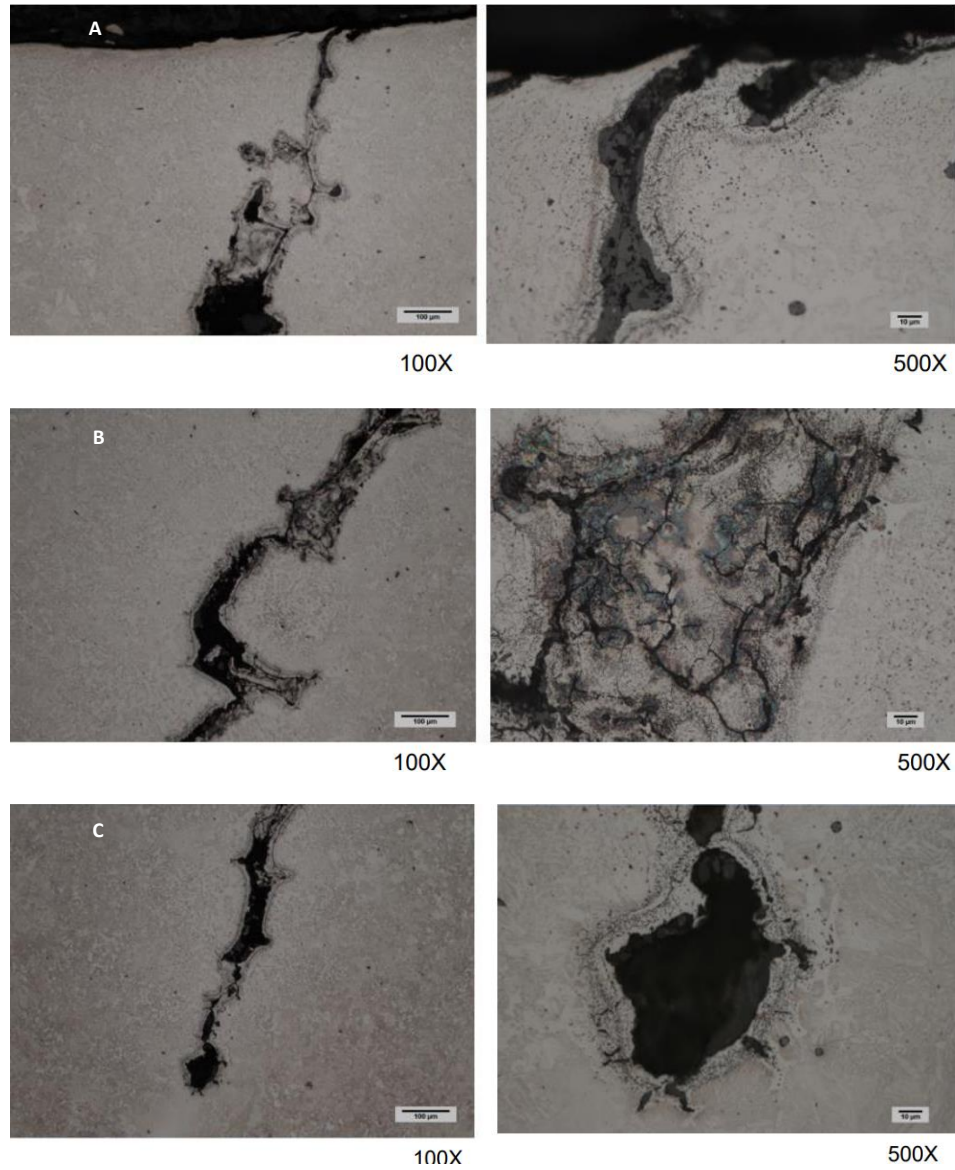


Figura 30: (A) Micrografías a 100X y 500X de la superficie donde inicia la grieta, (B) micrografías a 100X y 500X al centro de la grieta y (C) micrografías a 100X y 500X al final de la grieta.

Estas observaciones nos indican que la presencia de impurezas y un mal perfil de solidificación, son las principales causas de la formación de la grieta durante el proceso de solidificación.

4.2. SIMULACIÓN DEL ESTADO ACTUAL

4.2.1. SOLIDIFICACIÓN NATURAL DE LA PIEZA

El resultado de “hot spot” nos muestra los puntos calientes, que son las últimas áreas en solidificar y donde los defectos de solidificación son más susceptibles a aparecer. En la Figura 31 vemos de color naranja el punto caliente que nos indica la última zona en solidificar y donde la mazarota principal debe de ser colocada; sin embargo, vemos en coloración azul varios puntos calientes que se forman cerca del área donde las grietas se están formando, dejando esta zona en riesgo de generar defectos internos desde el diseño de la pieza.

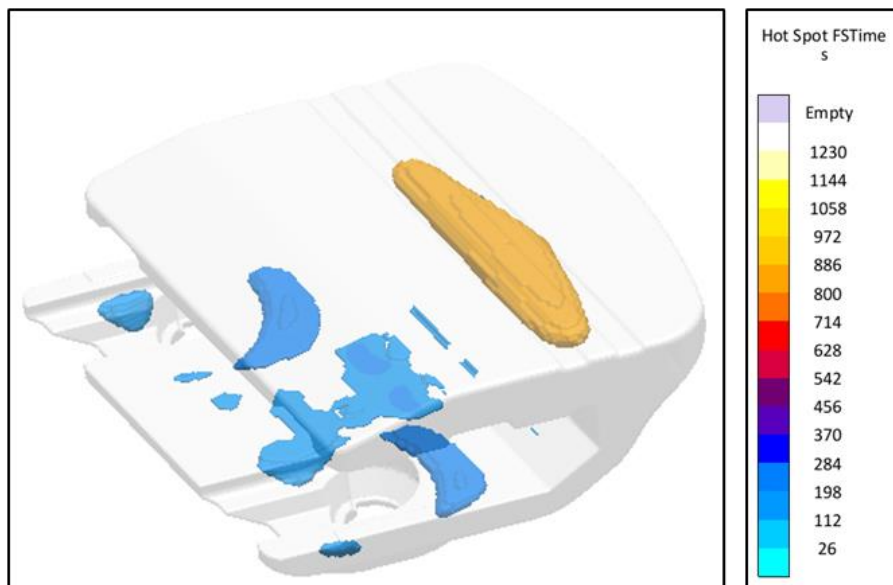


Figura 31: Resultado de puntos calientes de la simulación de la solidificación natural de la pieza.

Con soporte del proveedor del software de simulación, se determinó que para los resultados del criterio de Niyama el valor crítico sería de 0.3, por lo que todas las áreas que presentan valores menores a 0.3 son susceptibles a generar microporosidad. Se filtraron todos los valores superiores a 0.3 en la Figura 32, y

las áreas con mayor susceptibilidad a formar microporosidad es la zona del radio donde las grietas se están presentando, la vis.



Figura 32: Resultado del criterio de Niyama de la simulación de la solidificación natural de la pieza, mostrando la vista A-A.

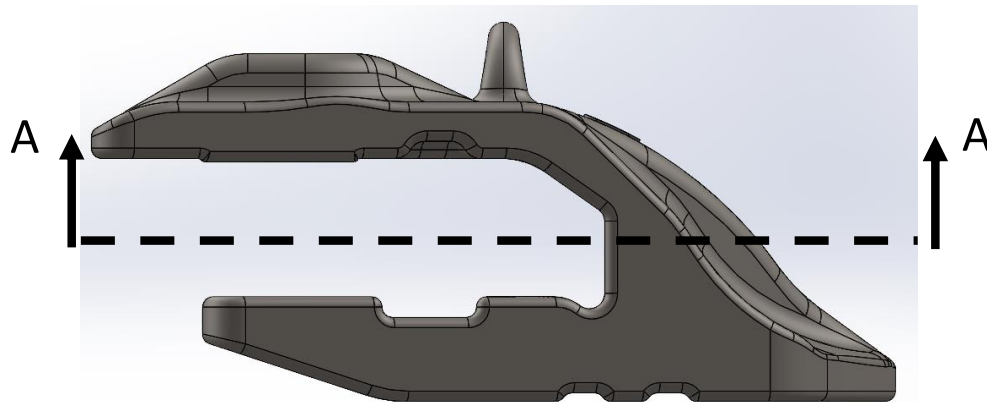


Figura 33: Vista A-A.

4.2.2. SOLIDIFICACIÓN NATURAL CON SISTEMA DE ALIMENTACION

Al incluir el diseño actual de las mazarotas vemos su efectividad al alimentar a la pieza, durante la solidificación del metal. La Figura 34 muestra que

la mazarota superior aleja el punto caliente de la pieza, asegurando así que la mazarota solidifique después y los defectos se mantengan en esta; Por otro lado, las mazarotas laterales no logran eliminar los puntos calientes en la pieza, por lo que defectos de solidificación son esperados dentro de la pieza, sin embargo, el volumen de los puntos calientes ha disminuido considerablemente respecto a la condición de solidificación natural.

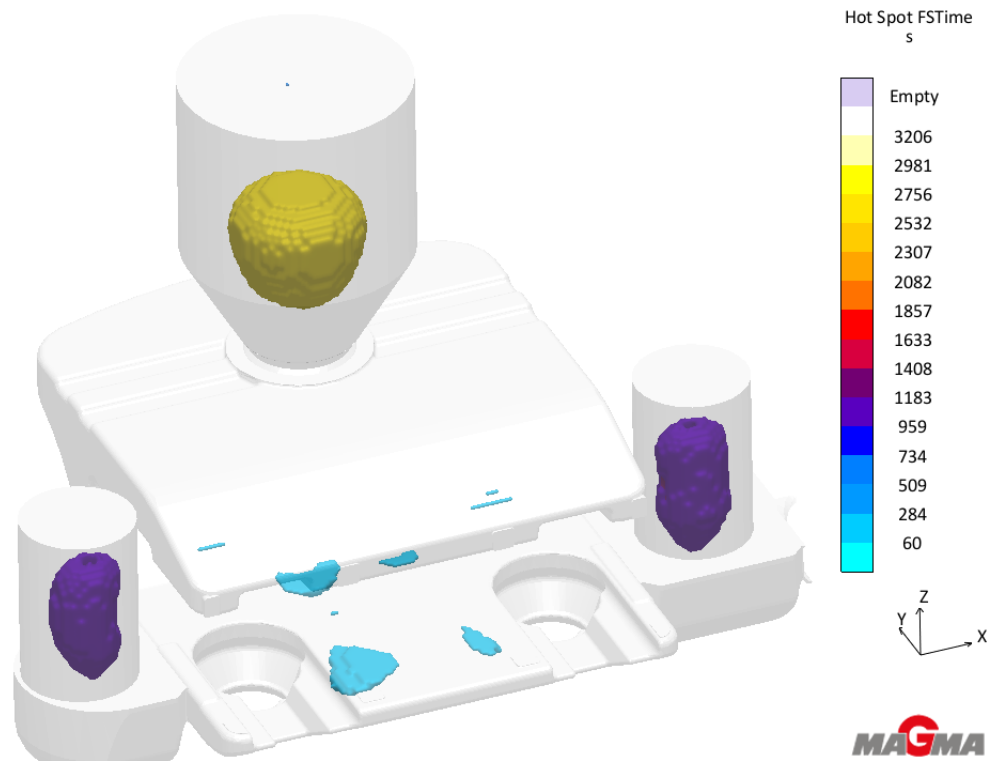


Figura 34: Resultado de puntos calientes de la simulación de la solidificación natural de la pieza con el sistema de alimentación.

Para analizar los resultados del criterio de Niyama se tomó la vista A-A (Figura 33) para enfocar el radio donde las grietas están apareciendo. El sistema de alimentación no presenta alguna mejora en este resultado y persisten las detecciones de valores críticos en la zona del radio (Figura 35).

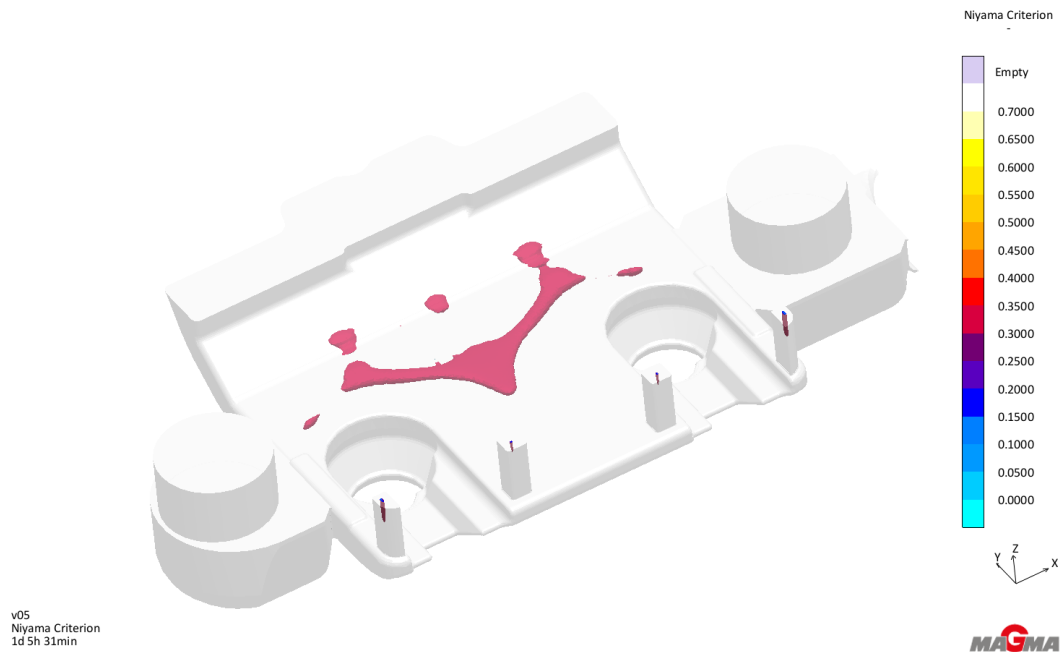


Figura 35: Resultado del criterio de Niyama de la simulación de la solidificación natural de la pieza con el sistema de alimentación, mostrando la vista A-A.

Estos resultados correlacionan con los encontrados durante el análisis de fallas, donde se veía la aparición de porosidad por solidificación conectadas a las grietas. Para corroborar estos resultados se hicieron cortes a una pieza (Figura 36) y se encoraron pequeñas porosidades donde las indicaciones eran más críticas (Figuras 37 y 38).

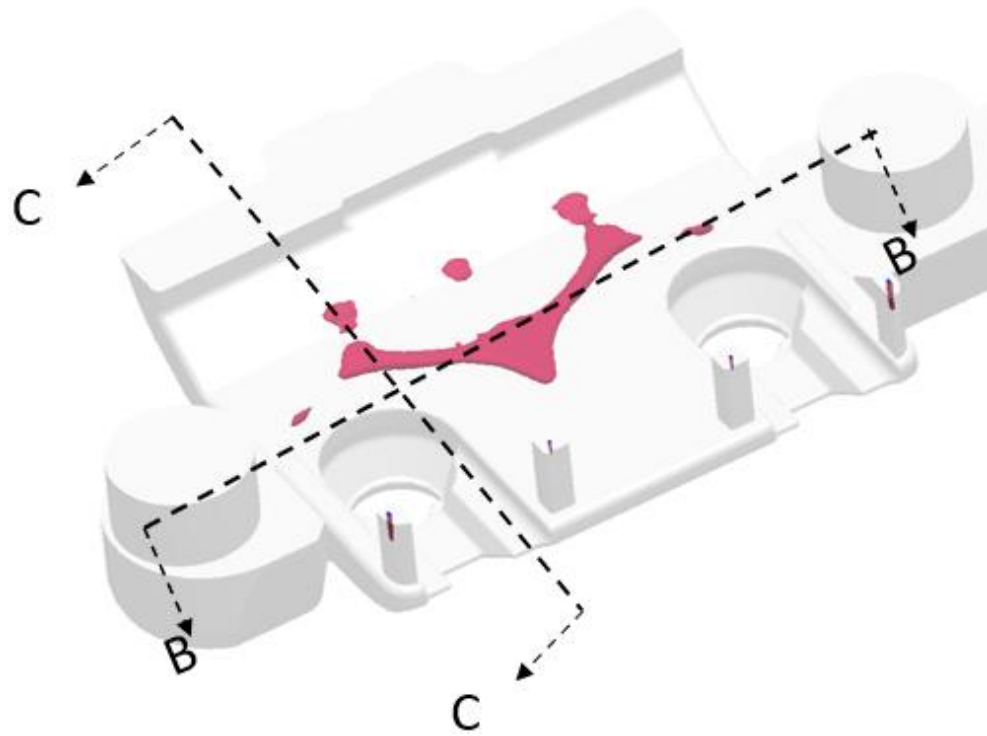


Figura 36: Cortes para vista B-B y C-C.

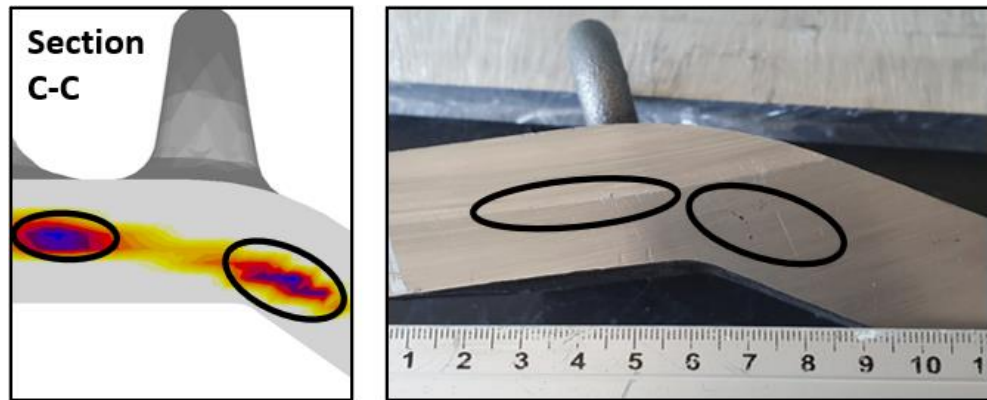


Figura 37: Correlación resultados del criterio de Niyama, comprando simulación (izq.) y corte de pieza física (der.); mostrando la sección C-C.

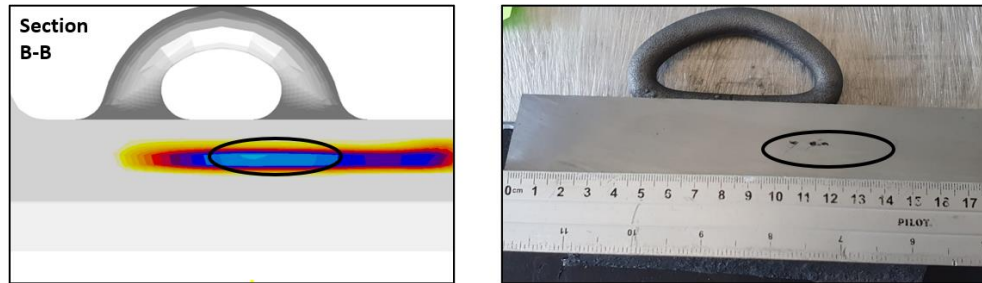


Figura 38: Correlación resultados del criterio de Niyama, comprando simulación (izq.) y corte de pieza física (der.); mostrando la sección B-B.

4.2.3. SIMULACIÓN DE LLENADO

Primero se evaluó el resultado de aire atrapado (“air entrapment”), que nos muestra un estimado del porcentaje de aire que queda en el metal líquido, conforme va llenando el molde. La simulación nos muestra que estamos constantemente atrapando aire (Figura 39), especialmente en las entradas del metal hacia la pieza.

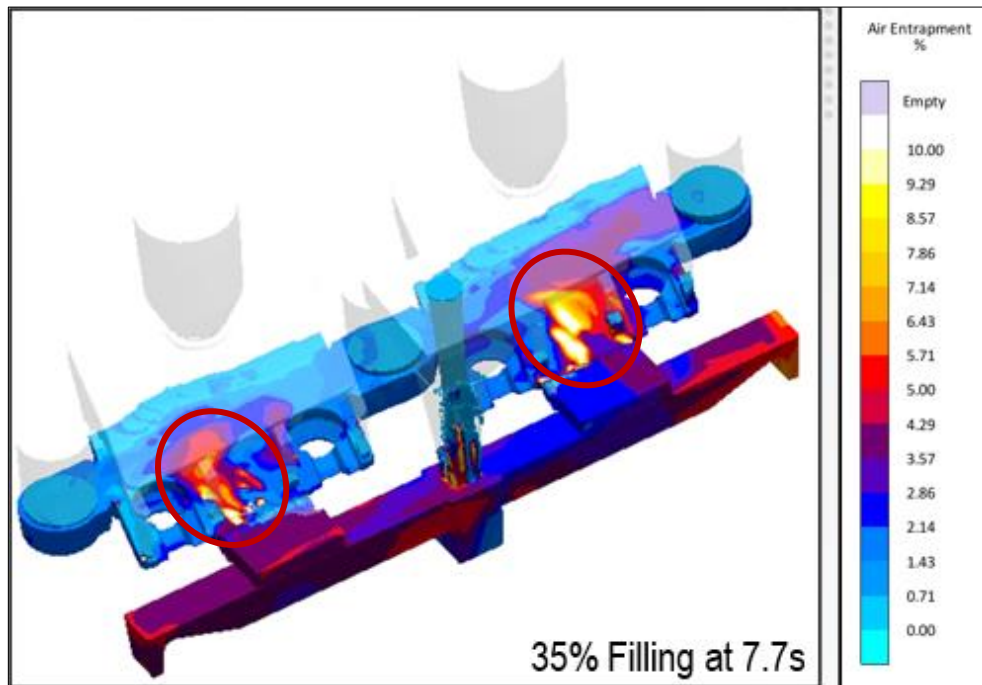


Figura 39: Resultado de aire atrapado durante la simulación del llenado del molde.

El oxígeno del aire puede reaccionar con el metal líquido y formar inclusiones por re-oxidación, lo que explica las inclusiones de óxidos encontradas en las grietas de las piezas analizadas anteriormente.

El resultado de velocidad muestra que el metal no excede el valor de 1 m/s (Figura 6.16) en las entradas de metal, lo que cumple con la recomendación interna de la planta para evitar erosión de la arena.

4.2.4. SIMULACIÓN DE ESFUERZOS

Analizando la misma vista A-A, los resultados de la simulación de esfuerzos mostraron varias zonas donde el esfuerzo máximo supera la resistencia a la tensión, en las últimas etapas de la solidificación, donde la pieza ya solidificó, pero las mazarotas aún siguen estando líquidas. En la Figura 40 vemos en los círculos de color negro, que la zona del radio es una de la que muestra valores de esfuerzo de tensión mayor a la resistencia del material, por lo que presenta un riesgo a grietas.

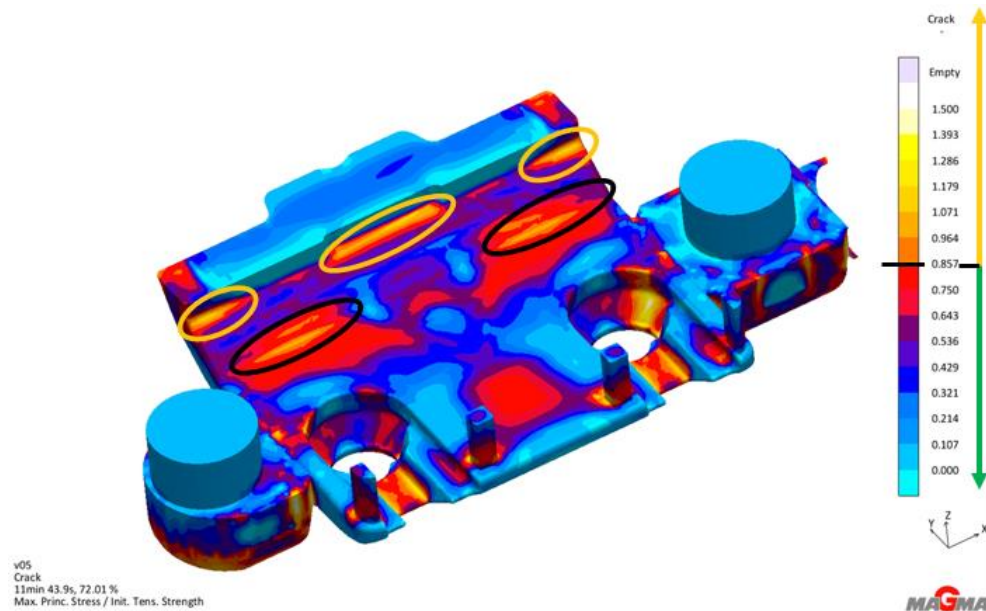


Figura 40: Resultado del criterio de grieta, donde se dividen los esfuerzos máximos entre la resistencia de la pieza durante los procesos de solidificación y enfriamiento.

Los valores encontrados en la zona de la grieta son de entre 1.0 y 1.1, lo que significa que el esfuerzo al que se encuentra esa zona es igual o ligeramente mayor a la resistencia del material; sin embargo, vemos otras zonas con valores superiores a 1.1 y la pieza no presenta grietas en esas zonas, por lo que determinamos que estos esfuerzos sumados a los defectos internos encontrados en esa zona son los principales causantes de la grieta.

4.3. SIMULACIÓN DE PROPUESTA

El diseño de experimentos, para determinar el tamaño y ubicación del chill, resulto en la posición mostrada en la Figura 41 con un tamaño 30x30x300mm.

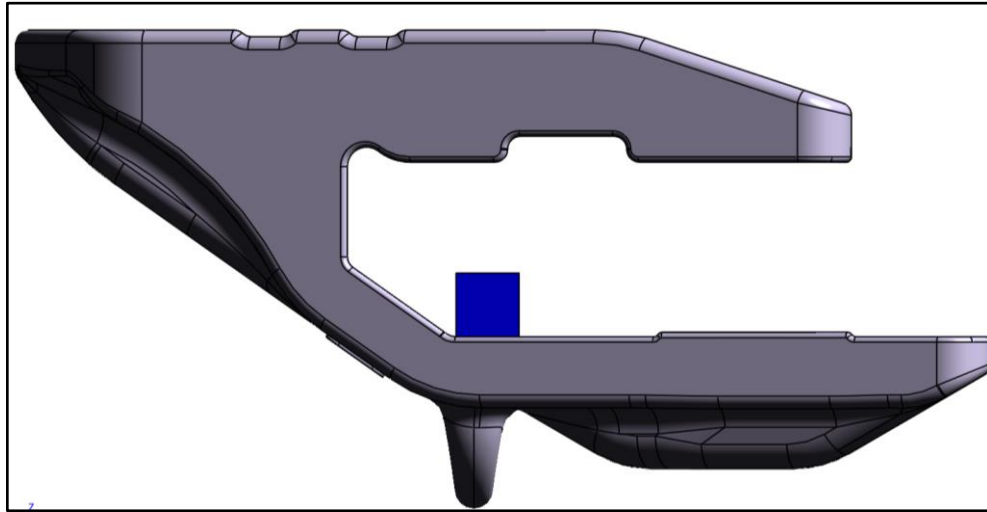


Figura 41: Diseño de chill y ubicación en la pieza.

La selección de este diseño de chill y su posición, fue debido a la mejoría en resultados de solidificación. El criterio de Niyama mostro una buena correlación al momento de detectar porosidades en la sección donde se presenta la falla, por lo que se buscó el diseño que mostrara la mejor reducción de valores críticos. La Figura 42 muestra la comparativa entre la condición actual y la propuesta; vemos una reducción significativa en el volumen de valores críticos de Niyama (menor que 0.3) en la zona critica de la pieza, lo que disminuye considerablemente la susceptibilidad de la pieza de presentar porosidad.

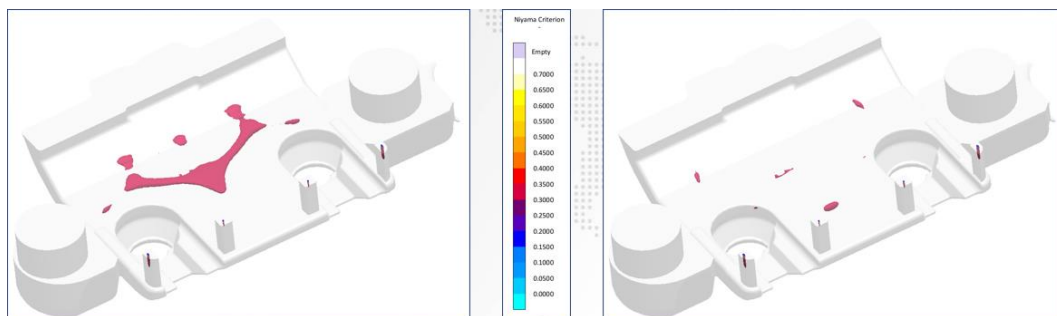


Figura 42: Comparativa de resultados del criterio de Niyama, de la condición actual (izq.) contra la propuesta con el chill (der.).

El análisis de simulación de esfuerzos, comparando los resultados de la condición actual y la propuesta, nos muestran que el efecto del chill ayuda a disminuir la susceptibilidad a grieta en la parte central del área crítica (Figura 43); sin embargo, aun encontramos valores ligeramente mayores a 1.

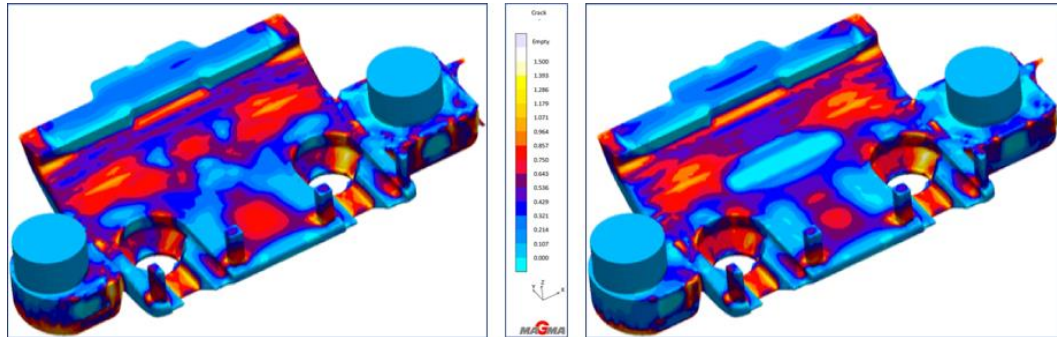


Figura 43: Comparativa de resultados del criterio de grieta, de la condición actual (izq.) contra la propuesta con el chill (der.).

4.4. VALIDACIÓN EN PLANTA

Se fabricaron los corazones (Figura 45) con el chill propuesto y se realizó la prueba de 15 moldes, resultando en dos coladas de la aleación 1E-1076 donde no se buscó variar ningún parámetro del proceso, fuera de la adición del chill en el corazón.

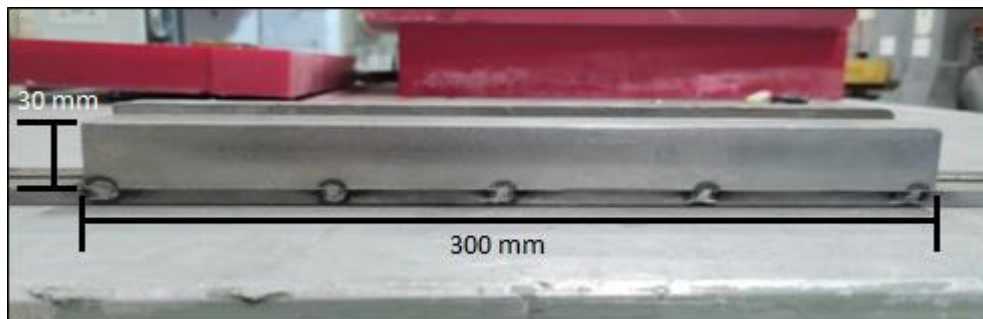


Figura 44: Chill de acero 1020 de 30x30x300mm adecuado para montaje en la caja de corazones.



Figura 45: Corazon fabricado con chill.



Figura 46: Corazón fabricado con chill, pintado con refuerzo base cromita.

Los moldes fueron vaciados y pasaron por los procesos de solidificación, enfriamiento, desmoldeo, después se le removieron el sistema de colada y alimentación, para pasar al proceso de normalizado y limpieza, donde las 30 piezas fueron inspeccionadas por partículas magnéticas y se detectaron 0 piezas con grieta en el radio, dando un 0% de rechazo, por lo que se prosigue con una orden productiva de 220 piezas (110 moldes).

Los reportes de producción, al momento de liberar el cambio, dieron un 0.91% de rechazo por grieta en el radio y un 3.0% de retrabajo; donde la grieta se presentó en el radio, pero en la parte externa de la pieza, esta pudo ser reparada con soldadura.

CONCLUSIONES

- Mediante el análisis de fallas se pudo determinar que las principales causas del defecto eran la presencia de porosidad y de óxidos en la zona del radio.
- Los resultados de las simulaciones de solidificación, mediante el perfil de solidificación y el criterio de Niyama, mostraron que la porosidad era causada por el diseño de la pieza y se obtuvo además una buena correlación con los resultados reales.
- La simulación de llenado mostró atrapamiento de aire, durante este proceso, lo que fomenta la formación de óxidos en el metal.
- Los resultados de la simulación de esfuerzos mostraron que la relación del esfuerzo máximo entre la resistencia a la tensión fue entre 1.0 a 1.1, en la zona del radio; sin embargo, se detectaron zonas en la pieza con valores mayores y sin que presenten agrietamiento, por lo que la presencia de porosidad debilitaba considerablemente la zona del radio, causando la grieta.
- Basados en la modificación al diseño y la utilización del chill, cerca de la zona del radio, modifiqué el perfil de solidificación y los resultados del criterio de Niyama, obtenidos de la simulación de la propuesta, mostraron una reducción significativa de valores críticos y nos mostraba que la pieza estaría libre de defectos de porosidad en esta zona.
- Las validaciones en planta mostraron una gran mejoría al pasar de un 21% de rechazo por grietas en el radio al 1%.

REFERENCIAS

- [1] «Caterpillar.com,» [En línea]. Available: <https://www.caterpillar.com/en/company.html>.
- [2] «<https://psld.cat.com>,» [En línea]. Available: <https://psld.cat.com/en/for-employees/psld-communications/archive/division-news/psld-facility-spotlight---cra.html>.
- [3] B. T., de *Solidification Modeling Reduces Casting Defects, Modern Casting*, March 1991.
- [4] H. P. C. a. d. o. s. castings, de *Computer aided design of steel castings*.
- [5] v. 1. n. e. 3. Berry J.T. & Pehlke R.D. Modeling of Solidification Heat Transfer. Metals Handbook, de *Modeling of Solidification Heat Transfer. Metals Handbook, volume 15, ninth edition*.
- [6] S. L. & Y.-D. S. Lewis R.L., «Literature Review of Solidification Simulations in the Design of Sand Castings,» *Steel Founder's Research Journal*, nº 17.
- [7] s.-i. o. t. a. Shiro kobayashi, *Metal Forming and the Finite-element Method*, Oxford University, 1989.
- [8] H. W. S. R.A., *Modeling of Fluid Flow. Metals Handbook, volume 15, ninth edition*.
- [9] T. U. M. M. a. S. S. E. Niyama, de *AFS Cast Met. Res. J.*, vol. 7, 1982, p. 52–63.
- [10] K. D. C. a. C. Beckermann, «Development of Thermophysical Property Datasets, Benchmark Niyama Results, and A Simulation Qualification Procedure,» *64th SFSA Technical and Operating Conference*, 2010.

- [11] S. O. R. H. a. C. B. K.D. Carlson, «Development of New Feeding Distance Rules Using Casting Simulation: Part I. Methodology,» de *Metall. Mater. Trans. B*, 2002, pp. 731-740.
- [12] K. C. a. C. B. S. Ou, «Feeding and Riserling of High Alloy Steel Castings,» de *Metall. Mater. Trans. B*, 2005, pp. 97-116.
- [13] S. O. a. C. B. K.D. Carlson, «Feeding of High-Nickel Alloy Castings,» de *Metall. Mater. Trans. B*, 2005, p. 843–856.
- [14] S. O. R. H. a. C. B. K. Carlson, «Development of a Methodology to Predict and Prevent Leakers Caused by Microporosity in Steel Castings,» de *55th SFSA Technical and Operating Conference*, Chicago, IL, 2001.
- [15] K. C. a. C. Beckermann, «Use of the Niyama Criterion to Predict Shrinkage Related Leaks in High-Nickel Steel and Nickel-Based Alloy Castings,» de *62nd SFSA Technical and Operating Conference*, Chicago, IL, 2008.
- [16] «www.magmasoft.com,» [En línea]. Available:
<https://www.magmasoft.com/en/solutions/magmasoft/>.
- [17] American National Standards Institute, «Nondestructive Examination Methods,» de *Guide for the Nondestructive Examination of Welds*, 2016, pp. 16-35.
- [18] Steel Founders' Society of America, «Calculation of feeding distance,» de *Feeding & Riserling Guidelines for Steel Castings*, 2001.

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Cucharon marca Caterpillar ensamblado con CAT GETs advancys.</i>	9
<i>Figura 2: GET Protector.</i>	10
<i>Figura 3: Esquema que muestra la correlación cualitativa entre el criterio de Niyama y la porosidad de contracción.</i>	19
<i>Figura 4: Comparación de las radiografías de ambas placas CN3MN (las indicaciones de contracción de la prueba radiográfica (RT) de ASTM se enumeran debajo de cada radiografía) con los contornos del criterio de Niyama simulados en el plano medio de la placa.</i>	21
<i>Figura 5: Ejemplos de resultados de simulaciones realizadas con el software MAGMAsoft.</i>	22
<i>Figura 6: Fuga de campo magnético.</i>	23
<i>Figura 7: Magnetización directa.</i>	24
<i>Figura 8: magnetización indirecta.</i>	25
<i>Figura 9: Diagrama representativo de un "End Chill"</i>	28
<i>Figura 10: Diagrama representativo de un "Drag Chill"</i>	29
<i>Figura 11: Pieza del número de parte 346-7772 que fallo en campo.</i>	30
<i>Figura 12: Dibujo técnico, donde se muestra la zona X-X.</i>	31
<i>Figura 13: Radio donde se presenta la grieta.</i>	31
<i>Figura 14: Pieza detectada durante el proceso, cortada para facilitar su análisis.</i>	32
<i>Figura 15: Perspectiva de geometría del software MAGMAsoft con diseño de la pieza 346-7772.</i>	33
<i>Figura 16: Perspectiva de geometría del software MAGMAsoft con el diseño de alimentadores y camisas.</i>	34
<i>Figura 17: Perspectiva de definición del software MAGMAsoft.</i>	35
<i>Figura 18: Perspectiva de geometría del software MAGMAsoft con diseño del sistema de alimentación y de colada.</i>	36
<i>Figura 19: Perspectiva de definición del software MAGMAsoft, parámetros de "Shake Out".</i>	37

Figura 20: Perspectiva de definición del software MAGMAsoft, materiales seleccionados para el cálculo de esfuerzos. _____ 38

Figura 21: Opciones de posición del chill (color azul), opción A (izq.) y opción B (der.) _____ 40

Figura 22: Digitalización de caja de corazones con el diseño del chill. _____ 41

Figura 23: Superficie de la fractura, las diferentes coloraciones y donde inicio la falla. _____ 42

Figura 24: Superficie de la fractura y las zonas donde podemos ver que la pintura de la pieza entro a la grieta antes de que esta fracturara por completo. _____ 43

Figura 25: Micrografías, atacadas con 3% Nital. A, B y C muestran superficie de la fractura a 50X, donde se aprecian microgrietas conectadas a la superficie. D fue tomada en el centro de la pieza a 100X, se muestran porosidades relacionadas a defectos de solidificación. _____ 44

Figura 26: Corte realizados para análisis de dureza. _____ 45

Figura 27: Mapeo de durezas Brinell, realizadas en la sección X-X. _____ 45

Figura 28: Fotografía de grieta en radio, tomada en la cabina de inspección por partículas magnéticas en la planta Caterpillar Ramos Arizpe. _____ 46

Figura 29: Micrografías a 20X, antes de atacar (izq.) y micrografía después de ser atacada con 3% Nital (der.). _____ 47

Figura 30: (A) Micrografías a 100X y 500X de la superficie donde inicia la grieta, (B) micrografías a 100X y 500X al centro de la grieta y (C) micrografías a 100X y 500X al final de la grieta. _____ 48

Figura 31: Resultado de puntos calientes de la simulación de la solidificación natural de la pieza. _____ 49

Figura 32: Resultado del criterio de Niyama de la simulación de la solidificación natural de la pieza, mostrando la vista A-A. _____ 50

Figura 33: Vista A-A. _____ 50

Figura 34: Resultado de puntos calientes de la simulación de la solidificación natural de la pieza con el sistema de alimentación. _____ 51

Figura 35: Resultado del criterio de Niyama de la simulación de la solidificación natural de la pieza con el sistema de alimentación, mostrando la vista A-A. _____ 52

<i>Figura 36: Cortes para vista B-B y C-C.</i>	53
<i>Figura 37: Correlación resultados del criterio de Niyama, comprando simulación (izq.) y corte de pieza física (der.); mostrando la sección C-C.</i>	53
<i>Figura 38: Correlación resultados del criterio de Niyama, comprando simulación (izq.) y corte de pieza física (der.); mostrando la sección B-B.</i>	54
<i>Figura 39: Resultado de aire atrapado durante la simulación del llenado del molde.</i>	54
<i>Figura 40: Resultado del criterio de grieta, donde se dividen los esfuerzos máximos entre la resistencia de la pieza durante los procesos de solidificación y enfriamiento.</i>	56
<i>Figura 41: Diseño de chill y ubicación en la pieza.</i>	57
<i>Figura 42: Comparativa de resultados del criterio de Niyama, de la condición actual (izq.) contra la propuesta con el chill (der.).</i>	57
<i>Figura 43: Comparativa de resultados del criterio de grieta, de la condición actual (izq.) contra la propuesta con el chill (der.).</i>	58
<i>Figura 44: Chill de acero 1020 de 30x30x300mm adecuado para montaje en la caja de corazones.</i>	58
<i>Figura 45: Corazon fabricado con chill.</i>	59
<i>Figura 46: Corazón fabricado con chill, pintado con refuerzo base cromita.</i>	59

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Perspectiva de optimización del software MAGMAsoft, variables de dimensión del chill.</i>	39
---	----