

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



“AUMENTO DE LA VIDA ÚTIL DE LA MOLDURA PARA VIDRIO PENSADO”

PRESENTA:

ING. TOMÁS GERARDO CAVAZOS SOLIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
Y TECNOLOGÍA CERÁMICA CON ORIENTACIÓN A VIDRIO

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA N.L

OCTUBRE DE 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



“AUMENTO DE LA VIDA ÚTIL DE LA MOLDURA PARA VIDRIO PENSADO”

PRESENTA:

ING. TOMÁS GERARDO CAVAZOS SOLIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
Y TECNOLOGÍA CERÁMICA CON ORIENTACIÓN A VIDRIO

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA N.L

OCTUBRE DE 2014

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Aumento de la vida útil de la moldura para vidrio prensado”, realizada por el alumno TOMÁS GERARDO CAVAZOS SOLIS, con número de matrícula 1334268, sea aceptada para su defensa como opción al grado Maestro en Ciencias y Tecnología Cerámica con Orientación a Vidrio.

El comité de Tesis



Dr. Rafael David Mercado Solis

Asesor y Director de Tesis



Revisor

Dr. Luis Leduc Lezama



Revisor

Dra. Bertha Alicia Vázquez Méndez

Vo. Bo

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N.L Octubre 2014

Dedicatoria

A mis Padres,

Tomás Cavazos y Beatríz Solis

Por darme la vida y apoyarme en cada paso que he dado

A mis Hermanas,

Montserrat y Marysol

Por todos los momentos que hemos compartidos juntos

A Mis Abuelitos.

A Gregorio Solis[†] y Felicitas Segovia

A Tomás Cavazos y Angélica Oviedo.

Agradecimientos.

A **Dios**, gracias por haberme iluminado en cada uno de estos propósitos que me enviaste.

A **Crisa Libbey** junto con la **Universidad Autónoma de Nuevo León** por darme la oportunidad de llegar a esta etapa de mi vida.

A la **Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica** por haberme dado la formación de Ingeniero en Materiales y apoyarme en este proyecto.

Al **Ing. Alejandro Mata Mier** por proporcionarme todo el apoyo y seguridad durante esta etapa.

A mi asesor el **Dr. Rafael Mercado Solis**, a quien le agradezco por compartir su conocimiento, consejos y amistad. ¡Gracias Rafa!

Al **Dr. Luis Leduc**, por los consejos y el apoyo durante este proyecto.

A la **Dra. Bertha Vázquez**, por ser más que atenta y compartir de sus conocimientos.

Al **Ing. Sergio Olvera, Ing. Gustavo Salas, Ignacio Leyva y Juan Rodríguez** por el apoyo durante la experimentación en la Línea 14.

A mi compañero y amigo **M.C. Douglas Quiñones Salinas**, que me apoyo durante este proyecto.

A la **Ing. Paula Villarreal y Lic. Ana Balderas** por todo el apoyo y gestión de este proyecto

A mis compañeros de la Organización Robusta, **Lalo, Polo, Dany, Tavo, Eugenio, Angel** por haber compartido muy buenos momentos durante este tiempo.

A todos los **Maestros de esta Maestría**, que compartieron sus conocimientos y brindaron una manera objetiva de apreciar las cosas.

A **toda mi familia** y aquellas personas que no menciono pero forman parte de mi vida.

Índice.

Resumen.....	1
Capítulo I. Introducción.....	2
1.2 Generalidades.....	4
1.2.1 El vidrio.....	4
1.2.2. El Molde.....	5
1.2.3. Mantenimiento del molde.....	9
1.2.4. Proceso de prensado de vidrio.....	12
1.2.5. Pre calentamiento de moldes.....	14
Capitulo II. Antecedentes.....	15
Capitulo III. Hipótesis y Objetivos.....	18
3.1 Hipótesis.....	18
3.2. Objetivo general.....	18
3.3 Objetivos específicos.....	18
3.4. Metas.....	18
Capítulo IV. Metodología experimental.....	19
4.1. Introducción.....	19
4.2. Prueba en la línea de producción.....	19
4.3 Análisis de composición química.....	22
4.4 Análisis visual de superficie y grietas en moldes.....	23
4.5. Medición de profundidad de grieta.....	24
4.6. Preparación metalográficas.....	25
4.7. Análisis microestructural.....	26
4.8. Ensayos de microdureza Vickers.....	27
4.9. Análisis de crecimiento de grieta.....	28
Capítulo V. Resultados y Discusiones.....	30
5.1. Resumen.....	30
5.2 Medición de temperatura de superficie de moldes.....	30
5.3 Análisis de composición química de moldes.....	33
5.4 Análisis visual de superficie y grietas de moldes.....	34
5.5 Medición de profundidad de grieta.....	38

5.6 Análisis microestructural de moldes.....	40
5.7 Análisis de Microdurezas.	46
5.8 Evolución de grietas.....	47
Capítulo VI. Conclusiones.....	49
Recomendaciones futuras.	51
Referencias bibliográficas.....	52
Lista de figuras	54
Lista de Tablas	56
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	57



Resumen.

Se estudiaron moldes de acero 431 y 17-4PH utilizados para el prensado de vidrio que estuvieron expuesto en condiciones reales de operación acumulando diferentes características y daño por agrietamiento. Se analizaron las grietas presentes en la superficie con estereoscopia y al interior del molde por medio de microscopia electrónica de barrido, la microestructura se obtuvo a través de microscopia óptica de luz reflejada, se recolectaron vasos y se analizó la tasa de crecimiento de grietas, se realizaron ensayos de microdureza Vickers para comprender un perfil de dureza en cuatro zonas de la pared del molde. Mediante las diferentes técnicas experimentales, se logró identificar cual es el factor principal que se atribuye a la falla de estas herramientas, así también se reconoce en qué etapa del proceso de prensado el agrietamiento tiene mayor impacto provocando la formación, el avance y crecimiento de las grietas. Se calcularon los esfuerzos térmicos inducidos en los moldes durante la producción estable. Se relacionó el daño de los moldes con la presencia de fases no deseadas y las malas prácticas en la industria vidriera las cuales repercuten negativamente en la vida útil de los moldes.

Capítulo I. Introducción.

En los últimos años la generación de conocimiento por medio de la investigación científica en la industria de vidrio ha tenido un incremento importante, la cual está enfocada en la mejora, innovación y desarrollo de nuevas técnicas de trabajo para facilitar la producción, aumentar eficiencias, reducir pérdidas y tiempos a corto plazo para ser una empresa socialmente responsable.

La industria vidriera cuenta con una variedad de procesos de formado y manufactura, uno de ellos es el prensado de artículos de vidrio, su naturaleza requiere altas temperaturas que a lo largo del tiempo ha hecho enfrentarse a problemas de gran importancia que afecta principalmente al molde; agrietándolo y disminuyendo la tolerancia al estar expuestos al proceso generando fallas, este problema a su vez repercute directamente en la calidad de los productos que se conforman provocando grandes pérdidas en la producción e impactando a otras áreas ligadas fuertemente al proceso lo que constituye un fuerte eslabón en la manufactura de los artículos.

En el ciclo de prensado intervienen diferentes variables para formar la pieza de vidrio, entre los factores más importantes que generan el acabado son: la temperatura del vidrio, el enfriamiento, la textura de la superficie del molde etc.

Actualmente en la industria vidriera de la localidad se conocen casos particulares como por ejemplo algunas molduras no llegan a la cantidad de piezas estimadas, y que otras pueden prolongarse más allá de lo estimado, sin embargo los proveedores siguen enviando molduras con las especificaciones requeridas por la empresa pero presentando en algunos casos un agrietamiento prematuro de los moldes.

El molde se ve afectado por distintos factores los cuales no se sabe cuál es la etapa del proceso que es el precursor del agrietamiento en los equipos; por lo que pueden considerarse factores como el tiempo de precalentamiento del molde antes del prensado, el enfriamiento después de la campaña de producción o el mismo mantenimiento que puede afectar los moldes debilitando áreas importantes como la superficie, este con el paso de los ciclos propiciarán una grieta, la propagación hasta que la moldura llegue a estar en condiciones inoperables según los niveles de grieta establecidos por el departamento de calidad de la industria vidriera de la localidad.

El desgaste por agrietamiento en los moldes para vidrio prensado es un problema que se conoce desde hace tiempo sin embargo actualmente existe muy poca investigación de este comportamiento y de las fuentes principales que originan decadencia en la vida útil de cada componente por lo tanto es una oportunidad el estudio al mecanismo que provoca el deterioro gradual en los moldes para contribuir a mejorar las prácticas y los elementos en operación.

Hoy en día se conocen técnicas y análisis que apoyadas con la tecnología permiten dar seguimiento al estudio y el comportamiento ante las fallas de los materiales para promover la mejora en el uso de los equipos, métodos, y materiales para favorecer un desarrollo óptimo de la empresa.

Por lo tanto en el presente proyecto se propone el análisis de las fallas por agrietamiento de los moldes para el proceso de vidrio prensado, la identificación de los materiales, las especificaciones que conforman a la moldura así como un análisis químico y propiedades mecánicas que presentan mayor demanda de producción en la empresa, se plantean pruebas de caracterización para corroborar las especificaciones de los materiales que la empresa exige contra una comparación de lo que se tiene en el departamento de molduras, de tal manera determinar cuáles son los mecanismos de agrietamiento que a su vez afectan la vida útil de los moldes en el proceso de vidrio prensado y mediante este estudio posteriormente proponer prácticas adecuadas que prolonguen la vida de los moldes.

Con base a este estudio la empresa pueda establecer criterios que le permitan identificar problemas en el proceso de fabricación y sus posibles mejoras, a fin de optimizar la producción, contribuyendo a mejorar la calidad de artículos de vidrio, la disminución de desperdicios, reducción de costo y repercutir en el control de mantenimiento de moldes.

1.2 Generalidades.

1.2.1 El vidrio

El vidrio es un material que ha mostrado gran importancia, desde las civilizaciones más antiguas hasta nuestra época, desde entonces ha sufrido modificaciones con el paso del tiempo, su uso, sus propiedades y sus características están ligadas fuertemente con la materia prima y el constituyente principal del vidrio (óxido de silicio), ya que es el principal formador de la red vítrea, que unido con otros óxidos modificadores de red le van confiriendo las propiedades tanto químicas como físicas, lo que hace que el vidrio sea considerado como un material de gran utilidad, reciclable con distintas aplicaciones, desde investigaciones científicas hasta la fabricación de artículos domésticos. (1, 2)

A temperatura ambiente los cuerpos vítreos o el vidrio se comportan como cuerpos sólidos pero esto no se les puede considerar debido a que la estructura de sus partículas carece de un orden periódico. La figura 1.1 **a)** representa una estructura cristalina que posee ordenamiento de largo alcance, mientras que la figura 1.1 **b)** muestra un ordenamiento considerado de corto alcance como propia del estado vítreo.

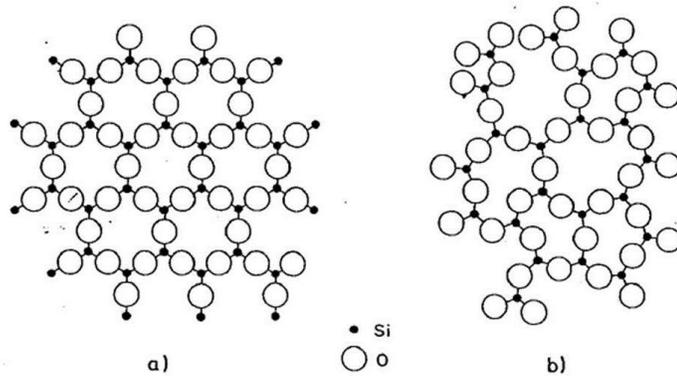


Figura 1.1 a) Representación esquemática de una red cristalina de SiO_2 b) Retículo al azar de sílice vítreo

Fernandez Navarro (2) define al vidrio como un material sólido amorfo, obtenido por enfriamiento de una masa fundida, de cualquier composición en una zona de temperatura en la que ocurra la solidificación. Como efecto del aumento de la viscosidad durante el enfriamiento, los vidrios adquieren algunas propiedades de los sólidos. La transición del estado líquido al estado vítreo debe ser reversible.

Existen varios tipos de vidrios sodicocalcico, manufacturados a partir de la mezcla de arena silica, carbonato de sodio, carbonato de calcio como componentes mayoritarios y otros óxidos componentes minoritarios. Cabe mencionar que estos porcentajes varían según la aplicación del vidrio.

El vidrio tiene diferentes usos pero en general se comporta como un material de alta resistencia química es utilizado como contenedor, aislante eléctrico y de alta dureza y sus propiedades van de la mano con la composición química y el tratamiento térmico posterior.

1.2.2. El Molde.

Una herramienta muy importante en el prensado de vidrio es el molde, un equipo con una cavidad el cual se puede encontrar como equipo monolítico o multicomponente como el del trabajo presente, específicamente para fabricación de vasos, está constituido por tres partes: el inserto, canasta y base.

- Inserto figura 1.2 **a)**: Es una pieza cilíndrica hueca fabricada con dos posibles grados de acero inoxidable; 431(0.2% C, 15-17% Cr, 1.25-2.5% Ni, 1% Si, 1% Mn, 0.04% P, .003% S, % Rem Fe) y 17-4PH (de 0.07% C, 15.5-17.5% Cr, 3--5% Ni, 1% Si, 1% Mn, 0.04% P, .003% S, 3-3.35% Cu, 0.15Nb+Ta % Rem Fe) de microestructura martensítica de estructura tetragonal de cuerpo centrado, provee alta dureza y resistencia al acero, la transformación martensítica se da sin difusión y se produce tras el enfriamiento a tasas suficientemente rápidas, los moldes son forjados y maquinados, esta herramienta es diseñada con el fin de resistir tanto mecánica como térmicamente el ambiente del proceso de prensado. Esta parte tiene contacto directo con el vidrio y transfiere la geometría al producto, más económico en lugar de fabricar todo el molde de acero inoxidable.
- Canasta figura 1.2 **b)**: Fabricada de hierro vaciado cubre al inserto del exterior con la función de preservar la temperatura en un rango operable durante el proceso
- Base figura 1.2 **c)**: Pieza fabricada de hierro vaciado el cual apoya y evita que el inserto salga de su posición al momento que el pistón presiona la vela.

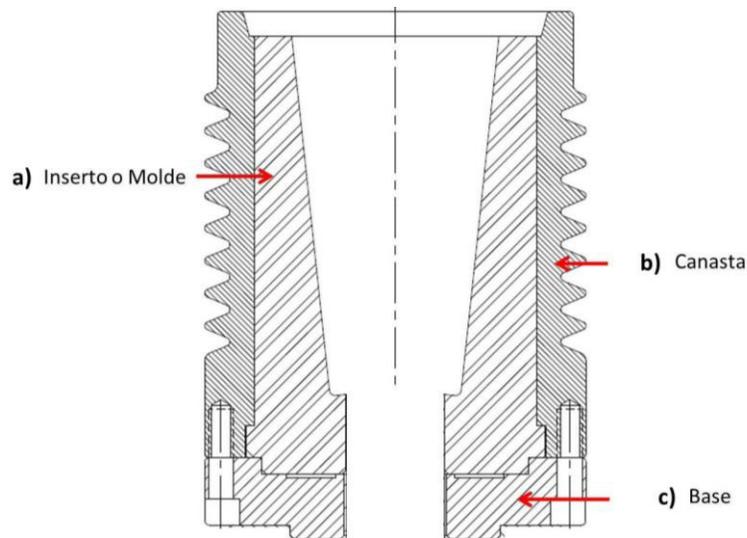


Figura 1.2 Vista de corte transversal de ensamblaje de molde en general a) Inserto-molde b) Canasta c) Base.

El molde cuenta con una vida útil y está determinada por el departamento de molduras en base a la historia que se tiene registrada de la misma conforme a su trabajo desempeñado durante años anteriores. La vida útil del molde puede definirse como el tiempo de trabajo que tiene un molde en función de las piezas estipuladas a prensar que varía según la demanda del artículo. El tipo de molde en el presente estudio tiene un record de 875,000 piezas a prensar durante la operación equivalente a 1.5 meses contando que está expuesto a paros de línea o por mantenimiento del mismo molde.

En la práctica el departamento de molduras puede descartar el molde según los criterios estipulados por calidad, algunos de ellos han sido a: Moldes agrietados o recorridos por número de velas prensadas.

- Agrietamiento: Existencia de grietas en la superficie del molde catalogada del nivel 1 al 4. Donde el nivel 4, es el más crítico y hace inoperable el molde. La figura 1.3 muestra la presencia de grietas de nivel 4 en la superficie y en la pared del molde.

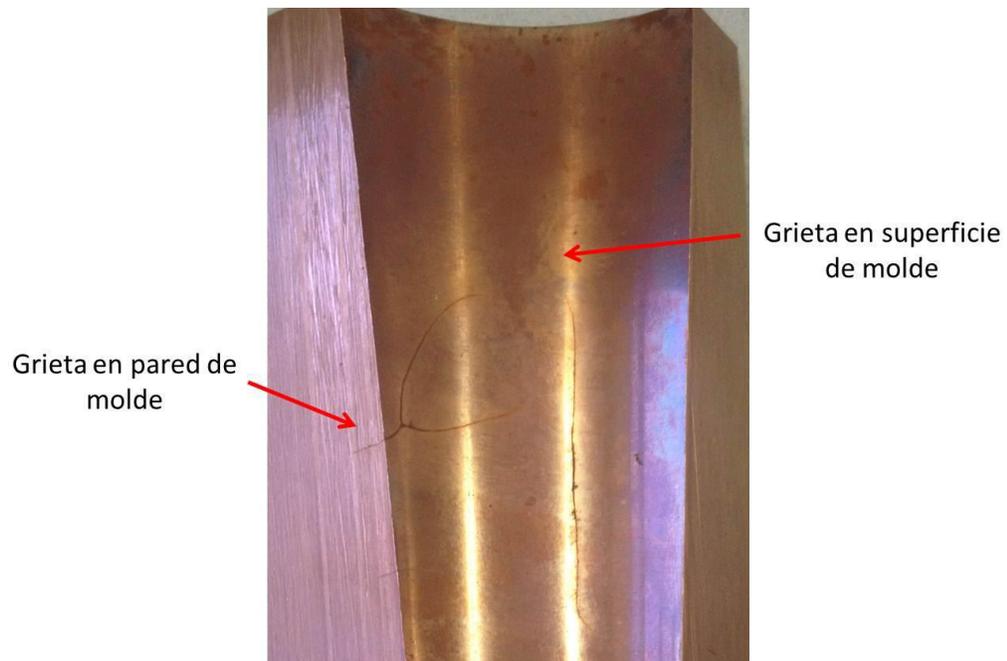


Figura 1.3 Grietas presentes en la superficie y en pared de molde.

- Molde recorrido o desgastado: El molde después de cierto número de campañas de producción comienza a verse afectado en sus dimensiones tanto por desgaste de operación o pulido de mantenimiento dejando los atributos críticos fuera de especificación requeridos por calidad dejándolo inoperables. En la figura 1.4 se observa la diferencia de un molde recorrido (derecha) contra un molde nuevo (izquierda) en donde el molde recorrido pierde hasta media pulgada de altura.



Figura 1.4 Diferencia entre molde nuevo (izquierdo) y Moldes recorrido en dimensiones (derecho)

- Velas prensadas: Esta va de la mano con los dos criterios anteriores ya que puede haber cumplido las velas prensadas y al mismo tiempo se perdieron dimensiones o incluso la aparición de grietas del nivel más crítico.

1.2.3. Mantenimiento del molde.

A la fecha la mejora en la calidad de los artículos de vidrio es algo que se ha estado buscando con el paso del tiempo en el proceso de prensado, está se puede ver afectada directamente por el molde, es decir la superficie debe cumplir cierto requisitos para poder operar. El departamento de molduras es quien se encarga del mantenimiento de los equipos así como también da seguimiento del estatus de los moldes. El mantenimiento es un proceso clave, previene el aseguramiento en la calidad el cual consiste en preparar el set de moldes para su próxima campaña, y por lo tanto involucra los siguientes pasos.

- Lavado de moldes: El set de moldes es llevado a una máquina de granallado mostrada en la figura 1.5 .que impacta partículas finas de fierro que presentan una superficie áspera contra la superficie del molde hasta conseguir remover la superficie dañada por la abrasión del proceso de prensado.



Figura 1.5 Lavado de moldes

- Primera revisión: Esencialmente consisten en una revisión metrológica de las dimensiones de cada uno de los atributos críticos para conocer si el molde cuenta con las especificaciones de las dimensiones requeridas por diseño como se muestra en la figura 1.6, si no se cuenta con dichas dimensiones la pieza se rechaza y puede pasar a una rectificación en la medida de recuperar dimensiones.



Figura 1.6 Primera revisión

- Pulido de superficie: Una vez que se han cumplido las etapas anteriores, la figura 1.7 muestra el pulido de un molde, el set de moldes pasa a un banco de trabajo en donde una persona pule con ayuda de una turbina de aire y lijas hasta que se le da el acabado casi espejo, esta etapa es crítica ya que la presencia de rallones o una superficie mal pulida en el molde traspasa el defecto al artículo de vidrio.



Figura 1.7 Pulido de superficie de moldes

- Segunda revisión: Es la etapa final del mantenimiento de moldes mostrado en la figura 1.8, consiste en una inspección en los atributos del equipo con el fin de encontrar rasgos sospechosos de alguna

irregularidad dimensional o visual en el molde. Una persona del departamento de producción da el visto bueno para que sean liberados y puedan ser utilizados nuevamente en la línea. En caso que no vaya a operar inmediatamente para la siguiente campaña, el set de moldes se almacena para cuando sea requerido.



Figura 1.8 Segunda Revisión

1.2.4. Proceso de prensado de vidrio.

El proceso del vidrio prensado es un proceso de conformación utilizado para fabricar artículos huecos en un solo paso. La figura 1.8 muestra la manufactura de vidrio que comienza a partir de la preparación de la mezcla de materia prima constituida generalmente por Oxido de Silicio 75 %, Carbonato de Sodio 15 %, Carbonato de calcio 10%. En un horno se eleva la temperatura 1500°C para fundir los componentes, la masa vítrea es llevada mediante ductos y canales como el homogeneizador, refinador hasta llegar a una región llamada alimentador que baja a una temperatura de 1200 a 1100 °C dependiendo del artículo a prensar, posteriormente pasa a través de un orificio donde un mecanismo dosifica el vidrio a través de una “vela” o “gota”. La vela sale por el orificio y es depositada en el molde, a continuación un pistón desciende, presiona la masa vítrea fluyendo entre el pistón y el molde adoptando el diseño del molde y pistón. El artículo conformado es transportado dentro del molde mientras es enfriado con aire desde donde fue prensado hasta la extracción, donde ya adquiere un aspecto rígido. Posteriormente ya formado el artículo es llevado por una banda al horno de túnel de recocido donde se liberan las tensiones residuales. La velocidad del proceso varía según las secciones que tenga la máquina rotatoria en donde son instalados los moldes, desde 120 piezas/min en las máquinas de prensado triple a 90 piezas/min en las máquinas dobles.

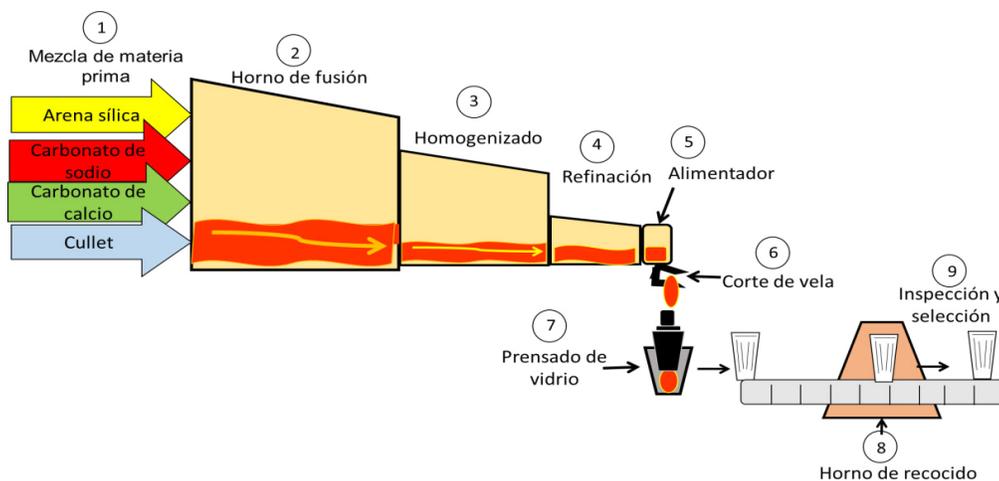


Figura 1.8 Proceso de vidrio prensado

1.2.5. Precalentamiento de moldes.

Existe una serie de etapas previa la producción real de los artículos antes de que sean llevados a la línea de selección y embarque, una de estas es el acondicionamiento térmico de los moldes ya que deben de cumplir la temperatura de proceso (1100°C) para que el vidrio pueda ser trabajado sin que se adhiera al molde, así también se asegura una calidad óptima en el artículo evitando la generación de defectos por choque térmico que origina la diferencia entre temperaturas que experimenta la pieza de vidrio (1100°C) al contacto con la superficie fría del molde (temperatura ambiente aproximadamente de 40°C)

Cuando las temperaturas de trabajo son altas, el precalentamiento en las herramientas debe mostrarse como una parte esencial respecto al cuidado del equipo con el fin de evitar cambios bruscos o que propicie un deterioro prematuro.

En la práctica de la industria vidriera el precalentamiento consiste en que a temperatura ambiente se somete el molde al vertir las velas de vidrio a 1100°C hasta llenar la cavidad de este, dichas velas son extraídas al llenar el interior del molde, esto se repite un gran número de veces hasta que la temperatura se eleve y por lo tanto el molde se acondicione a una temperatura óptima de prensado de 500 a 550°C lo que puede tardar alrededor de 15 a 20 minutos para que la producción pueda pasar al horno de recocido y posteriormente a la selección de los artículos de vidrio .

Desafortunadamente esta práctica al inicio de la producción de artículos puede ser uno de los problemas más fuertes que afectan la vida del molde ya que durante cambios del tipo de artículo, cambio de moldes dañados o paros en la línea debido a fallas en el suministro energético de gas o electricidad provocan el enfriamiento del molde y el calentamiento con vidrio debe de repetirse generando potenciales fallas en los equipos (3).

Capítulo II. Antecedentes.

Si bien como se ha visto se sabe que la industria del vidrio involucra procesos de la transformación y modelado de materiales donde se trabaja con herramientas para lograr el propósito, dichas herramientas están expuestas a elevadas temperaturas y ciclos con fluctuaciones de temperatura que repercuten negativamente en los moldes debido al choque térmico al que son sometidos dando lugar a la formación de grietas, provocando así disminución en la vida útil de servicio y en la calidad final de los artículos de vidrio.

El estudio y análisis de los fenómenos que atribuyen el deterioro y el decremento de la vida útil de los moldes tiene una fecha relativamente corta, sin embargo autores como Akdogan y colaboradores (4), tienen estudios referentes al proceso de prensado, en su primera línea de investigación tiene un enfoque al cambio de rugosidad a partir de un modelo de predicción de la vida de la textura en materiales usados en moldes para el proceso de vidrio prensado, ellos estudian cómo actúa el fenómeno de los ciclos térmicos deteriorando la superficie de los moldes lo que propicia un aumento de la rugosidad, y trae como consecuencia una mala calidad de los artículos prensados (4).

Dusserre en 2005 (5), simuló mediante elementos finitos agregando variables del proceso del prensado del vidrio, como temperatura, comportamiento reológico del vidrio, comportamiento mecánico del molde entre otras variables para identificar en que parte del proceso de prensado ocurre la mayor concentración de esfuerzos, con base a la simulación dedujo, que la mayor concentración de tensiones es de 430MPa provocada por el vidrio a una temperatura de 520°C al momento que es depositada la vela en el molde la cual pueden inducir a la deformación plástica provocando la formación de grietas en dos lugares del molde dependiendo del diseño y geometría del molde: en el centro o en los bordes de la superficie plana.

Actualmente los estudios que se han encontrado (6) han llevado a la investigación a determinar cuál es el fenómeno de mayor impacto que

contribuye a la falla por agrietamiento en las herramientas o moldes. La microestructura del material es un factor en el estudio de gran importancia, la cual se ha visto involucrada en el agrietamiento de los moldes pues al paso de los ciclos térmicos tienden a promover cambios metalúrgicos que conllevan a la pérdida de propiedades.

Akdogan y Koyun en 2007 realizaron un estudio mediante el análisis de transferencia de calor y comportamiento del material usado para moldes de vidrio prensado sujeto a los ciclos térmicos con la finalidad de tratar de analizar la distribución de los esfuerzos térmicos que experimentan los materiales a altas temperaturas y conocer cuál es el valor máximo generando con un gradiente de 300°C.

Autores como Bystrianský J.(7) define al choque térmico como la falla que sufre un material cuando este es golpeado por un fluido mucho más caliente generando un esfuerzo provocado por la restricción de la expansión térmica cuando es expuesto a un cambio súbito de temperatura, obteniendo tensiones en el material (8). Estas grietas se forman a lo largo de la superficie, así como en el interior o hasta ciertas profundidades, en el caso de choque térmico suelen avanzar longitudes considerables, sin embargo por fenómenos de fatiga térmica estas longitudes son menores llegando solo a 2.5mm de profundidad en comparación con las del choque térmico que pueden alcanzar hasta 4mm. Existen técnicas que permiten analizar la evolución de la grieta, mediante el análisis de la tasa de crecimiento que permiten determinar que fenómeno se le atribuye al avance de la grieta y discernir entre choque térmico o fatiga térmica (9).

Por otro lado se debe tomar en cuenta la importancia de la microestructura que requiere el material de la herramienta o molde ya que debe tolerar los fenómenos presentes en el proceso de vidrio.

Tener una microestructura no deseada y malas prácticas en la operación con los moldes puede propiciar un deterioro prematuro de estas herramientas, ya

que se debe considerar que la falta de homogeneidad en la composición química de los moldes con altos contenidos de cromo e inconsistencias en el tratamiento térmico induce a la formación de fases no deseadas (10, 11) aunque este tipo de inconsistencias puede formarse durante la solidificación del metal, incluso estos problemas son generados por procesos que involucran trabajo en caliente (12) como lo es el proceso de vidrio prensado donde la temperatura en la superficie de contacto varía desde 900 a 300 °C.

Autores como P.Wang y colaboradores en 2010 (9), realizaron un estudio con el fin de evaluar el efecto de la ferrita en un acero inoxidable martensítico variando el contenido de la fase delta ferrita en las muestras, sometiéndolas a pruebas de impactos, determinando así una relación cuantitativa entre la ferrita delta y las propiedades del material, demostrando así que la fase ferrita delta provee al acero una resistencia a la formación de grietas en comparación con otros aceros inoxidables martensíticos que no tuvieran presente la fase ferrita delta (10).

El problema de la fase ferrita delta es debido a la falta de cohesión entre la ferrita y la matriz martensítica la cual es predominante en el acero inoxidable 431 ya que esto provoca que disminuyan las propiedades mecánicas como la resistencia, dureza, (10,12), corrosión, tenacidad, (13) asociadas todas estas propiedades a la causa principal de formación de grietas (14).

Es importante tomar en cuenta la existencia de materiales para el diseño de herramientas de trabajo en caliente como los moldes para prensado de vidrio las cuales tienen aplicaciones donde las temperaturas de proceso son muy importantes para la manufactura del artículo ya que durante la operación las herramientas están sujetas a los repetidos ciclos térmicos que generan esfuerzos, choques térmicos y deformación plástica de tal manera que si se sigue una correcta práctica con la selección y diseño correcto de estas herramientas o moldes se puede aumentar su eficiencia y mejora del proceso (15).

Capítulo III. Hipótesis y Objetivos.

3.1 Hipótesis.

Mediante el análisis de falla es posible determinar cuál es el factor principal que contribuye a la disminución de la vida útil del molde.

3.2. Objetivo general.

Establecer cuáles son los factores que más influyen y proponer acciones concretas que impacten positivamente en la vida útil de los moldes.

3.3 Objetivos específicos.

- Conocer las tensiones internas generadas por el ciclo térmico.
- Identificar cambios microestructurales en los moldes y reconocer la existencia de otras fases presentes en los moldes que puedan contribuir al mal comportamiento de las propiedades del material.
- Evaluar los cambios de dureza en los moldes.
- Identificar en qué etapa del proceso de prensado el crecimiento de la grieta afecta en mayor parte al molde.

3.4. Metas.

- Implementación de técnicas de precalentamiento antes del proceso de prensado.
- Proponer el uso de aceros alternativos con mayor tenacidad a la fractura.

Capítulo IV. Metodología experimental.

4.1. Introducción.

Para el análisis de falla se contó inicialmente con una prueba en la línea de producción donde los moldes se sometieron a los ciclos de producción real la cual llevo a la recolección final de 5 moldes con cantidades diferentes de piezas fabricadas con el fin de estudiar las características que cada uno acumuló.

Para identificar el mecanismo de falla se utilizaron técnicas de análisis visual en la superficie y en las grietas de los moldes para llegar a reconocer características del desgaste por el proceso de prensado. Para el conocimiento de cambios microestructurales en los moldes la técnica de microscopia óptica de luz reflejada (MOLR) fue utilizada.

Como siguiente paso fue reconocer la composición química de los materiales para la fabricación de los moldes de vidrio prensado mediante fluorescencia de rayos X(FRX), se practicaron ensayos de microdureza Vickers que permitieron realizar un perfil de dureza y conocer cambios en las propiedades de los materiales en diferentes zonas del molde, y, finalmente, se concluye la etapa experimental mediante el análisis de la tasa crecimiento de la grieta contra las piezas prensadas mediante el uso de la técnica de réplicas metalográficas.

4.2. Prueba en la línea de producción.

Con el fin de obtener resultados reales del agrietamiento de los moldes, la parte experimental se efectuó en la línea N°14 de la empresa de vidrio de la localidad seleccionando un conjunto 43 moldes del tipo 8606 que fabrica vasos a una velocidad de producción de 120 piezas/min, en este grupo operan 36 moldes en la máquina y 7 son de refacción. Se seleccionó este molde ya que es uno de los

que más frecuencia de producción tiene, la selección de este tipo de molde se llevó a cabo mediante la búsqueda de datos históricos de 2 años consecutivos de la frecuencia y tamaño de producción de las piezas fabricadas a lo largo de la campañas como lo muestra la figura 4.1, así mismo se tomó en cuenta que este artículo daba posibilidad de trabajar en la línea debido a que la calidad no es tan requerida como otras piezas de mayor calidad que restringiera efectuar el presente trabajo.

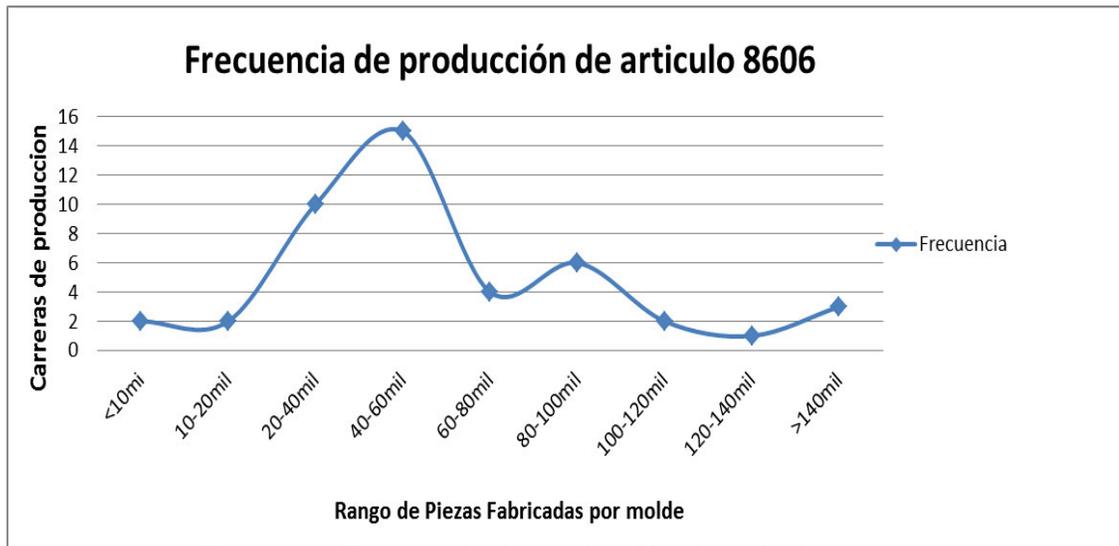


Figura 4.1 Frecuencia de producción de artículo 8606

La prueba se realizó por dos etapas: La primera etapa de 10 días, una etapa intermedia de 5 días producción de otro artículo distinto a este que sirvió para recopilar información de los moldes y su preparación para la tercera etapa en la línea de producción.

Primera etapa: Consistió en dar seguimiento a los moldes con el fin de encontrar indicios de grietas en la superficie de los antes mencionados mediante la recopilación de vasos como réplicas de producción durante un tiempo determinado facilitando la observación de evolución de la grieta que más adelante se explicara en que consistió la técnica.

Etapla intermedia: Una vez que terminó la campaña de 10 días de producción se agruparon los moldes en dos grupos según el desempeño que mostraron en la

campana de producción. El grupo1 de 17 moldes que empezaron y terminaron la carrera sin ser remplazados a estos moldes no se les dio mantenimiento para que conservaran estas condiciones y si era posible acumular en la siguiente campana rasgos de desgaste por abrasión, oxidación, o desprendimiento de material por adhesión de vidrio. El segundo grupo pertenece a 18 moldes que fueron remplazados durante la corrida de producción y a estos se les dió mantenimiento. Se toma en cuenta que en cada grupo se agregó un molde agrietado que cumpliera las condiciones de superficie según las características de grupo que pertenece.

Segunda etapa: Se llevó a cabo durante 11 días, previamente con los moldes identificados se continuó recopilando vasos de vidrio de los moldes agrietados dándole seguimiento al crecimiento de las grietas, al mismo tiempo se hicieron mediciones con un Termómetro laser marca FLUKE 68 IN con el fin de obtener un promedio de la temperatura de la superficie del molde y conocer cómo se comportaba la variación de temperaturas, la pistola se calibró con una emisividad de 0.8. Las mediciones se llevaron a cabo en dos partes del ciclo de prensado, antes de la caída de la vela (MTE) y después de la salida del artículo de vidrio ya prensado (MTS).

En ambas etapas se fueron extrayendo moldes paulatinamente conforme pasaban los días, es decir cada uno acumuló más velas prensadas que otro buscando encontrar diferencias significativas.

Una vez que terminó la producción con el set de moldes en la máquina se seleccionaron cinco moldes con base a las piezas fabricadas así como las grietas presentes en cada uno para luego ser caracterizados en el laboratorio.

En la tabla IV.1 se presentan los moldes seleccionados con respecto a los días en operación y las velas que acumularon respectivamente durante las dos campanas en la línea de producción, se observa que el molde No 45 acumulo más velas prensadas durante un periodo total de 20 días de operación,

mientras que el molde No 87 es el que se extrajo de operación más rápido acumulando un menor número de piezas.

Tabla IV.1 Piezas prensadas de moldes.

No Molde	Días acumulados			Piezas fabricadas		
	campaña 1	campaña 2	Total	campaña 1	campaña 2	Total
45	8	12	20	38400	57600	96000
54	7	10	17	36000	48000	84000
2	7	9	16	36000	43200	79200
72	10	0	10	48000	0	48000
87	4	0	4	20160	0	20160

4.3 Análisis de composición química.

Con el propósito de conocer y comprobar que la composición química de los moldes sea la que se requiere en la empresa para la fabricación de estas herramientas se utilizó un equipo marca Olimpos X de fluorescencia de rayos X como se muestra en la figura 4.2.



Figura 4.2 Pistola de fluorescencia de rayos X

4.4 Análisis visual de superficie y grietas en moldes.

Con el fin de observar las características y de hacer un análisis visual de los molde se utilizó un equipo estereoscopio marca NIKON SMZ 745T mostrado en la figura 4.3 se logró observar y analizar tanto superficies, como las grietas presentes en los moldes.



Figura 4.3 Estereoscopio Nikon SMZ 745T

Posteriormente y continuando con el análisis de visualizar rasgos de estría de fatiga térmica en los moldes, se obtuvieron micrografías de las muestras mediante microscopio electrónico de barrido (MEB), se observó el crecimiento de la grieta en zonas aledañas al origen de la grieta. Las micrografías se obtuvieron con el detector de electrones secundarios y el de electrones retro dispersados como se muestra en la figura 4.4.

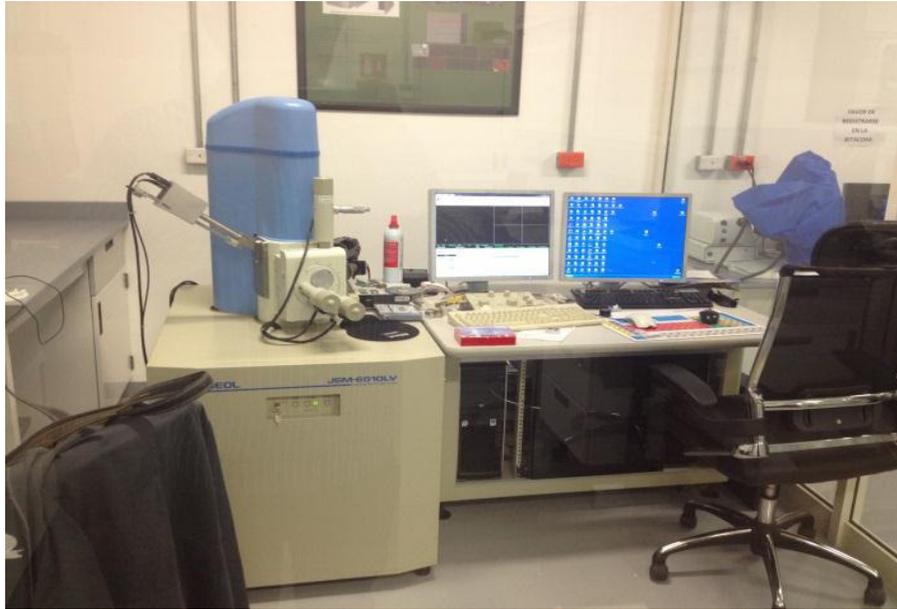


Figura 4.4 Microscopio electronico de barrido(MEB) Jeol JSM-6510LV

4.5. Medición de profundidad de grieta.

Con la finalidad de conocer la longitud, el avance y el daño que se puede alcanzar al generarse grietas en diferentes zonas del interior del molde, se lograron hacer mediciones mediante microscopio óptico de luz reflejada(MOLR) Nikon LV-EPILED figura 4.5b) conectado a un equipo de medición de desplazamiento Quadracheck figura 4.5a).

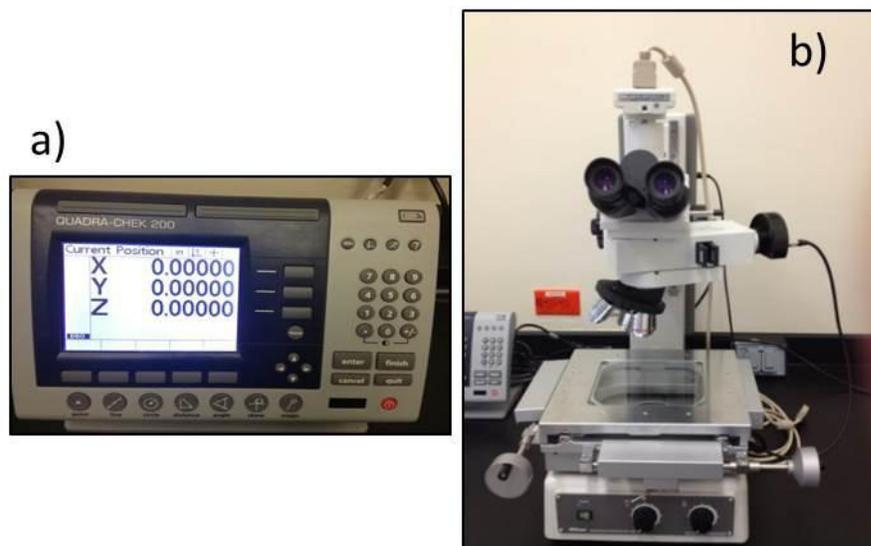


Figura 4.5 a) Equipo de medición Quadracheck. b) Microscopio Nikon LV-EPILED

Las mediciones se llevaron a cabo en zonas de la mitad, a un cuarto y un octavo de la grieta como lo muestra la figura 4.6.

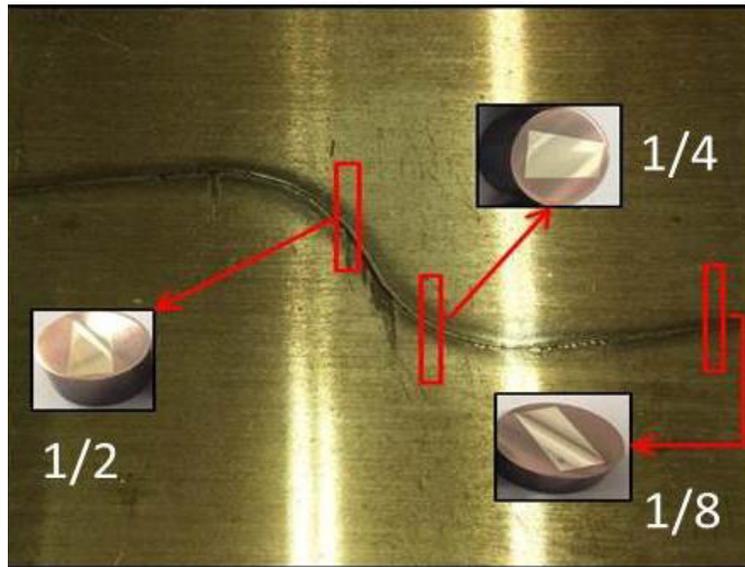


Figura. 4.6. Secciones de corte de la grieta.

4.6. Preparación metalográfica.

Para utilizar técnicas de microscopía óptica de luz reflejada y ensayos de dureza, las muestras fueron cortadas con equipo Struers Discotom-60 figura 4.7b), de la sección media del molde a un tamaño aproximado de 1 cm de ancho y 2 cm de largo como se ve en la figura 4.7a) ,después se montaron en baquelita de retención de borde con la ayuda de un equipo Struers Labopress-1 figura 4.7c), para luego seguir con los pasos metalográficos de desbaste y pulido, se utilizaron lijas de carburo de silicio de 500 a 4000 y posteriormente paño con suspensión de diamante de 3 μm .

Como paso final para revelar la microestructura del acero en el ataque químico se optó por utilizar el reactivo Kallings 1. (33 ml de alcohol etílico, 33 ml de agua destilada, 33 ml de ácido clorhídrico y 5 g de Cloruro de Cobre).

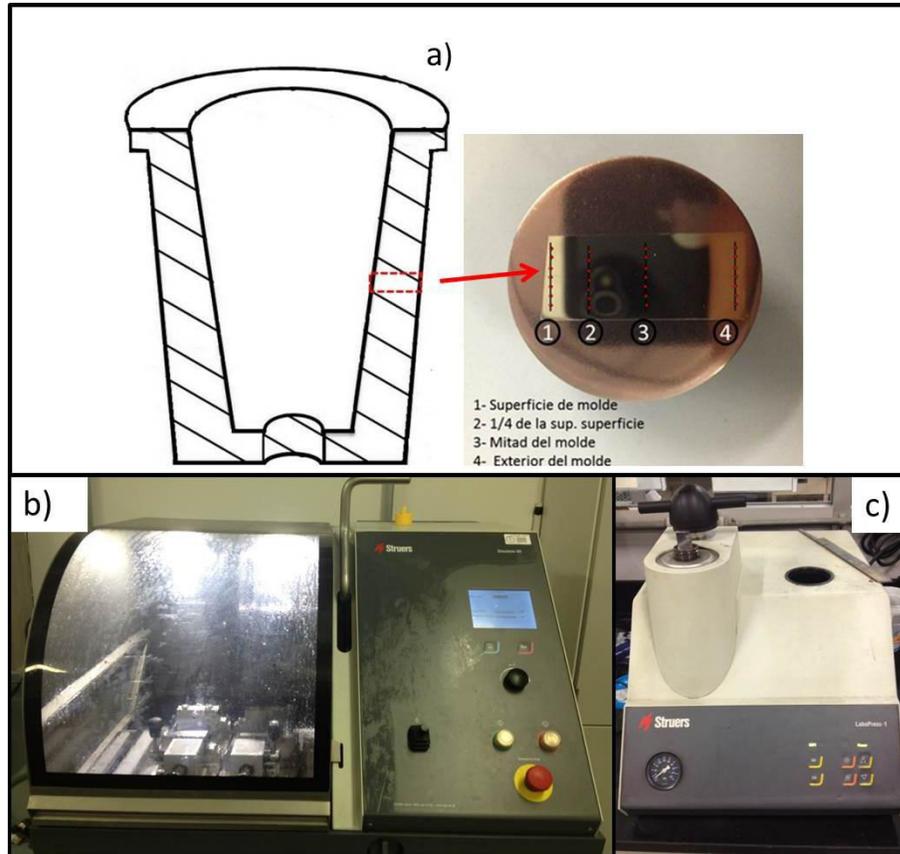


Figura.4.7. a) Esquema de corte de muestras del molde. b) Cortadora Struers Discotom-60. c) Prensa Struers Labopress-1.

4.7. Análisis microestructural.

Para identificar cambios microestructurales que se puedan atribuir a los ciclos térmicos durante el proceso de prensado, las mediciones se llevaron a cabo del interior al exterior de los molde en cuatro zonas de las probetas indicado en la figura 4.8a); superficie (1), a un cuarto de la superficie (2), mitad (3) y en la parte externa de la superficie del molde (4), mediante un equipo Nikon epiphot mostrado en la figura 4.8b) se tomaron las micrografías para el análisis.

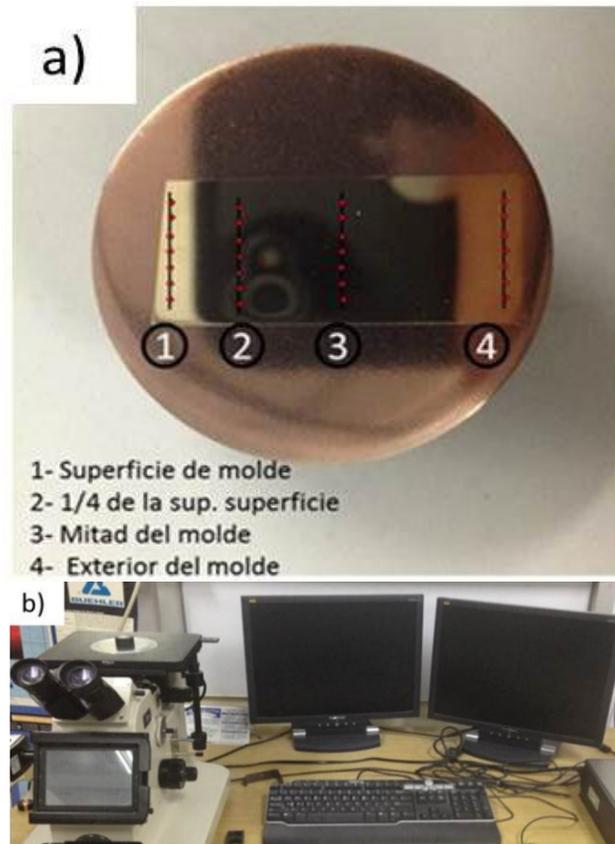


Figura 4.8. a) Secciones analizadas. b) Microscopio Nikon Epiphot.

4.8. Ensayos de microdureza Vickers.

Para detectar cambios y hacer un perfil de la dureza de los moldes se hicieron mediciones de microdurezas Vickers con el equipo mostrado en la figura 4.9a) un microdurometro Shimadzu HMV-2T, con el cual se hicieron indentaciones aplicando una carga de 5 N con un tiempo de 15 segundos, la figura 4.9b) muestra las zonas de la probeta donde se hicieron las mediciones, superficie (1), un cuarto de la superficie (2), mitad del molde (3), zona exterior del molde (4).

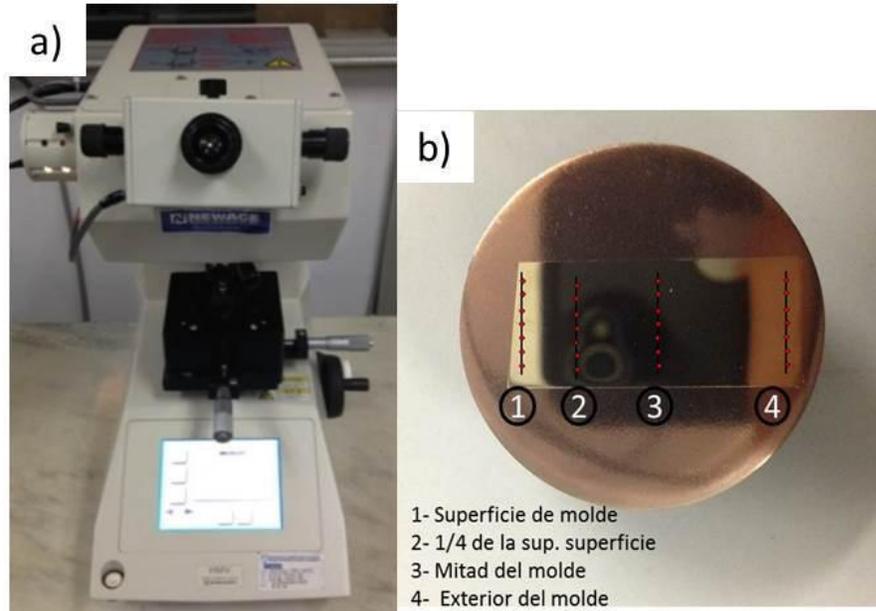


Figura 4.9. a) Durómetro Vickers Shimadzu HMV-2T, b) Esquema de de mediciones de durezas.

4.9. Análisis de crecimiento de grieta.

Para finalizar la etapa experimental se realizó el análisis de la tasa de crecimiento de la grieta en los moldes con el fin de reconocer en qué etapa del proceso de prensado se le atribuye el mayor crecimiento de la grieta y poder identificar el factor que más influye en la vida útil del molde es decir si se debe al proceso estable de producción o el acondicionamiento térmico de los moldes previo a la operación, esto se realizó mediante la recolección de vasos durante la producción en los cuales conforme pasan los ciclos se adquirirían vasos que mostraban un aumento en la longitud de la grieta, esta grietas se lograron observar con la técnica de réplicas metalográficas mostrado en la figura 4.10 y mediante un equipo medidor de longitudes Quadrashek adaptado a un microscopio de luz reflejada mostrado previamente en la figura 3.5, se lograron hacer las mediciones para luego graficar la tasa de crecimiento de la grieta contra número de piezas prensadas.



Figura 4.10. Líquido y hojas adhesivas de técnica de réplicas metalográficas.

Capítulo V. Resultados y Discusiones.

5.1. Resumen.

A continuación se muestran y discuten los resultados de los cinco moldes analizados para fabricación de vasos que estuvieron trabajando en condiciones reales de proceso y con un termómetro infrarrojo de pistola se registró el rango de temperaturas en la superficie del molde durante la producción estable. Se obtuvieron los resultados de la composición química mediante fluorescencia de rayos X, se usaron técnicas de microscopía óptica luz transmitida para analizar la microestructura mientras que el análisis visual de la superficie y de las grietas se realizaron mediante estereoscopía y microscopía electrónica de barrido. Se obtuvieron los resultados de la profundidad en tres zonas de la grieta. Mientras que los resultados de dureza se obtuvieron con la técnica de microdureza Vickers en cuatro zonas de la pared del molde, y finalizando con los resultados obtenidos del análisis evolución del crecimiento de la grieta impresa en vasos de vidrio conforme las piezas producidas.

5.2 Medición de temperatura de superficie de moldes.

Se lograron obtener las mediciones térmicas en la superficie de los moldes una vez acondicionada a la temperatura del proceso, se graficaron las temperaturas de las zonas de entrada de la vela (**MTE**) y después de la salida del artículo (**MTS**) el rango de temperaturas en la superficie es mostrado en la figura 5.1. La fluctuación de temperaturas varía dentro del rango permisible de proceso.

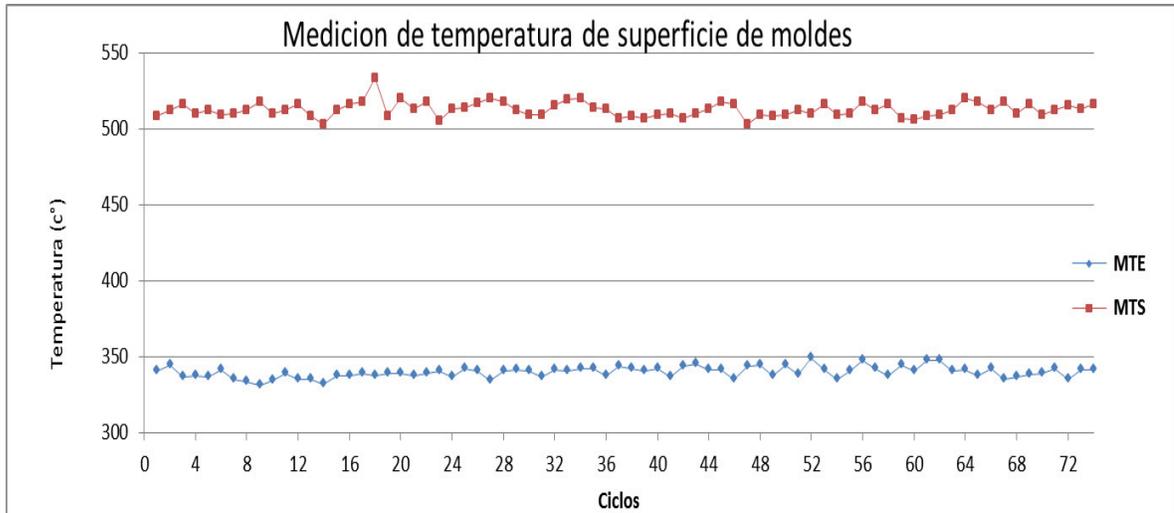


Figura 5.1 Rango de temperaturas registradas en proceso de prensado

Conociendo los datos registrados, se obtuvo que la temperatura promedio es de 530°C en medición de temperatura de salida (**MTS**) mientras que en la medición de temperatura de entrada (**MTE**) llegó a una temperatura promedio de 350°C, el diferencial de temperatura de proceso se mantiene en un promedio aproximado de 180°C. El cálculo de esfuerzos térmicos (σ_t) se puede obtener mediante la ecuación 1, una vez conociendo el coeficiente de expansión térmica del material (α), módulo elástico (E), la diferencia de temperaturas de proceso ($T-T_0$) y la relación poisson (ν).

$$\sigma_t = \frac{\alpha E (T - T_0)}{(1 - \nu)} \quad \text{Ecuacion1}$$

Al sustituir estos datos en la ecuación 1 se obtuvo que el esfuerzo térmico inducido en los moldes durante el proceso de producción estable equivale a 596 MPa.

Como se sabe el proceso de prensado genera esfuerzo en el material debido a las cargas térmicas, las mediciones de temperatura tomadas durante la producción estable demostraron que la fluctuación de temperatura corresponde a un gradiente térmico aproximado de 180°C en el cual el esfuerzo máximo que se puede generar, es de 596MPa, Akdogan en 2007 realizo ensayos de fatiga

térmica, reporto que los esfuerzos térmicos inducidos en el material equivalen a 723MPa. Por lo tanto la falla en el material no alcanza un nivel de energía suficiente para formar grietas, aunque al paso de numerosos ciclos pudieran formarse en algunas zonas del molde (4-5), como se muestra en la figura 5.2.



Figura 5.2 Molde con grieta en superficie de trabajo

G. Dusserre y colaboradores (5), reportan esfuerzos máximos durante el prensado equivalen a 162MPa a una temperatura de 502°C no alcanzando la falla del material más sin embargo estos pudieran existir preferentemente en dos zonas del molde; superficie baja y en la zona central del molde, relacionando directamente el diseño y la forma de la geometría de los moldes en caso de que los moldes sean irregulares o asimétricos se intuye que el daño puede aparecer en los bordes de la superficie plana, sin embargo este no es el caso.

Por otro lado la etapa de acondicionamiento térmico del molde antes de ser usado se le puede atribuir a la formación y a el mayor crecimiento de grietas en los moldes mediante el análisis de la tasa de crecimiento de grieta, donde el avance equivale a casi 1.2 mm por ciclo y una vez formadas las grietas durante esta etapa la energía requerida para el crecimiento de la grieta es menor, esto explica que aunque el esfuerzo generado durante la producción estable no rebasa el limite elástico aún existe un crecimiento pero en menor grado por el daño plástico durante el acondicionamiento térmico.

5.3 Análisis de composición química de moldes.

Cuando se recopilaron los moldes del mismo conjunto después de la prueba en la línea de producción se aseguraba que todos pertenecieran al mismo tipo de aleación, es decir, que fueran de acero inoxidable 431 según a lo mencionado por el departamento de molduras, sin embargo cuando se realizó la prueba de fluorescencia de rayos X se encontró que existe una mezcla de dos materiales diferentes, ya que resultaron; dos moldes del tipo 431 (0.2% C, 15-17% Cr, 1.25-2.5% Ni, 1% Si, 1% Mn, 0.04% P, .003% S, % Rem Fe) y tres más de la aleación 17-4PH (0.07% C, 15.5-17.5% Cr, 3--5% Ni, 1% Si, 1% Mn, 0.04% P, .003% S, 3-3.35% Cu, 0.15Nb+Ta % Rem Fe).

En la tabla V. I se puede observar la composición química para los moldes de acero inoxidable 431 que es requerida por la empresa basada en la norma ASM (American Society of Metals). Se puede observar que los contenidos de cromo y níquel están dentro de los rangos permisibles, sin embargo las impurezas de azufre sobrepasan lo establecido.

Tabla V.1 Composición química acero inoxidable 431.

AISI 431	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	C
ASM	Rem.	15-17	1.25-2.5	1	1	0.04	0.03	0.2
Molde 2	80.75	15.97	1.94	0.68	0.53	0.036	0.067	0.2
Molde 72	81.31	15.18	1.94	0.71	0.54	0.025	0.063	0.2

Así mismo se cuenta con una composición química del acero inoxidable de la serie 17-4PH mostrada en la tabla V.2 según ASM (American Society of Metals) contra lo que se tiene en físico. Existen variaciones en la composición entre el fósforo, azufre, silicio, sin embargo los contenidos de cromo y níquel son aceptables para este tipo de acero.

Tabla V.2 Composición química de acero inoxidable 17-4 PH

17-4PH	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	C	Cu	Nb +Ta
ASM	Rem	15.5-17.5	3.0-5.0	1	1	0.04	0.03	0.07	3-3.5	0.15-0.45
Molde 45	75.34	15.16	4.6	0.79	0.54	0.075	0.097	0.07	2.95	0.286
Molde 54	74.03	15.16	4.71	0.81	0.43	0.069	0.069	0.07	3	0.304
Molde 87	75.28	15.23	4.71	0.8	0.5	0.062	0.072	0.07	2.96	0.299

5.4 Análisis visual de superficie y grietas de moldes.

Las imágenes obtenidas de los moldes de la aleación 0.2% C, 15-17% Cr, 1.25-2.5% Ni, 1% Si, 1% Mn, 0.04% P, .003% S, % Rem Fe (Acero 431) denotan la topografía de las superficies de los moldes después del proceso de prensado, no obstante, sabiendo que este grupo es del mismo material, la dirección de las grietas varían unas de otras como lo muestran las imágenes de la figura 5.3. La figura 5.3a) pertenece a la grieta del molde No 2, en comparación de los otros moldes esta grieta presentó una ramificación en la parte inferior lo que provocó que la grieta tuviera mayor longitud, mientras que la figura 5.3b) es la grieta encontrada en el molde No 72 esta figura es en forma de “s” en posición horizontal sin embargo no se demuestra ramificaciones como el molde mencionado previamente.

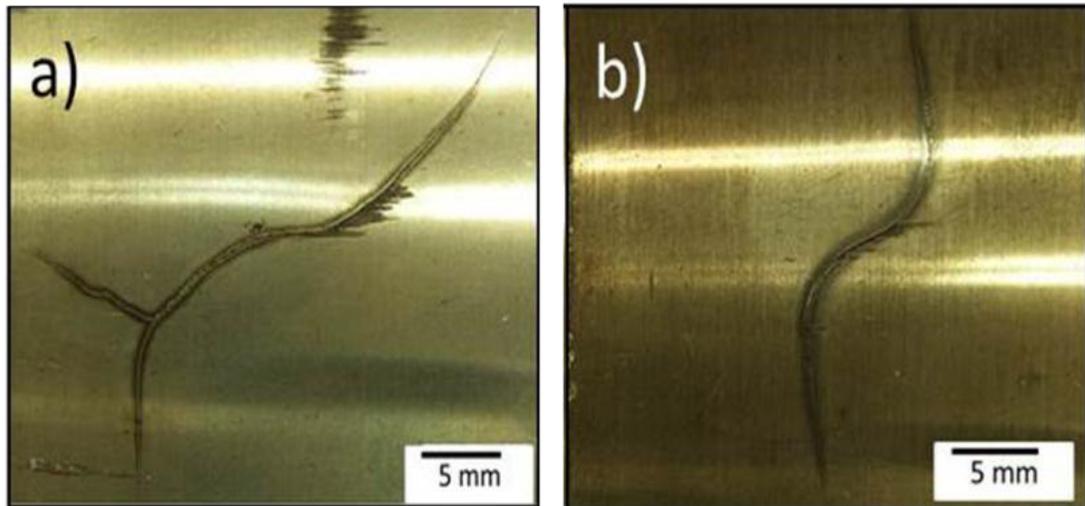


Figura 5.3 a) Grieta en superficie del molde No 2. b) Grieta en molde No 72

Si bien las piezas acumularon diferente número de velas prensadas, ambas superficies conservan características similares, sin embargo esto difiere con respecto a la trayectoria de cada grieta. El motivo por el cual la formación y el crecimiento de las grietas en las muestras se forman de manera aleatoria se le puede atribuir a que defectos como microgrietas, microporos los cuales pueden ser generados durante el proceso de manufactura de los moldes, estos actúan como concentradores de esfuerzos, debilitando distintas zonas del material haciendo susceptible al agrietamiento, aún más cuando se involucran fluctuaciones de temperatura como lo es el proceso del prensado que generan esfuerzos residuales en el material de tal forma que una vez excediendo el límite de cedencia, el material tiende a liberar el esfuerzo por medio de la ruptura.

Así mismo esto se puede explicar para el grupo de moldes de la aleación de 0.07% C, 15.5-17.5% Cr, 3-5% Ni, 1% Si, 1% Mn, 0.04% P, .003% S, 3-3.35% Cu, 0.15Nb+Ta % Rem Fe (17- 4 PH) correspondientes a la figura 5.4 **a)**, **b)** y **c)**. En la figura 5.4**a)** perteneciente al molde No.87 la superficie se conserva con gran brillo, sin rasgos de daño y desgaste mientras que la grieta comienza a surgir. La figura 5.4**b)** molde No. 54, la grieta se puede apreciar con un mayor daño, el color en la grieta es más oscuro y la superficie tiene rasgo de golpes

pero son atribuidos al manejo durante la operación y no por factores de desgaste por abrasión, corrosión o desprendimiento de material.

La figura 5.4 c) pertenece al molde No.54 en la cual se puede observar que la grieta tiene una apariencia de una línea recta, sin embargo la superficie se conserva y los daños son descartados.

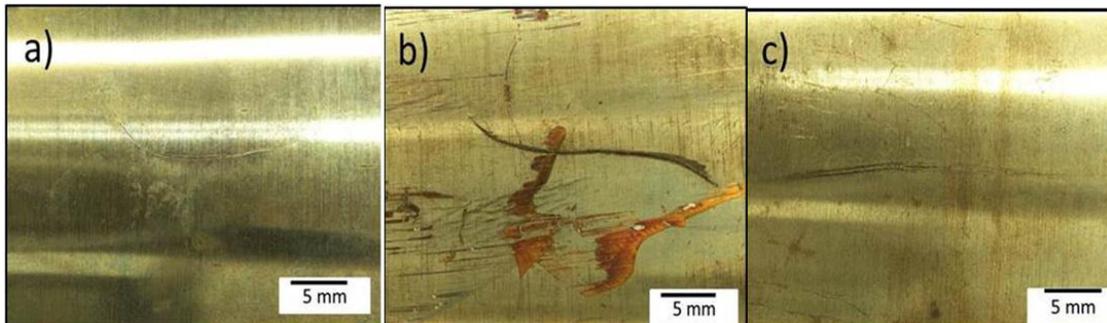


Figura 5.4. Grietas en moldes de acero inoxidable 17-4PH, a) Molde No. 87, b) Molde No. 54 y c) Molde No 45

De manera general, las superficies de los moldes conservan huellas mínimas de desgaste por proceso de prensado, es decir el deterioro por abrasión, adhesión o corrosión pueden ser descartados, sin embargo la existencia de grietas para cada uno de estos cinco moldes es el factor común, en la cual la característica principal es que su aparición es dada en la parte media del cuerpo del molde debida a que por su geometría y diseño esta zona este expuesta a la mayor fluctuación de temperatura y probablemente se generen la mayor cantidad de esfuerzos por el fenómeno del choque térmico.

Mientras que los altos niveles de esfuerzo que se generan durante el acondicionamiento térmico del molde en donde se puede generar esfuerzo que sobre pasan el limite elástico del acero, por lo tanto en esta zona se da con mayor frecuencia la formación de grietas de crecimiento abrupto pero con direcciones propagadas de crecimiento distintos y no como la fatiga térmica donde se forman redes de grietas con avance progresivo debido a la fluctuación de las cargas térmicas que se extienden durante todo el proceso de prensado

que no sobrepasan el límite elástico del acero, pero que se repiten un gran número de veces hasta que el acero cede por el fenómeno de fluencia.

En la figura 5.5 se puede observar la sección transversal de la grieta ubicada al interior de los moldes mediante la técnica de estereoscopia, por el tipo de morfología que presenta pertenece al tipo de fractura dúctil. La fractura dúctil corresponde esencialmente a la grieta (zona oscura) que se origina después de que el material es sometido a una deformación plástica excesiva. Una característica de la fractura dúctil es la aparición de anillos concéntricos como la presencia de marcas o líneas de progreso de la grieta, conocidas también como “marcas de playa” este efecto es causado por el alto número de ciclos durante el proceso e indican la posición del inicio de la grieta.

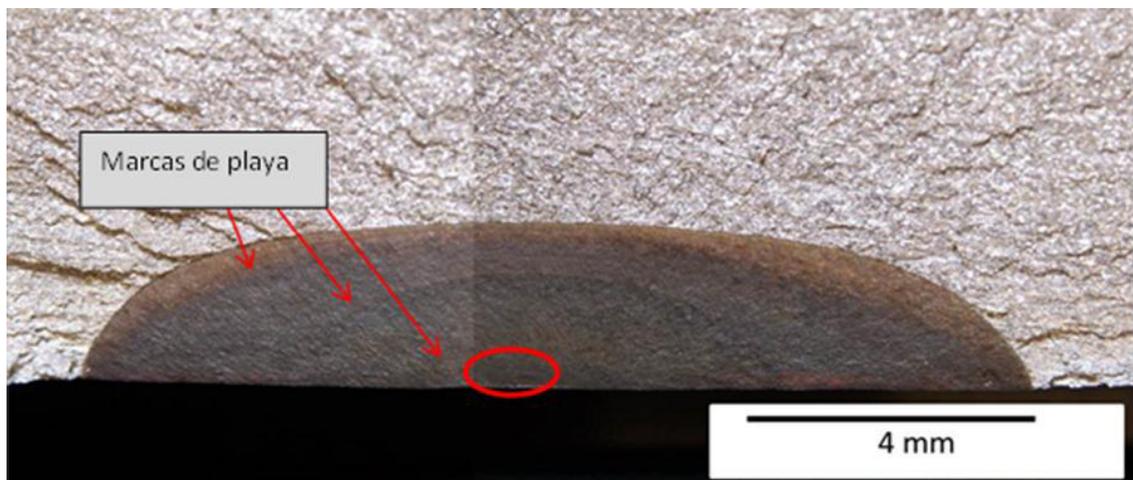


Figura 5.5 Fractografía del interior del molde.

Posteriormente al visualizar macroscópicamente se llevó la pieza mostrada de la zona marcada en la figura 5.5 a un análisis a nivel microscópico y se obtuvieron representaciones de la grieta al interior del molde con la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) puntualizando el origen de la falla como lo muestra la figura 5.6a) donde existen marcas radiales que indican el desplazamiento de la grieta. Mientras que en la figura 5.6b) el espécimen se aumentó a 100X, el cual mostrado en círculo rojo se puede apreciar el avance de la grieta debido a la deformación que experimenta durante los ciclos térmicos. Siguiendo sobre la misma marca de crecimiento de la grieta, en la

figura 5.6c) se observa un desplazamiento de la fractura en forma de dos capas semejando un escalonamiento. Con el objetivo de encontrar rasgos que indican crecimiento de la grieta por fatiga térmica el máximo aumento que fue posible alcanzar conservando nitidez y un buena resolución del espécimen fue de 800X mostrado en la figura 5.6d) sin embargo la presencian de estrías por fatiga no se lograron observar, aunque esto no descarta la posibilidad de que aún en mayores magnificaciones estas se pueden lograr apreciar.

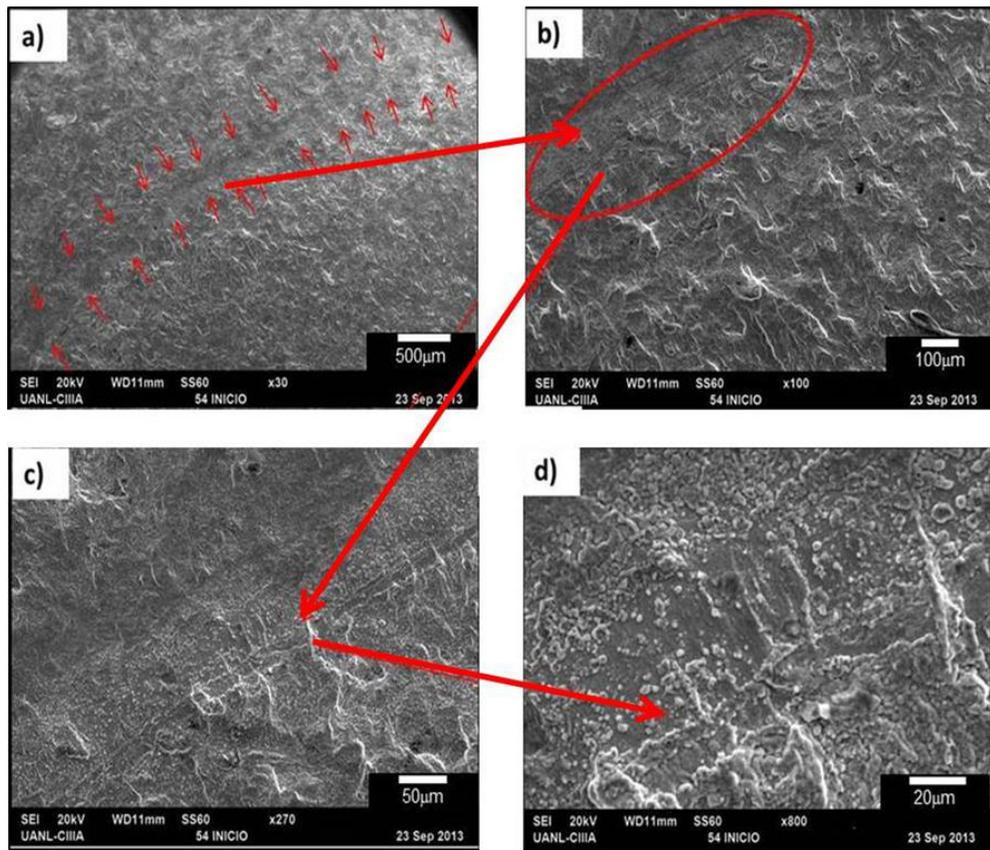


Figura. 5.6 a) Marcas de crecimiento de la grieta origen de la grieta, b) marcas radiales de avance 100x. c) marcas de avance 270x. d) avance de la grieta 800x.

5.5 Medición de profundidad de grieta.

La figura 5.7 muestra la gráfica de profundidad de grieta contra zona de grieta. Las mediciones obtenidas indican que el área correspondiente a la mitad de la

grieta exhibe el mayor valor obtenido con una longitud aproximada de 4.42 mm de profundidad, mientras esta disminuye conforme se aleja hacia los extremos de la grieta en la superficie, así como se muestra en la zona de un cuarto de grieta donde esta obtuvo una profundidad de 4.08mm y para el área

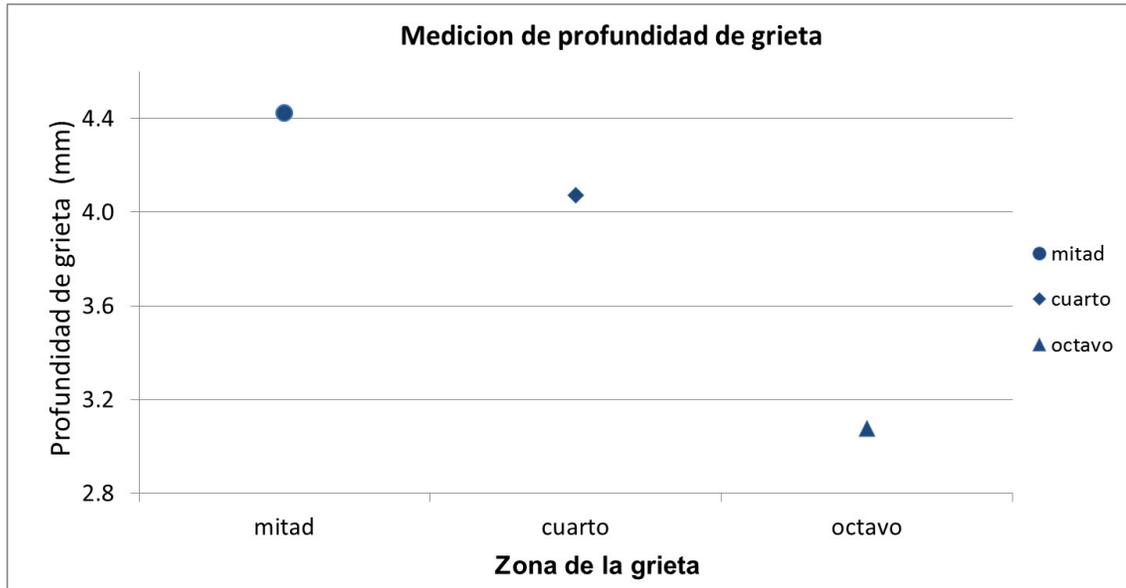


Figura 5.7. Medición de Profundidad de grietas

de un octavo de la grieta donde la profundidad aproximada corresponde a 3.07mm siendo la zona con menor profundidad, estos resultados muestran que la grieta crece a un tamaño considerado, el cual genera un enorme daño en las herramientas, como en los moldes, sin embargo estas longitudes alcanzadas pueden llegar a tener mayor profundidad si son expuestas a bruscos gradientes térmicos.

La profundidad de grieta es otro factor evaluado, la cual alcanzó una longitud máxima de 4.4mm de profundidad. En ensayos de fatiga térmica realizados por Maillot y colaboradores (8) inducen la formación de una red de grietas a partir de un gradiente de 150°C por 400,000 ciclos, la profundidad máxima obtenida fue de 2.5mm. Por lo tanto se puede deducir que por efectos de acondicionamiento térmico los valores de deformación son tan elevados que llegan a alcanzar zonas más internas en los moldes que lo reportado en esta

referencia. A comparación de esta referencia, la máxima cantidad de ciclos que se lograron obtener en los moldes fue de 96,000 una cantidad mucho menor a la reportada por Maillot, sin embargo las grietas que se obtuvieron en el presente trabajo difieren en la formación de una red de grietas en la superficie de los moldes, ó más bien a una única grieta que presenta un crecimiento muy notorio y aleatorio, esta grieta no presenta ramificaciones, ni crecimiento progresivo como lo es en el caso de fatiga térmica.

5.6 Análisis microestructural de moldes.

En la figura 5.8 se pueden ver uno de los principales resultados mediante las micrografías obtenidas mediante microscopía óptica de luz reflejada (MOLR) al ser preparada la muestra previamente con el reactivo Kallings1 para una mejor visualización de la microestructura de los aceros. En estas se observa que entre los moldes de acero inoxidable 431 No.2 y 72 existe discrepancia en la microestructura martensítica.

La fase martensita presenta una microestructura tetragonal de cuerpo centrado, provee alta dureza y resistencia al acero, la transformación martensítica se da sin difusión y se produce tras el enfriamiento a tasas suficientemente rápidas para suprimir la transformación controlada de la austenita, ferrita, perlita, bainita.

El molde No 2 figura 5.8 **a)**, muestra la matriz con la fase martensita en tono oscuro y una isla de fase ferrita delta en color blanco.

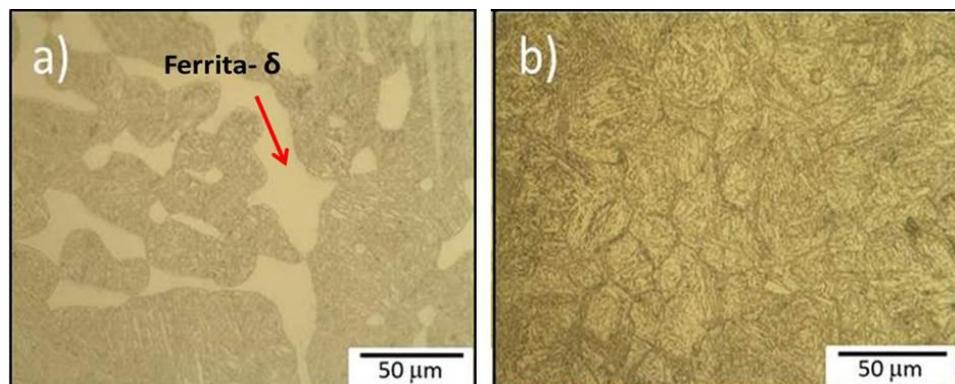


Figura 5.8. Discrepancia en microestructuras martensíticas a) Molde No 2 a 400x. b) Molde No. 72 400x.

La fase ferrita delta está caracterizada por presentar una estructura cubica centrada en el cuerpo comúnmente se forma a partir de la fase líquida durante el proceso de manufactura a una temperatura de 1100°C con contenido de 10% Cr y también a partir de los 400°C con 15% Cr, no obstante siendo la misma aleación del molde No.72. En la fig. 5.8 **b)** se observa una microestructura martensítica con límites de grano definidos, sin embargo la fase ferrita delta no está presente debido a que pudo haber tenido mejor control durante el tratamiento térmico en el proceso de manufactura.

Los cambios de microestructura en las zonas de la pared del molde por los ciclos térmicos del proceso de prensado se consideran descartados para los 5 moldes, sin embargo se encontró la presencia de una segunda fase que pertenece a ferrita delta para los moldes No. 2 en todas sus zonas de la pared, mientras que en los moldes No. 45, 54 y 87 esta fase solo aparece en la zona de superficie de trabajo como lo explica Shengzhi (11) donde hace un estudio similar y concluye que debido al trabajo en caliente como lo es la operación de prensado de vidrio, es imposible evitar la formación de la fase ferrita delta.

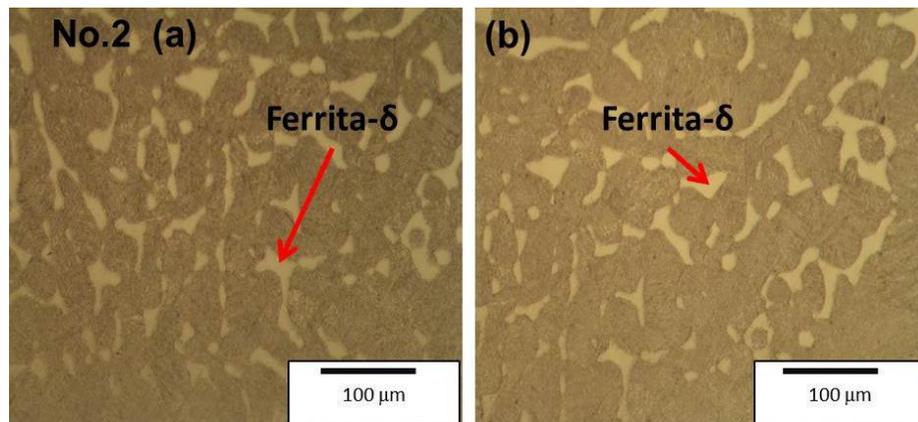


Figura 5.9 Micrografías de la zonas de pared del molde No 2 a 200x a) Superficie de trabajo b) Zona exterior del molde.

En estas micrografías del molde No.2 de superficie de trabajo donde se aprecian islas de ferrita delta en color blanco, que también se encuentran en la zona exterior de la pared del molde como se ve en la figura 5.9**b)**, donde se puede observar que no se encuentra un cambio en la microestructura, sin

embargo las mismas islas de delta ferita se encuentran presentes, esto se puede atribuir a una mala homogeneidad en la composición química o a un conjunto de variaciones durante el proceso de solidificación del acero y que lleva a la formación de esta fase (10-12), lo que se puede apreciar en ambas zonas.

Como se puede ver la función de los materiales está directamente relacionada a las propiedades y si se tiene un desequilibrio las fallas pueden aparecer antes de lo que en realidad se espera. Los principales hallazgos en la microestructura de los moldes es la presencia de fase ferrita delta en todo el volumen como se mostró en el molde No.2, esto asociado a una mala homogeneidad en la composición química y en conjunto a variaciones durante el proceso de solidificación del acero (10-12).

Para el molde No. 72 en la figura. 5.10**a)** y **b)**. En **a)** muestra la micrografía de la superficie de trabajo, mientras que la figura 5.10**b)** representa la zona exterior del molde donde se logra observar el mismo comportamiento microestructural sin mostrar cambios en cualquiera de las zonas, tampoco mostro presencia de otras fases dentro de la estructura martensítica que se hayan formado por la exposición de las temperaturas del proceso debido a los elementos contenidos en el material de acero.

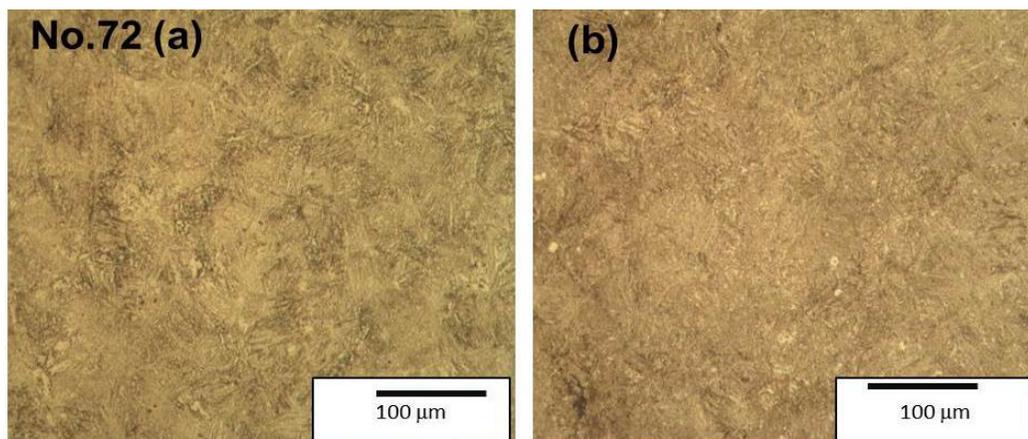


Figura 5.10 Zonas de la pared del molde No 72 a 200x a) Superficie de trabajo. b) zona exterior del molde.

En este caso el molde No.72 figura 5.10 **a)** y **b)** ambas zonas carecen de inconsistencia de microestructura, esto se puede atribuir a que pudo haber tenido un mayor control durante el tratamiento térmico en el proceso de manufactura del mismo, ya que la inconsistencia de composición química aunado con las variaciones de temperatura de proceso del prensado puede variar desde los 1100 - 500°C lo que puede llevar a la formación de la fase ferrita delta como lo fue en el caso del molde No.2, por otro lado el molde No.72 fue el segundo más bajo en la producción de piezas durante la experimentación en la línea.

En la Figura 5.11 se muestra la microestructura martensítica en oscuro del acero inoxidable 17-4 PH correspondiente a los moldes No 45 **a)**, 54 **b)** y 87 **c)** en los cuales se presenta la fase de delta ferrita como líneas blancas inmersas en las zonas aledañas de la superficie que está en contacto con los ciclos térmicos del proceso de prensado que van de 1100-500°C en el acondicionamiento térmico de la moldura hasta 550°C-330°C en la producción estable de vasos.

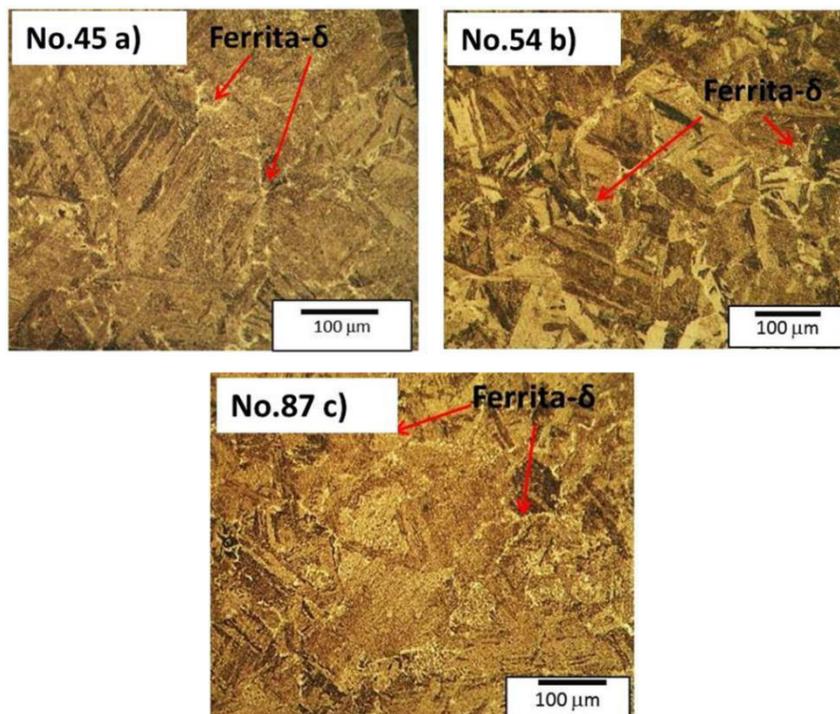


Figura 5.11 Micrografías de superficies de moldes **a)** No 45, **b)** No.54 y **c)** No 87 a 200x a) Superficie de trabajo 200x .

Este comportamiento también lo describe Shengzhi (12), ya que en su trabajo comenta que la fase ferrita delta se puede formar durante el trabajo en caliente, como se observó también en los moldes No. 45, 54 y 87 que solo se tiene la presencia de esta fase en zonas de la superficie de trabajo donde se experimentan de mayor forma las altas temperaturas de hasta 1100°C durante el acondicionamiento térmico y el proceso de producción estable. La figura 5.12 muestra el diagrama de fases de algunos aceros inoxidable martensíticos donde se pueden ver las temperaturas y composiciones de la formación de la fase ferrita delta, la cual puede aparecer desde temperaturas de 400°C.

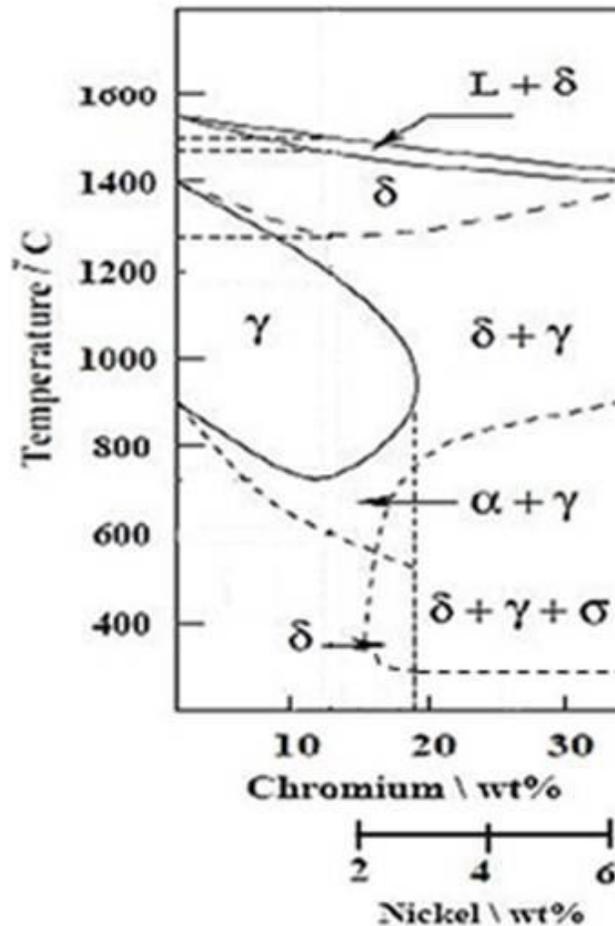


Figura 5.12 Diagrama de fases de acero inoxidable martensítico

Por otra parte la aparición de esta fase no es deseada ya que provoca una reducción en las propiedades mecánicas como dureza, tenacidad y resistencia mecánica (13), y es la principal causante de la formación de grietas (14).

En la figura 5.13 **a)**, **b)** y **c)** se muestran las zonas de la pared exterior de los moldes. **a)** 45, **b)** No.54, y **c)** No.87, en esta zona la temperatura máxima alcanza aproximadamente los 290°C, además en estas zonas no tienen contacto con las temperaturas del proceso, se comprueba la inexistencia de cambios de la estructura martensítica de manera que presenta una microestructura de comportamiento muy homogéneo. Esto también se puede fundamentar en el diagrama de la formación de fases en el acero donde a 290°C no existe fase ferrita delta.

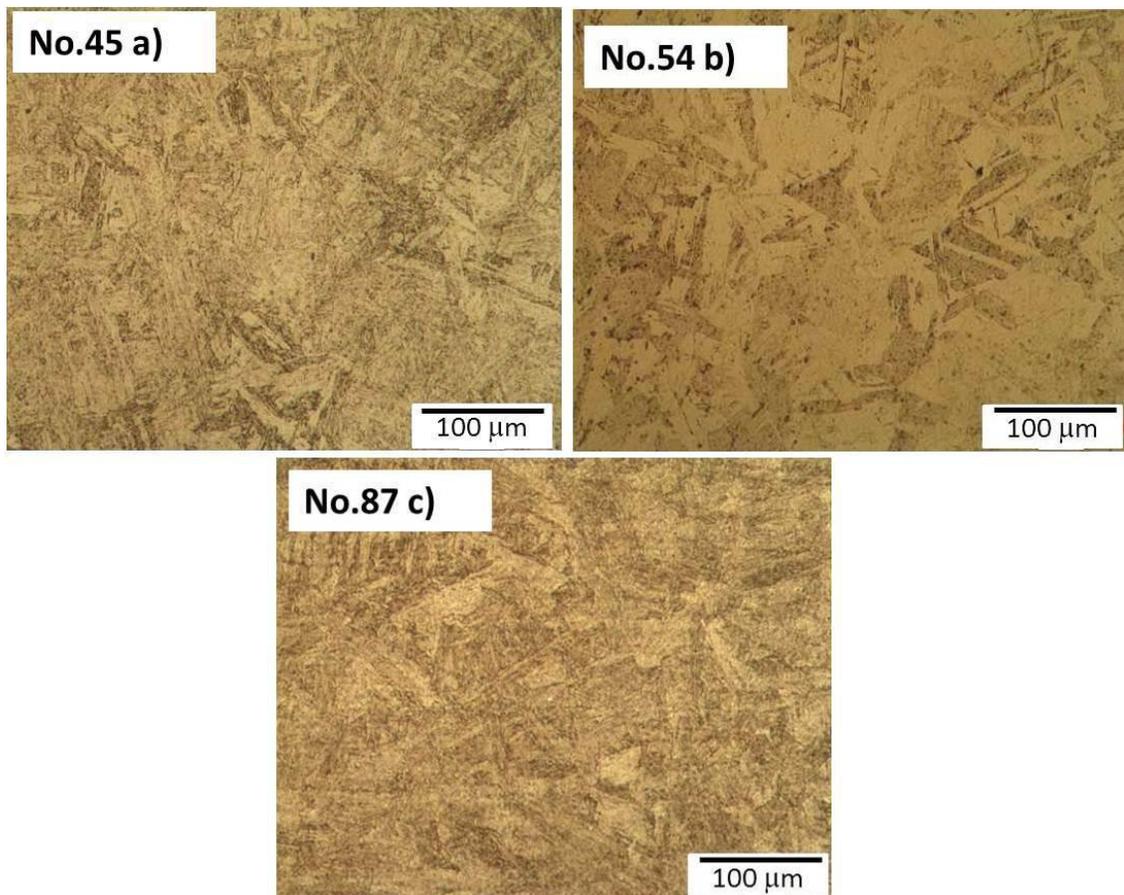


Figura 5.13 Zona exterior de la pared de moldes **a)** No 45, **b)** No.54 **c)** No, 87

PHS. Cardoso y colaboradores (14). indujeron esta fase en muestras para ensayos de torsión y dedujo que la presencia de ferrita delta tiene un impacto negativo, deteriorando la microestructura y las propiedades mecánicas de los acero inoxidable martensíticos De tal manera que con esto se asume que los moldes No.72, 45, 54 y 87 que son más susceptibles a la formación de esta fase por lo que son más propensos al agrietamiento durante al acondicionamiento térmico previo al proceso de prensado donde las temperaturas son las más elevadas llegando a alcanzar hasta los 1100°C.

5.7 Análisis de Microdurezas.

El grafico 5.14 se realizó graficando dureza contra espacios de la zona de la pared del molde, donde se puede observar que el comportamiento de la perdida de dureza es lineal. La superficie expuesta al trabajo tiende en mayor parte a perder esta propiedad en ambos materiales, mientras que la dureza se puede llegar a conservar en altos nivel en la zona que no interactúa con los ciclos térmicos, sin embargo los aceros inoxidable 431 muestran aún menor dureza que los aceros de tipo 17-4PH. La pérdida de dureza es debida principalmente en la superficie de trabajo ya que se encuentra expuesta a los ciclos térmicos y a la variación de temperatura que ocasionan el crecimiento de grano el cual está ligado fuertemente a las propiedades mecánicas como la resistencia y la dureza.

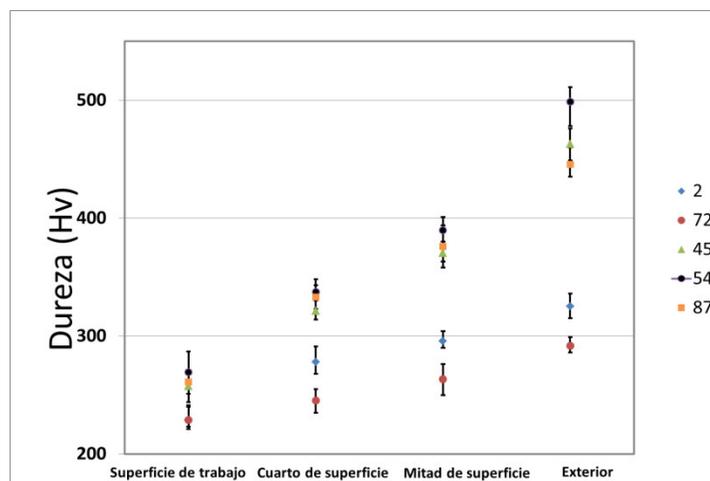


Figura. 5.14. Perfil de durezas en las zonas de la pared del moldes

En la tabla V.3 se presentan los promedios de microdureza Vickers tomadas en las cuatro zonas de la pared del molde, se puede observar que en la zona de la superficie la dureza disminuye llegando a un valor promedio de 240Hv, mientras que en la zona del exterior de los aceros 17-4PH pueden alcanzar 500Hv por otro lado la perdida de dureza promedio en los moldes resulto ser de 155Hv. El resultado de la perdida de la dureza en la superficie de los moldes puede propiciar a un decremento en la tenacidad del acero la cual es la resistencia a la formacion y crecimiento de las grietas, por lo tanto un equilibrio en la dureza tambien repercute positivamente en el retraso de la formacion de fracturas lo que prolonga la vida útil de los moldes.

Tabla V.3 Promedio de durezas en zonas del molde.

No molde	Promedio de dureza vickers de zonas			
	Superficie	1/4 de sup	1/2 de sup	Exterior
87	261.2	333	341	445.71
72	228.6	245.14	263.28	291.71
2	228.9	277.86	295.71	325.29
54	269.3	337.429	389.571	498.714
45	257.6	321.28	370.28	462.71

5.8 Evolución de grietas.

En la figura 5.15 se graficó el crecimiento de la grieta en la superficie de los moldes contra las piezas prensadas, donde se puede observar en los tres moldes la primera pendiente para cada uno de los moldes corresponde a un paro de línea, donde la grieta creció exponencialmente al ser sometido a un precalentamiento a las 29,000 piezas, una vez retomado la temperatura de proceso estable, el crecimiento de la grieta se ve disminuido a la mitad, para después terminar la primera carrera

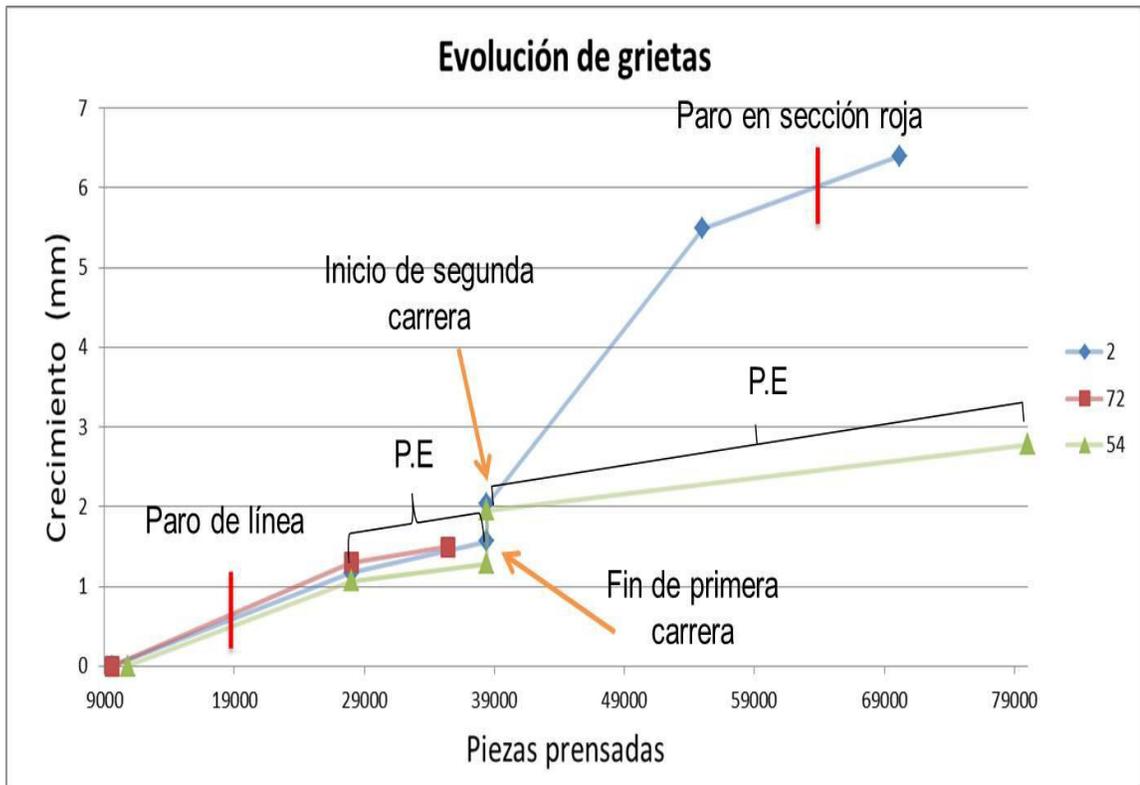


Figura 5.15 Evolucion de grietas.

En el inicio de la segunda carrera se puede observar un crecimiento de la grieta, generado por la técnica de precalentamiento de los moldes. Para el molde No 54 se observa que no existió una interrupción durante el proceso de prensado por lo cual no existe un crecimiento muy marcado de tal manera que el crecimiento de la grieta fue menor que al iniciar la carrera, sin embargo para el molde No.2 se puede observar que experimentó un paro de sección provocando un enfriamiento que propició un crecimiento de la grieta al ser sometido al precalentamiento de las 69,000 piezas. Obtenidos estos resultados se observó que durante el proceso de precalentamiento de moldes el crecimiento de la grieta puede alcanzar hasta 1.3mm en un ciclo, mientras que manteniendo una producción estable estas grietas pueden crecer hasta 0.2 mm cada 10,000 ciclos.

Capítulo VI. Conclusiones

- Los aceros inoxidables 431 para los moldes No.2 y 72 y 17-4PH para los moldes No.45, 54 y 87 son utilizados en la industria de vidrio prensado, sin embargo al ser sometidos a cambios drásticos de temperatura ambos materiales presentan el mismo tipo de agrietamiento.
- Las técnicas de tasa de crecimiento de grieta y análisis de falla, se concluyen diciendo que el choque térmico es el factor principal en la disminución de vida útil del molde para ambos tipos de aceros.
- El agrietamiento de los moldes se genera en la etapa del acondicionamiento térmico previo al proceso de prensado, debido a que estos son sometidos con el vidrio durante un tiempo de 20 minutos donde se experimentan niveles altos de deformación.
- La velocidad de crecimiento de la grieta durante la producción estable se ve reducida a la mitad en comparación a la etapa del acondicionamiento térmico debido a que los esfuerzos generados no sobrepasan el límite elástico del material, sin embargo con el paso de los ciclos estas grietas crecen por fenómeno de fluencia.
- La mayor pérdida de dureza se da principalmente en la superficie de trabajo y se debe a la exposición prolongada y a las fluctuaciones de las altas temperaturas durante los ciclos de operación.
- La aparición de la fase ferrita delta en los moldes debilita las propiedades mecánicas haciendo susceptible así la formación y crecimiento de grietas. El molde que mayor formación de ferrita delta tubo fue el molde No 2 pues se encontró tanto en la zona de la superficie de trabajo como en la superficie externa de la pared, mientras que los moldes No 45, 54 y 87 esta fase solo apareció en la superficie de trabajo.
- La aleación de acero 17-4PH fue el que presento mejor comportamiento respecto a dureza, sin embargo ambos aceros (17-4PH y 431) sufrieron disminución de esta propiedad y como la formación de esta fase delta ferrita está relacionada a esta propiedad esto influye directamente con la

tenacidad a la fractura y por consecuencia si esta fase no se forma ayuda a que los moldes aumenten su vida útil.

Recomendaciones futuras.

- Un precalentamiento gradual puede significar la extensión de la vida útil de los moldes reduciendo los gradientes térmicos bruscos
- Se debe solicitar a los proveedores de las molduras que se controle el tratamiento térmico y la composición química de los aceros inoxidables.
- El pulido puede ser omitido para el tipo de calidad de estos artículos de tal manera que contribuye favorablemente para conservar las dimensiones de los moldes.
- Para artículos de baja calidad se pueden utilizar aleaciones para trabajo en caliente como son la serie H (aceros grado herramienta para trabajo en caliente), ya que tienen mejores propiedades a las condiciones que se encuentran durante el proceso de prensado y la calidad del acabado no es lo más requerido.

Referencias bibliográficas.

1. *Raquel Mendoza Resendez. Tesis "Impacto de la transferencia de calor por radiación en las propiedades del vidrio calizo durante el formado de contenedores vítreos. 1998.*
2. *Fernández Navarro J.M "El Vidrio" Instituto de Cerámica y Vidrio. Madrid 1985.*
3. *Información interna de Crasa Libbey México 2013*
4. *Thermal cycling experiments for glass moulds surface texture lifetime prediction – Evaluation with the help of statistical techniques. A.N. Akdogan a, M.N. Durakbasa b,*. 2005*
5. *Thermo-mechanical stresses in cast steel dies during glass pressing process. G. Dusserre *, F. Schmidt, G. Dour, G. Bernhart. 2005*
6. *Heat transfer analysis and material behavior of martensitic steel during thermal cycling process- A. Akdogan* and A. Koyun. 2007*
7. *Thermal fatigue crack growth in stainless steel. M. Kadlec a,*, P. Haušild a, J. Siegl a, A. Materna a, J. Bystrianský 2012,*
8. *Thermal fatigue of stainless steels. Bystrianský J.1, Siegl J.2, Haušid P.2, Strnadel B.3. 2005*
9. *Thermal fatigue crack networks parameters and stability: an experimental study. V. Maillot, A. Fissolo, G. Degallaix, S. Degallaix 2004*
10. *Effect of delta ferrite on impact properties of low carbon 13Cr–4Ni martensitic stainless steel. P. Wang, S.P. Lu, N.M. Xiao, D.Z. Li *, Y.Y. Li. 2010*
11. *ASM Metals Handbook Volume 09 - Metallography And Microstruct*
12. *Microstructural evolution of delta ferrite in SAVE12 steel under heat treatment and short-term creep Shengzhi Lia, 1, Zumrat Eliniyaza, Lanting Zhanga, 1, Feng Suna, 1, Yinzhong Shenb, 2, Aidang Shana. 2012*

13. *Influence of austenitizing temperature on microstructure and mechanical properties of AISI 431 martensitic stainless steel electron beam welds. A. Rajasekhar a,* , G. Madhusudhan Reddy b, T. Mohandas b, V.S.R. Murti a. 2008*
14. *The influence of delta ferrite in the AISI 416 stainless steel hot Workability P.H.S. Cardoso a, C. Kwietniewski b,* , J.P. Porto a, A. Reguly a, T.R. Strohaecker a. 2001*
15. *Failure analysis of H13 working die used in plastic injection moulding. D. Papageorgiou a,b, C. Medrea a,†, N. Kyriakou 2013*

Lista de figuras

Figura 1.1 a) Representación esquemática de una red cristalina de SiO ₂ b) Retículo al azar de sílice vítreo	5
Figura 1.2 Vista de corte transversal de ensamble de molde en general a) Inserto-molde b) Canasta c) Base.	6
Figura 1.3 Grietas presentes en la superficie y en pared de molde.....	7
Figura 1.4 Diferencia entre molde nuevo (izquierdo) y Moldes recorrido en dimensiones (derecho)	8
Figura 1.5 Lavado de moldes	9
Figura 1.6 Primera revisión.....	10
Figura 1.7 Pulido de superficie de moldes	11
Figura 1.8 Segunda Revisión.....	12
Figura 1.8 Proceso de vidrio prensado	13
Figura 4.2 Pistola de fluorescencia de rayos X.....	22
Figura 4.3 Estereoscopio Nikon SMZ 745T	23
Figura 4.4 Microscopio electrónico de barrido(MEB) Jeol JSM-6510LV	24
Figura 4.5 a) Equipo de medición Quadracheck. b) Microscopio Nikon LV-EPILED	24
Figura. 4.6. Secciones de corte de la grieta.....	25
Figura.4.7. a) Esquema de corte de muestras del molde. b) Cortadora Struers Discotom-60. c) Prensa Struers Labopress-1.	26
Figura 4.8. a) Secciones analizadas. b) Microscopio Nikon Epiphot.	27
Figura 4.9. a) Durómetro Vickers Shimadzu HMV-2T, b) Esquema de mediciones de durezas.	28
Figura 4.10. Líquido y hojas adhesivas de técnica de réplicas metalográficas.	29
Figura 5.1 Rango de temperaturas registradas en proceso de prensado	31
Figura 5.2 Molde con grieta en superficie de trabajo	32
Figura 5.3 a) Grieta en superficie del molde No 2. b) Grieta en molde No 72 35	
Figura 5.4 Grietas en moldes de acero inoxidable 17-4PH, a) Molde No. 87, b) Molde No. 54 y c) Molde No 45	36

Figura 5.5 Fractografía del interior del molde.	37
Figura. 5.6 a) Marcas de crecimiento de la grieta origen de la grieta, b) marcas radiales de avance 100x. c) marcas de avance 270x. d) avance de la grieta 800x.	38
Figura 5.7 Medición de Profundidad de grietas	39
Figura 5.8 Discrepancia en microestructuras martensíticas a) Molde No 2 a 400x. b) Molde No. 72 400x.	40
Figura 5.9 Micrografías de la zonas de pared del molde No 2 a 200x a) Superficie de trabajo b) Zona exterior del molde.	41
Figura 5.10 Zonas de la pared del molde No 72 a 200x a) Superficie de trabajo. b) zona exterior del molde.	42
Figura 5.11 Micrografías de superficies de moldes a) No 45, b) No.54 y c) No 87 a 200x a) Superficie de trabajo 200x	43
Figura 5.12 Diagrama de fases de acero inoxidable martensítico	44
Figura. 5.14. Perfil de durezas en las zonas de la pared del moldes.....	46
Figura 5.15 Evolucion de grietas.....	48

Lista de Tablas

Tabla IV.1 Piezas prensadas de moldes.....	22
Tabla V.1 Composición química acero inoxidable 431.....	33
Tabla V.2 Composición química acero inoxidable 17-4PH.....	34
Tabla V.3 Promedio de durezas en zonas del molde.....	47

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Tomás Gerardo Cavazos Solis

Nació en la ciudad de San Nicolas de los Garza, Nuevo Leon, el 27 de Abril de 1989, hijo del Sr. Tomás Cavazos Oviedo y la Sra. Maria Beatríz Solis Segovia. Egresado de la carrera Ingeniero en Materiales por la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo Leon (UANL), graduado en Junio de 2011. Realizo prácticas profesionales en el departamento de calidad en la empresa Ficosa de Norte América en 2009. En 2010 en la empresa Forja de Monterrey en el departamento de calidad y servicio social en la Facultad de Ingenieria Mecánica y Eléctrica.

Ingresó a la Maestría en Enero de 2012 al Posgrado en Ciencias y Tecnología Cerámica con orientación a Vidrio en el programa entre La Universidad Autónoma de Nuevo León y la Empresa Crisa Libbey con el proyecto Organización Robusta.

Actualmente se desempeña en la empresa Crisa-Libbey México como Ingeniero de materiales y proyectos, en el cual es responsable de la coordinación de proyectos de pruebas e investigación de materiales para moldes.