



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES
ENERGÍA - FOTOTÉRMICA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE MATERIALES SOLARES
SOMETIDOS A ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR EN RECEPTORES SOLARES DE
TORRE CENTRAL**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA - ENERGÍA**

**PRESENTA:
OMAR ALVAREZ BRITO**

**TUTOR PRINCIPAL
DR. ARMANDO ROJAS MORÍN, CENTRO DE INGENIERÍA AVANZADA, UNAM**

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
**DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES, INSTITUTO DE ENERGÍAS
RENOVABLES, UNAM**
**DR. ARTURO BARBA PINGARRÓN, CENTRO DE INGENIERÍA DE SUPERFICIES Y
ACABADOS, UNAM**
**DR. RICARDO GÁNEM CORVERA, INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**
**DRA. HEIDI ISABEL VILLAFÁN VIDALES, INSTITUTO DE ENERGÍAS
RENOVABLES, UNAM**

TEMIXCO, MORELOS, MÉXICO. NOVIEMBRE 2018.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado

Presidente:

Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes
Universidad Nacional Autónoma de México

Primer Vocal:

Dr. Arturo Barba Pingarrón
Universidad Nacional Autónoma de México

Segundo Vocal:

Dr. Armando Rojas Morín
Universidad Nacional Autónoma de México

Tercer Vocal:

Dr. Ricardo Gánem Corvera
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Secretaria:

Dra. Heidi Isabel Villafán Vidales
Universidad Nacional Autónoma de México

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Energías Renovables, Temixco, Morelos, México.

Tutor de tesis:

Dr. Armando Rojas Morín

Fecha:

Contenido

Agradecimientos	5
Resumen.....	6
Abstract	8
Nomenclatura.....	10
Capítulo 1. Objetivos.....	11
Objetivo general.	11
Objetivos específicos.	11
Capítulo 2. Antecedentes.....	12
2.1. Estudios e investigaciones de fatiga en materiales por métodos de calentamiento convencionales	14
2.2. Investigaciones en el campo de manufactura y procesamiento de materiales mediante energía solar concentrada.	21
2.3. Investigaciones realizadas en torno al tratamiento térmico y afectaciones de aceros al carbono irradiados por ISC.....	23
2.4. Investigaciones relacionadas con los transitorios en los receptores solares.	27
2.5. Investigaciones relacionadas con instalaciones de irradiación solar concentrada	31
2.6. Investigaciones relativas a materiales de receptores de torres centrales	32
2.7. Investigaciones relativas a análisis de calor en receptores y elementos de receptores de ISC	39
2.8. Estudios relativos a las afectaciones microestructurales en materiales con tratamientos térmicos de índole convencional.....	41
Capítulo 3. Definición del problema.....	44
Capítulo 4. Método.	50
4.1. Análisis de transformación de propiedades mecánicas en las probetas de acero inoxidable 316 por método de tracción monotónica.....	50
4.1.1. Curva de esfuerzo contra deformación verdaderos; trazo de la curva fluencia.	50
4.1.2. Descripción de la metodología de análisis.	50
4.1.3. La inestabilidad en la prueba de tensión monotónica.	53
4.2. Modelo numérico realizado en COMSOL MULTIPHYSICS®, para determinar campo térmico y de esfuerzos principales en probetas de acero inoxidable 316.	56
4.2.1 Trazado de rayos para modelo de calor de probetas de acero inoxidable 316 expuestas al flujo radiativo concentrado.	59
4.2.2 Modelo, ecuaciones y condiciones de frontera para el análisis de termomecánico.....	64

4.3	Resultados del análisis térmico de las probetas cilíndricas tubulares de acero inoxidable 316 de condiciones supuestas para el HoSIER.....	67
4.4	Realización experimental de la exposición de las probetas en el HoSIER, UNAM.....	74
4.4.1.	Ciclos térmicos de las probetas de acero inoxidable 316 en el HoSIER.	79
Capítulo 5. Análisis de resultados de las pruebas realizadas a los materiales expuestos a irradiación solar.....		90
5.1.	Ensayo de tracción monotónica.....	90
5.2.	Estudios micrográficos ópticos de las probetas.	93
5.3.	Estudio micrográfico electrónico de las probetas.....	99
Capítulo 6. Conclusiones.		111
6.1.	Trabajos a futuro.	112
Referencias.....		114
Apéndice A. Modelo del receptor cilíndrico de superficie externa con diámetro de 12.7 mm, para el software SolTrace® de NREL®.....		119
Apéndice B. Tablas de flujos radiativos a las distancias de 50 mm y 60 mm detrás del punto focal para un receptor con diámetro de 12.7 mm.....		120
Apéndice C. Publicaciones y ponencias como producto del trabajo de investigación.		123
C.1.	Publicaciones en revistas especializadas con arbitraje en <i>Journal Citation Reports</i>	123
C.2.	Publicaciones en revistas especializadas con arbitraje	123
C.3.	Publicaciones en congresos	123
C.4.	Otras ponencias.....	124

Agradecimientos

Investigación realizada gracias al programa de financiamiento educativo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IT101318 "Desarrollo de Tecnologías de Superficie para la Optimización de Componentes y Sistemas".

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IN115416, ya que el mismo ha sido fundamental en la preparación del protocolo experimental presentado.

Agradecimientos especiales por contribución.

Al Dr. Jorge Alvarez Díaz. Por su fundamental guía en el desarrollo de análisis de resultados y ejecución de los mismos, en el Laboratorio de Física del Campus Cuernavaca del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Al Dr. Carlos Alberto Pérez Rábago. Por su fundamental contribución al desarrollo experimental completo del presente trabajo en el sistema de flujo radiativo concentrado, en el Instituto de Energías Renovables, UNAM

A la Mtra. María Luisa Ramón García. Por su fundamental contribución al análisis de resultados difractométricos de cristales en el Departamento de Materiales Solares, Instituto de Energías Renovables, UNAM

Al Mtro. Eliezer Hernández Mecinas. Por su fundamental contribución a la realización de los ensayos mecánicos en el Laboratorio de Pruebas Mecánicas, Ciudad Universitaria, UNAM

Al Ing. Jorge Luis Romero Hernández. Por su fundamental contribución al análisis de resultados de microscopía electrónica de barrido y análisis de energía dispersiva en DIMEI, Ciudad Universitaria, UNAM

Al Mtro. José Campos Álvarez. Por su fundamental contribución al análisis de resultados de microscopía electrónica de barrido en el Departamento de Materiales Solares, Instituto de Energías Renovables, UNAM

Resumen

El presente trabajo aporta información en el tema de aprovechamiento de energía solar fototérmica, así como las implicaciones de las características de la exposición al flujo radiativo y del propio flujo radiativo sobre algunos materiales metálicos. Es bien conocido, que los receptores sólidos de irradiación solar concentrada constituyen un elemento del que se exige un alto desempeño foto-termomecánico. Esta situación se debe a una diversidad de factores bien definidos, pero son particulares a los dispositivos utilizados y a la región del mundo donde se utiliza, así como las características meteorológicas presentes y las características mismas del espectro radiativo solar.

El flujo radiativo solar concentrado, requiere de la utilización de dispositivos ópticos para obtenerlo, ya sean instrumentos de reflexión o de refracción. En ambos casos –si no existe un homogeneizador-, el flujo solar concentrado obtenido no tiene una intensidad uniforme en toda su área, dando lugar a gradientes de flujo radiativo que incide sobre los materiales sólidos; a su vez, estos gradientes generan, en principio, un campo de temperaturas no uniforme sobre el receptor, lo que conduce a que exista un campo de temperaturas con magnitudes desiguales distribuidas en la superficie del material y junto con este, un campo de deformaciones que se traduce finalmente un campo de esfuerzos en el material.

Las investigaciones actuales reconocen que los materiales metálicos se comportan diferente frente al flujo radiativo concentrado: la absorptividad al espectro solar, al igual que las propiedades de transporte (i.e. conductividad térmica) y de expansión térmica; dando lugar, con la combinación de estos factores, a campos térmicos que generan campos de esfuerzo diferentes cuando se trata de un material expuesto u otro, obteniendo así un primer agente transformador de las propiedades termofísicas del material.

Abundando, otras investigaciones encuentran que los metales tienen una absorptividad alta en el espectro solar y que ésta misma tiene una acción *foto-activadora* de los procesos que ocurren no solamente en el calentamiento sino por efecto de la radiación incidente. Se encuentran beneficios y perjuicios dependiendo de los efectos últimos en los que se tenga interés. El espectro radiativo solar que llega a la superficie terrestre se encuentra compuesto por radiación infrarroja, las componentes del espectro visible y algunas fracciones de radiación ultravioleta; es esta última la que hace que exista un efecto foto activador de algunos procesos de transformación de las soluciones sólidas de los materiales metálicos (fenómenos de alotropía), incentivación de difusión de especies, e incluso activación de la cinética química de reacciones que tienen lugar en la superficie de los materiales metálicos y que puede incluso difundirse al interior en el resto del material. Se ha expuesto pues, que esto puede ser benéfico

en campos tales como el de la manufactura, ya que alguna mejoras en propiedades mecánicas se consiguen por difusión de especies, reacciones químicas en las superficies de los metales y generación de compuestos intermetálicos (i.e. mejora de la dureza y resistencia a la corrosión); obteniendo estas deseables propiedades en menor tiempo cuando se compara con los métodos convencionales de tratamiento térmico en mufla y los tratamientos superficiales con láser, debidos al espectro solar sine qua non es posible tener calentamientos más rápidos, activación a menor temperatura y menores tiempo de tratamiento. Sin embargo, estos efectos pueden ser nocivos cuando se lo deseable es prolongar la vida útil de estos componentes. La transformación de propiedades mecánicas y la generación de compuestos intermetálicos, se traduce en que el metal obtenga un perfil transformado de dureza superficial, tenacidad y/o susceptibilidad al ataque químico. Pueden entonces presentarse características indeseables debidas a la transformación de propiedades, i.e. un esfuerzo que se presente de manera abrupta, es entonces capaz de iniciar grietas superficiales o conseguir el crecimiento de las mismas; comprometiendo la vida útil de los componentes mecánicos y los beneficios económicos relacionados.

Finalmente, el tercer y último factor presente, es agregado por la situación meteorológica; en la que tienen lugar diferentes niveles de irradiación en la superficie terrestre, interrupciones en la energía solar aprovechable debido a las nubosidades, así como el ciclo natural de día y noche que obliga a los sistemas de aprovechamiento de energía solar concentrada a tener paros operativos, al menos en la sección del sistema que comprende al receptor solar. Estos ciclos de baja o larga duración por su parte, hacen que los campos termo-mecánicos de esfuerzo que se obtienen en los materiales metálicos sean también de naturaleza cíclica, dificultando así el control de la operatividad de la planta; pero incidiendo en una degradación mecánica que llama mucho la atención a las investigaciones actuales en tanto que compromete inevitablemente la vida útil de los componentes mecánicos de los receptores, conocido como fatiga mecánica. La fatiga mecánica es responsable de que los elementos componentes de los sistemas mecánicos tengan una vida limitada, aun cuando los esfuerzos que resultan mantengan su magnitud incluso por debajo del esfuerzo de fluencia de los materiales, dado su carácter acumulativo.

Por lo anterior el presente estudio plantea reconocer cuantitativamente la degradación de las propiedades mecánicas de los materiales metálicos por efecto de la combinación y sinergia de los agentes que aquí se exponen. Al tiempo se desean reconocer cualitativamente las transformaciones presentes en el material como producto de la combinación de los fenómenos o su influencia de manera aislada a fin de determinar si la degradación de los materiales expuestos tiene influencia por algún efecto alotrópico y cuáles serán los posibles impactos considerables por los efectos resultantes.

Abstract

The present work provides information on the use of photothermal solar energy, as well as the implications of the characteristics of the exposure to the radiative flow and the own radiative flow itself on some metallic materials. It is well known that solid solids for concentrated solar irradiation constitute an element that demands a high photo-thermo-mechanical performance. This situation is due to a diversity of well-defined factors, but they are specific to the devices used and to the region of the world where it is used, as well as the present meteorological characteristics and the very characteristics of the solar radiative spectrum.

The concentrated solar radiative flow requires the use of optical devices to obtain it, whether they are reflection or refraction instruments. In both cases -if there is no homogenizer-, the concentrated solar flux obtained does not have a uniform intensity in all its area, giving rise to gradients of radiative flow that impinges on the solid materials; in turn, these gradients generate, in principle, a non-uniform temperature field on the receiver, which leads to a temperature field with unequal magnitudes distributed on the surface of the material and, together with this, a strain field which causes a stress field.

Current research recognizes that metal materials behave differently from concentrated radiative flow: absorptivity to the solar spectrum, as well as the properties of transport (i.e. thermal conductivity) and thermal expansion; giving rise, with the combination of these factors, to thermal fields that generate different stress fields when dealing with an exposed or other material, thus obtaining a first transforming agent of the thermo-physical properties of the material.

Moreover, other investigations find that metals have a high absorptivity in the solar spectrum and that this same one has a photo-activating action of the processes that occur not only in the heating but by effect of the incident radiation. Benefits and losses are found depending on the interested ultimate effects. The solar radiative spectrum that reaches the Earth's surface is composed of infrared radiation, the components of the visible spectrum and some fractions of ultraviolet radiation; it is the latter that causes a photo-activating effect of some transformation processes of the solid solutions of metallic materials (allotropy phenomena), incentivation of species diffusion, and even activation of the chemical kinetics of reactions that take place in the surface of the metallic materials and that can even disseminate (diffusive effect) to the interior in the rest of the material. It has been explained that this can be beneficial in fields such as manufacturing, since some improvements in mechanical properties are achieved by diffusion of species, chemical reactions on the surfaces of metals and generation of

intermetallic compounds (i.e. improvement of the hardness and resistance to corrosion); obtaining these desirable properties in less time when compared with conventional methods of heat treatment in muffle and surface treatments with laser, due to the solar spectrum sine qua non it is possible to have faster heating, activation at lower temperature and shorter treatment time. However, these effects can be harmful when it is desirable to extend the useful life of these components. The transformation of mechanical properties and the generation of intermetallic compounds, results in the metal obtaining a transformed profile of surface hardness, tenacity and/or susceptibility to chemical attack. Undesirable characteristics may then arise due to the transformation of properties, i.e. an effort that occurs abruptly, is then able to initiate surface cracks or achieve the growth of those; compromising the useful life of the mechanical components and the related economic benefits.

Finally, the third and last factor present is added by the meteorological situation; in which different levels of irradiation take place on the earth's surface, interruptions in the useable solar energy due to cloud cover, as well as the natural day and night cycle that forces concentrated solar energy systems to have operational shutdowns, at least in the section of the system comprising the solar receiver. These cycles of low or long duration, on the other hand, mean that the thermo-mechanical fields of stress obtained in metallic materials are also of a cyclical nature, thus making it difficult to control the operability of the plant; but implying a mechanical degradation that calls a lot the attention to the current investigations while it inevitably compromises the useful life of the mechanical components of the receivers, known as mechanical fatigue. Mechanical fatigue is responsible for the fact that the component elements of mechanical systems have a limited life, even when the efforts that result maintain their magnitude even below the yield stress of the materials, given the cumulative nature.

Therefore, the present study proposes quantitatively recognizing the degradation of the mechanical properties of metallic materials due to the combination and synergy of the agents exposed here. At the same time it is the objective to recognize qualitatively the transformations present in the material as a result of the combination of the phenomena or their influence in an isolated way in order to determine if the degradation of the exposed materials is influenced by an allotropic effect and what will be the possible considerable impacts for the resulting effects.

Nomenclatura

La siguiente simbología es utilizada en el presente trabajo. Los símbolos que aparecen sin unidades físicas son adimensionales o direcciones vectoriales.

A Área instantánea donde se aplica la carga mecánica (fuerza) [m^2]	u_z Velocidad de deformación en la dirección z [$m s^{-1}$]
A_0 Área inicial donde se aplica la carga mecánica (fuerza) [m^2]	x Dirección X para las coordenadas rectangulares
A_u Área transversal de una probeta en la fractura [m^2]	y Dirección Y para las coordenadas rectangulares
c_p Capacidad calorífica con dependencia temporal [$Jkg^{-1}K^{-1}$]	z Dirección Z para las coordenadas rectangulares
E Módulo elástico [MPa]	α Absortividad del acero inoxidable AISI 316 sin dependencia térmica o temporal en el espectro solar
h Coeficiente convectivo [$Wm^{-2}K^{-1}$]	e Deformación ingenieril [$mm mm^{-1}$]
k Conductividad térmica con dependencia temporal [$Wm^{-1}K$]	e_u Deformación ingenieril última (a la fractura) [$mm mm^{-1}$]
K Coeficiente de resistencia [MPa]	ε Deformación verdadera
L Longitud instantánea de las probetas ante estudios mecánicos [m]	ε_u Deformación verdadera última (a la fractura)
L_0 Longitud inicial de las probetas ante estudios mecánicos [m]	ε_r emisividad del AISI 316 sin dependencia térmica ni temporal
n Exponente de endurecimiento por deformación	η Eficiencia
P Carga aplicada en ensayos mecánicos (fuerza) [N]	ρ Densidad del material con dependencia temporal [$kg m^{-3} (s)$]
q_0 Flujo de calor por irradiación solar concentrada [$W m^{-2}$]	σ Esfuerzo verdadero [MPa]
r Dirección radial para coordenadas cilíndricas	σ_r Constante de Stefan-Boltzmann [$5.670373 W m^{-2} K^{-4}$]
S Esfuerzo ingenieril [MPa]	θ Dirección angular para coordenadas cilíndricas [rad]
$T_{(condición)}$ Temperatura [K]	
u_x Velocidad de deformación en la dirección x [$m s^{-1}$]	
u_y Velocidad de deformación en la dirección y [$m s^{-1}$]	

Capítulo 1. Objetivos.

Objetivo general.

Estudiar los fenómenos de transformación en general que pueden modificar propiedades mecánicas e influir en las microestructuras metalúrgicas causadas por la irradiación solar concentrada en los materiales empleados en receptores de torre central.

Objetivos específicos.

1. Determinar un protocolo de experimentación mediante la simulación por método de elemento finito de las condiciones físicas a las que se exponen las probetas. Determinar a través de éstos, los umbrales operativos con los que debe ejecutarse el experimento. Con los umbrales posibles, se plantea tener las condiciones más exigentes en términos termo-mecánicos que el material con la geometría definida puede tener, sin llegar a ser destructivo.
2. Exponer probetas del material metálico selecto a la incidencia del flujo radiativo concentrado en el HoSIER, con base en el protocolo experimental preparado.
3. Obtener expresiones matemáticas (ecuaciones de Ludwik) a partir del ensayo monotónico a la tracción de las probetas experimentadas en el HoSIER; con estas expresiones será descrita la transformación de propiedades mecánicas.
4. Determinar la transformación que tenga lugar en las estructuras cristalinas a partir de un fenómeno alotrópico, mediante estudios metalúrgicos.

Capítulo 2. Antecedentes.

Los sistemas de concentración solar están constituidos de numerosos dispositivos ópticos que se fabrican con la intención de proporcionar eficiencia y ser tan duraderos como sea posible para garantizar la fiabilidad del proceso de conversión de energía. Desde esta perspectiva, los materiales que constituyen estos sistemas tienen que ser seleccionados debidamente y proporcionar las características para cumplir con su función específica. Los receptores solares utilizados se hacen para absorber el máximo de energía solar y transferirla al fluido de trabajo con la mayor eficiencia.

Los sistemas de receptor central tienen el potencial de lograr menores costos de producción de energía eléctrica en el largo plazo debido a su capacidad para llegar a las altas temperaturas y utilizar de esta forma ciclos termodinámicos más eficientes, empleando el insumo gratuito de la energía solar concentrada. La energía incidente se transfiere desde el receptor de tubos, calentando un fluido de transferencia de calor. El fluido de transferencia de calor pasa directamente a través de intercambiadores de calor para que sea aprovechado en alguna otra sección, como parte de un ciclo termodinámico; i.e. para generar vapor para un ciclo de Rankine, calentar aire u otros gases, o incluso para generar vapor directamente.

La temperatura máxima del ciclo de trabajo es el indicador predominante para la potencia teórica y real que se puede extraer de la energía térmica, ya que temperaturas más altas consiguen una mayor eficiencia. Verlotski et al. (1997) exponen que la gama de temperaturas indicada por la mayoría de los autores para llegar a temperaturas máximas cerca de 900 °C, en procesos químicos o en hornos solares; no obstante, se ha logrado que con ciertas configuraciones de receptores de torre central de tipo volumétrico, tener temperaturas de más de 1600 °C. Las temperaturas de trabajo de las plantas de energía solar están limitadas por la resistencia del material a altas temperaturas, así como el comportamiento de los miembros estructurales al choque térmico y la fatiga térmica.

Las temperaturas máximas de proceso de una planta de energía solar son generalmente menos de 700 °C debido al comportamiento de los materiales, según Verlotski et al. (1997) y por debajo de los 600 °C con base en la estabilidad química de las sales fundidas de acuerdo con Boerema et al. (2012). La eficiencia de las plantas de energía solar térmica aumenta rápidamente con el aumento de las temperaturas de trabajo, por lo que el problema tiene que ser resuelto por la mejora de los materiales y por medio de la variación de la construcción de los elementos estructurales que continuamente son expuestos al calor, especialmente el receptor, que obtiene el toda la irradiación reflejada desde el campo de helióstatos.

Como consecuencia la operatividad frente al flujo radiativo solar, la distribución obtenida en la “mancha” de flujo radiativo y la intermitencia del recurso solar, los receptores se ven sometidos a esfuerzos térmicos intensos y cíclicos que son directamente dependientes de estos factores, y por causa de los gradientes térmicos que aparecen y que no tienen un campo establecido permanentemente. Con base en estos gradientes de temperatura cíclicos, es posible anticipar el agrietamiento y las fallas por fractura, sin embargo, esto no es fácil de predecir. El objetivo de innovar con respecto al tipo de receptor es evitar el choque térmico y las condiciones de fatiga térmica mediante el control de los gradientes de temperatura existentes durante el periodo de calentamiento cíclico por efecto de la potencia de irradiación. Ciertamente, cuanto mayores sean los gradientes de temperatura, las condiciones de choque térmico para el receptor son más elevadas; a su vez, las condiciones extremas en las que trabajan activan los mecanismos físico-químicos de envejecimiento que son responsables de la evolución temprana de algunas propiedades de los materiales críticos, tales como las propiedades de termo-radiación (absortancia, emitancia), las propiedades termofísicas (difusividad), así como las propiedades mecánicas.

Cabe destacar que como el tiempo de vida de un receptor puede ser de varios años, el envejecimiento de los materiales no puede ser estudiado en tiempo real o bajo condiciones normales de trabajo. Por eso, este trabajo tiene como objetivo encontrar las mejores condiciones de operación para acelerar los mecanismos de degradación a fin de comprender cómo puede estar ocurriendo el deterioro del material y cómo predecir la durabilidad de cualquier material, en términos de sus propiedades mecánicas.

Un tubo componente de receptor de torre central, encuentra regiones donde los esfuerzos que se presentan son de carácter compresivo, mientras que en otras regiones puede ser de tracción. Esto es, cuando se presenta un campo térmico, ya sea transitorio o de estado estacionario de máxima temperatura, una región del tubo se encuentra expandida (que es típicamente la región frontal que encuentra incidencia directa del flujo radiativo), mientras que la región opuesta a esta primera, se encuentra bajo un campo de esfuerzo compresivo. Los estudios que se realizan actualmente para comprender la evolución de las propiedades mecánicas de los materiales metálicos que son componentes de los sistemas térmicos, pretenden responder a los planteamientos sobre el comportamiento de los diferentes materiales, las temperaturas y esfuerzos máximos, vida frente a la fatiga con deformación y/o esfuerzos controlados, iniciación y crecimiento de grietas, tratamientos térmicos que logran micro estructuras metálicas que mejoran el desempeño mecánico, etc.

Para garantizar el desarrollo exitoso de los sistemas de energía solar concentrada, los esfuerzos científicos deben dar propuestas para reducir los costos y aumentar la fiabilidad de las futuras plantas de energía solar. Esto puede lograrse a través de medidas complementarias tales como: aumento de la eficiencia del sistema, desarrollo de conceptos innovadores o simplificaciones que mejoren la conversión de la energía solar, el uso de materiales más baratos, y la reducción de los costos de mantenimiento. En particular, dos cuestiones fundamentales deben abordarse hacia el logro de la fiabilidad a largo plazo y la rentabilidad: ¿Cómo puede estimarse la durabilidad de las plantas de energía solar? ¿Y cómo es posible extenderla? Boubault et al. (2014) explican que actualmente no se puede responder a estas preguntas con precisión y que son necesarios nuevos métodos con el fin de analizar la durabilidad de los componentes clave de las centrales solares.

En 2013, el mayor sistema de energía solar térmica de torre de energía en el mundo con la absorción con receptores de tubos fue construido cerca de Las Vegas, Nevada, EE.UU. con una potencia de 392 MW; con el fin de promover tal tipo prometedor de receptores, el proyecto SOLHYCO (PSA, España) tiene por objeto demostrar la viabilidad de un receptor de tubos de alta temperatura, de acuerdo con Boubault et al. (2014).

Del monto total destinado para la construcción de una planta termosolar de tipo torre central, gran parte de la inversión es destinada para el receptor solar según lo exponen Augsburg y Favrat (2013). Al tiempo de ser uno de los elementos más caros del sistema, es el elemento que más afectaciones sufre durante la operación, y del cual depende mucho de la eficiencia de la planta.

Para las plantas de energía termosolares de tipo torre central la investigación tiene un cometido muy importante en cuanto a reducir los costos y aumentar la eficiencia de las plantas. La lista de centrales termosolares en construcción o en proyecto está creciendo en regiones soleadas, como el sur de España, África del Norte y California. La evaluación y la optimización de su desempeño es un proceso continuo que requiere para mejorar aún más la competitividad contra las plantas convencionales de hidrocarburos y otras plantas de energía renovable.

2.1. Estudios e investigaciones de fatiga en materiales por métodos de calentamiento convencionales

Investigaciones tal como el que realizan Evans et al. (2008), pretenden dar respuesta a las interrogantes del desempeño de mejores materiales metálicos frente a los esfuerzos y a la presencia de altas temperaturas. Estos investigadores comentan que se debe dar respuesta a las necesidades de

elementos mecánicos que se encuentran bajo esfuerzo no solo como componentes mecánicos, sino también por efecto de los esfuerzos que aparecen como resultado de los campos de temperatura. Ellos analizan de forma separada al material metálico a máxima temperatura de estudio, cuando el metal se encuentra a carga compresiva por una parte, y cuando el metal se encuentra a carga ténsil, por otro. Específicamente, cuando un tubo componente de un receptor de torre central tiene su desarrollo térmico, tiene ambos comportamientos en diferentes regiones del material, razón por la que hay que atender a los esfuerzos principales desarrollados en las probetas del presente estudio doctoral. La situación se encuentra aún más particular cuando se presentan el resto de los agentes degradantes de las propiedades mecánicas y causantes del denominado fenómeno de envejecimiento.

Existen muchas metodologías que para evaluar el comportamiento mecánico de los materiales ante la fatiga termo-mecánica; que es el campo de estudio que considera a los materiales en este sentido. Entre estos métodos, el empleado por Evans et al. (2008), se realiza mediante el calentamiento por inducción eléctrica, usando una bobina por la que circula una corriente eléctrica de diversas frecuencias a fin de lograr el calentamiento a la temperatura deseada en alguna porción de la geometría de las probetas (aunque el calentamiento con irradiación solar concentrada es capaz de generar un campo de esfuerzos termo-mecánicos debido a su carácter no-uniforme).

El diseño de los ensayos de fatiga termo-mecánica tiene una diversidad de variantes. Esta puede ser calentando el material a la temperatura deseada desde la temperatura ambiente o alguna otra superior, mientras que al mismo tiempo el material se carga a tracción o compresión, en un comportamiento de calentamiento y carga de carácter cíclico para lograr la fatiga de los materiales, no obstante, que el simple calentamiento no-uniforme desarrolla esfuerzos térmicos. La carga mecánica también puede realizarse como momento de torsión, sometiendo al material a una combinación de cargas normales y cortantes. Los comportamientos de los materiales frente a la fatiga termo-mecánica, se anticipan mediante el desarrollo de modelos numéricos, mediante los cuales se puede predecir el desempeño de los materiales, corroborar propiedades, y al tiempo emitir juicios y obtener ecuaciones representativas del comportamiento de los materiales dados los diferentes tratamientos mecánicos y térmicos. La gran mayoría de los estudios realizados y presentados en este trabajo doctoral, modela previamente la diversidad de fenómenos de forma numérica.

En la investigación que Evans et al. (2008) realizan, las pruebas de fatiga termo-mecánica se realizan en una máquina servo - hidráulica biaxial. El ciclo térmico se aplicó empleando una bobina de inducción de cobre, refrigerada por agua, en conjunción con chorros de aire de refrigeración interna y externa. Sus probetas de la super aleación Inconel 718, con cilíndricas tubulares, con un diámetro externo de 10

mm, 8 mm de diámetro interno y una longitud de 25 mm; sobre la que realizan ensayos “en fase” y “fuera de fase”; sus temperaturas consideradas y experimentadas ascienden de 300 °C a 620 °C y 300 °C a 680 °C con una rapidez de calentamiento de 25 °C s⁻¹ forman un ciclo de rampa triangular. Su trabajo se centra en ese último ciclo; ciclo que es de interés dada la magnitud de temperaturas y geometría de este estudio. Durante la duración de sus pruebas, la diferencia de temperatura máxima en la totalidad de la geometría de la probeta se redujo en menos de 6 °C; aspecto por el cual se argumenta que los ensayos procuraron tener temperatura uniforme, situación que no es del todo controlable en un sistema de concentración solar. Aunque en esta investigación no se explican detalladamente las razones por las cuales ocurre este fenómeno, cabe destacar que la situación es coincidente con lo expuesto en el Metals Handbook Vol. 19, donde se argumenta que con el paso de los ciclos, la deformación plástica genera un daño acumulativo a través de dislocaciones y el hecho de que exista también un esfuerzo por expansiones térmicas, implica que existe un daño acumulado por efecto de la expansión en regiones de la geometría de la probeta. Por lo cual se puede concluir que ambos los esfuerzos de cualquier naturaleza generan daño acumulativo y la combinación de los mismos acelera la degradación de las propiedades mecánicas de los materiales metálicos.

De acuerdo con Metals Handbook Vol. 19 y con Askeland et al. (2012), se expone también que cuando los esfuerzos de cualquier naturaleza que afectan a los materiales metálicos, aun cuando su magnitud se encuentra por debajo de los límites de fluencia, genera un daño acumulativo que genera dislocaciones en el material, endureciéndolo con el paso de los ciclos de esfuerzo, pero que al tiempo, genera iniciación de grietas en la superficie del material. Estas grietas manifiestan un crecimiento con el paso de la historia de cargas, hasta que llega el momento en que el área restante del elemento sufre un esfuerzo mayor debido a la fuerza aplicada y el material falla por fractura. Tal situación ocurre por igual con los esfuerzos térmicos; Sjöström y Bergström (2004) exponen que las herramientas utilizadas en la fundición a presión, laminado en caliente, extrusión y forja en caliente se encuentran expuestos ante ciclos de temperaturas altas y cargas mecánicas. Por esta razón los campos térmicos han atraído el interés de la investigación en termo-mecánica.

En este mismo estudio, las propiedades de fatiga térmica de un acero martensítico al cromo para herramientas, trabajado en caliente fueron evaluadas en relación con el tratamiento térmico aplicado. Usando cuatro temperaturas de austenitización diferentes, el material fue templado y revenido; el acero austenítico inoxidable de este estudio no es inducido, sino que es propio de la matriz del material seleccionado. La fatiga térmica se realizó con un sistema de calentamiento por inducción de alta frecuencia, diseñado para simular las condiciones de procesamiento de trabajo en caliente. Al igual que

Evans et al. (2008), realizan el calentamiento de sus probetas mediante inducción eléctrica, y en la investigación de Han et al. (2013), donde se realiza calentamiento por inducción para análisis de estructuras metálicas obtenidas; obtener fases metálicas distintas es relevante dado que afecta las propiedades mecánicas y químicas de las matrices metálicas, así como su comportamiento a diferentes temperaturas y frente a los agentes a los que es expuesto.

De forma relevante, Sjöström y Bergström (2004) exponen que un metal calentado a cierta temperatura, tiene la capacidad de cambiar su micro-estructura debido a la alotropía del propio metal. Esto tiene un fuerte impacto en el historial de esfuerzos mecánicos posterior, en virtud de que en ocasiones, un metal endurecido superficialmente, resulta tanto más resistente a presentar formación de grietas superficiales y crecimiento de las mismas. En el desarrollo de este trabajo se pretende realizar la evaluación particular con base en el daño y transformaciones en la microestructura y envejecimiento que logra la radiación solar concentrada, sin dejar de lado también, la influencia propia de las geometrías de los elementos.

Sjöström y Bergström (2004) obtuvieron como resultado de su investigación el tamaño de grano austenítico y características de la estructura martensítica de los materiales analizados. Se evaluó el daño por fatiga térmica en las muestras, es decir, la longitud máxima y la longitud media de las grietas más grandes y la densidad de grietas, en secciones transversales pulidas utilizando técnicas microscópicas. La relevancia de la aparición de las mismas (inician como micro-grietas), según se señala en Metals Handbook Vol. 19, es el inicio del deterioro de propiedades mecánicas por el fenómeno de fatiga.

Por su parte Xu et al. (2008) señalan que las cargas mecánicas se combinan con las cargas térmicas en diferentes ángulos de fase (coincidiendo carga con alta temperatura) y en diferentes posiciones dependiendo de las características geométricas de su material de álabes de turbina. Con el fin de optimizar la geometría de la cuchilla con respecto al peso y su vida útil, Xu et al. (2008) encuentran necesario realizar análisis y obtener propiedades termo-mecánicas de los materiales; por tal motivo, las condiciones que tienen las probetas sometidas al flujo radiativo solar pretende conseguir las mismas condiciones de gradientes térmicos, de campo de esfuerzos y magnitud del flujo radiativo. Sin embargo, existe la importante limitación que antepone cada material, ya que dependiendo de su esfuerzo de fluencia y resistencia máxima así como sus propiedades termofísicas de transporte, es necesario especificar acercamiento al punto focal del concentrador y tiempo de los ciclos para impedir que los ensayos se vuelvan destructivos. La característica de este estudio es por consiguiente fuertemente termo-dependiente.

Existen algunas respuestas que no se conocen al respecto de los materiales y las condiciones experimentales que permiten complementar los modelos. Algunas propiedades termofísicas de transporte son dependientes del tipo de calentamiento involucrado y las condiciones en las que el material se encuentre, es decir, un material envejecido y con precipitados intergranulares tendrá diferente conductividad térmica que el mismo material pero en condiciones a la salida de fabricación. Por esta razón, Xu et al. (2008), al igual que otros investigadores argumentan que muchas condiciones se modelan a partir de consideraciones empíricas y que sus resultados sirven para ajustar los modelos computacionales; aunque en el presente estudio se pretende que todas las propiedades se introduzcan como coeficientes termo-dependientes conocidos previamente determinados mediante la presente investigación. De esta forma, es posible realizar modelos completos que requerirían conocer por completo las respuestas de los materiales en diferentes condiciones y se obtiene la ventaja de emplear menos recursos computacionales. Es rescatable que Xu et al. (2008), obtienen las respuestas de esfuerzo de tensión de sus probetas con base en la deformación, usando el correspondiente módulo de Young.

Prasad y Kumar (2013) presentan por su parte un breve informe de investigación sobre la medición de los gradientes térmicos dinámicos en muestras planas delgadas para pruebas de fatiga termomecánica. Los gradientes longitudinales, así como los gradientes térmicos transversales fueron medidos mediante termopares tipo K, en una sección de cada probeta plana (100 x 10 x 1.5 mm); en una superaleación de níquel, utilizando dos tipos de configuración de bobinas de inducción en el intervalo de temperatura de 500 ° C a 850 ° C a una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 5 °C s⁻¹, donde los gradientes térmicos obtenidos tenían orientación transversal y longitudinal. El código europeo en práctica y la norma ASTM E-2368 especifican el nivel aceptable de gradiente térmico axial ($\pm 1\%$ de la temperatura máxima alcanzable en los ciclos), más allá del cual puede dar lugar a diversas incertidumbres inherentes en la realización de pruebas de fatiga termomecánica. Es necesario apuntar que esto es un requisito distante de ser cumplido mediante el calentamiento por concentración solar, donde los errores ópticos de las superficies y los fenómenos meteorológicos inducen una distribución particular del flujo radiativo concentrado que ocasiona a su vez gradientes térmicos no controlables y variables con el tiempo.

Esta una investigación realizada por Klobčar et al. (2008) la cual tiene una intención muy semejante a la de Sjöström y Bergström (2004), se realiza para estudiar la resistencia a la fatiga térmica de diferentes aceros para herramienta de trabajo en caliente, aceros AISI H11 y H13 y de un de acero maraging 18% Ni (el alto Ni es contenido para retener estructuras austeníticas como se declara en las investigaciones

aquí reportadas). Es conocido que la vida de las herramientas en servicio se ve afectada por la fatiga térmica, la corrosión y la erosión provocada por el flujo de aluminio fundido a la superficie de la matriz. Klobčar et al. (2008) evalúan diferencias significativas en la resistencia a la fatiga térmica de los materiales dados sus tratamientos térmicos, donde cabe resaltar lo siguiente por su gran relevancia; un material es capaz de soportar mejor la fatiga térmica mientras su calentamiento cíclico no revierta, al menos parcialmente, la transformación de martensita en austenita. Es entonces el enfoque del estudio de Klobčar et al. (2008) analizar los mecanismos de fatiga térmica y la resistencia de diferentes materiales y posterior a sus tratamientos térmicos con el fin de extender la vida de los aceros grado herramienta y de aceros martensíticos endurecidos por precipitación (envejecidos); al tiempo son notables las influencias de las transformaciones de fase de los materiales en su desempeño mecánico, como se tiene expectativa en el presente estudio.

El estudio comprendió el que los materiales se caracterizaran antes de las pruebas mediante la medición de dureza, tenacidad, resistencia a la tracción, y mediante la realización de examen metalográfico; de las cuales el análisis metalográfico y el estudio monotónico de resistencia a la tracción son coincidentes para la presente investigación doctoral. En la investigación de Han et al. (2013), los resultados experimentales muestran que los parámetros del proceso de tratamiento térmico de frecuencia media tienen efecto significativo sobre la estructura metalográfica y las propiedades mecánicas, y que la estructura revelada por la metalografía cambia después de las afectaciones térmicas a 1350 °C. Al igual que en esta investigación y la de otros autores aquí mencionados, como la de Klobčar et al. (2008) y Han et al. (2013) desarrollan un modelo por Método de Elemento Finito, para la predicción de esfuerzos y deformaciones durante la prueba de inmersión. Estas simulaciones, en el presente trabajo doctoral comprenden el calentamiento de las probetas dada la distribución del flujo radiativo sobre la geometría cilíndrica, para permitir la comprensión del desarrollo de esfuerzos transitorios durante el ciclo térmico.

Una de las ideas iniciales, justo como se estudió y comprobó en el trabajo de maestría (Alvarez-Brito, 2011), es que materiales con mayor conductividad térmica, menor coeficiente de expansión térmica, y menor módulo de elasticidad experimentan tensiones térmicas más pequeñas y en este sentido, son factibles de presentar mejor resistencia a la fatiga térmica.

Los coeficientes de calor que Klobčar et al. (2008) desconocían entre la muestra y el aluminio fundido, el aire, la emulsión a base de agua, y el agua de enfriamiento se calculan con base en una comparación entre las temperaturas medidas experimentalmente (empleando termopares) y campos térmicos

calculados; en el presente estudio se elimina la posibilidad de determinar propiedades de transporte durante la experimentación.

Klobčar et al. (2008) argumentan que las grietas son el resultado de los gradientes de temperatura y los ciclos de temperatura en la superficie de sus probetas. El supuesto básico que plantean, es que estas fallas se producen cuando se agota la ductilidad del material, y ya no es capaz de absorber la deformación durante el ciclo térmico, es decir, cuando la propiedad de resiliencia del material se ve agotada, por efecto de la acumulación de daño. En los materiales dúctiles, la fractura está precedida por la deformación plástica que se produce por el movimiento de dislocaciones. Klobčar et al. (2008) comprobaron también que la microestructura después de la prueba de fatiga térmica muestra más indicios de “envejecimiento” para ambos materiales; esto sugiere que la aparición de este fenómeno de envejecimiento durante la prueba de inmersión no es el único mecanismo que reduce la dureza, otra razón podría ser la fatiga térmica durante la carga cíclica, y es en razón de esto que se asegura que el daño es acumulativo por la diversidad de factores, y que con el avance de los ciclos de exposición a la radiación solar concentrada, esto puede tener mayor trascendencia.

Es posible entonces pensar ahora que si además de todos estos efectos, ocurriese una descarburización de los metales, el crecimiento rápido de grietas tendría lugar por haber obtenido un material de menor resistencia. La eliminación de carbono por efecto de la formación de óxidos de carbono causada por altas temperaturas en presencia del aire proporcionará un factor extra degradante de los materiales metálicos. Será ésta entonces una razón para obtener fatiga de bajos ciclos, ya que la formación de óxidos de hierro y de carbono durante la exposición del flujo solar radiativo hace al acero al carbono más susceptible a estos efectos; no se descarta por supuesto que algún efecto similar se encuentre para el acero inoxidable AISI 316 (seleccionado para el presente trabajo doctoral). En este mismo sentido, no se debe omitir que el crecimiento inicial de las grietas por fatiga térmica se ve facilitado por la oxidación de las superficies de la grieta, factor enunciado en el Metals Handbook Vol. 19.

El interés de analizar las propiedades de los elementos mecánicos, es también de gran relevancia para los elementos metálicos empleados en la construcción; donde se reconoce que las condiciones de cargas cíclicas sísmicas y los esfuerzos a temperatura elevada en caso de incendios deben anticiparse para efecto de salvaguardar la integridad de las construcciones. En este sentido, el objetivo de la investigación de Sinaie et al. (2014) fue obtener una comprensión fundamental de los efectos que una historia previa de cargas cíclicas tiene sobre las propiedades monotónicas posteriores sobre acero estructural de bajo carbono, en el que las temperaturas son elevadas cuando se ensaya una prueba de carga monotónica; simulando la ocurrencia de un sismo. Para este propósito, las muestras investigadas

de acero fueron sometidas inicialmente a un número de ciclos de deformación controlada, y luego cargadas monotónicamente en tracción a diferentes temperaturas hasta la fractura. Con el número de ciclos y la amplitud de la deformación que sirven como variables para la fase cíclica, así como la temperatura como la variable para la fase monotónica; se examinó su influencia combinada en la posterior prueba de propiedades mecánicas del acero estructural a temperatura elevada. Como resultado encontraron que la disminución de la tensión de fluencia, la tensión de ruptura y deformación última es causada por la alta temperatura (y solo mientras ésta se tiene), y de manera análoga, el aumento de la tensión de fluencia y la disminución de la deformación última es causada por el daño inducido por las cargas cíclicas. Por lo tanto, los metales deben ser evaluados bajo diversas condiciones que se observan durante el funcionamiento de cualquier sistema con CSI o para radiación solar no concentrada, según lo analizado por Abdelal y Atef (2008), donde se investigaron para obtener datos de vida útil para componentes aeroespaciales.

2.2. Investigaciones en el campo de manufactura y procesamiento de materiales mediante energía solar concentrada.

Herranz y Rodríguez (2010) exponen que las técnicas convencionales, a pesar de sus múltiples posibilidades, tienen una característica en común un inconveniente: su baja eficiencia energética global. Si bien es cierto que la densidad de energía obtenida a través de un láser de tres a cuatro magnitudes mayor que la que se obtiene por las instalaciones de concentración solar, Flamant et al. (1999) han llevado a cabo una comparación de la energía total y los costos de usar láser, plasma y sistemas de energía solar y llegaron a la conclusión de que los sistemas solares de concentración parecen ofrecer algunas oportunidades únicas para la transformación a alta temperatura y síntesis de materiales tanto de los aspectos técnicos y económicos. Es importante tener en cuenta al tiempo, que el uso de la energía solar podría reducir el costo de los experimentos de alta temperatura. Estas son las razones que justifican el creciente interés de la comunidad científica en la investigación de los posibles usos de la energía solar altamente concentrada en el campo de los materiales. Ferriere et al. (2006), coinciden completamente con este argumento, al señalar que el factor de absorción de los metales en la banda de longitud de onda de la radiación solar es generalmente mayor que su factor de absorción en la longitud de onda láser de CO₂. La eficiencia general de los hornos solares es de 70%, mientras que sólo el 2% de eficiencia se obtiene con las fuentes de láser, y los costos para las instalaciones típicas en el rango de potencia 1- 50 kWth son 1.5 € / Wth para los hornos solares y 100 € / Wth para fuentes de láser. Yang et al. (1996) desarrollan investigación en el mismo tema.

En su grupo de investigación Herranz y Rodríguez (2010), en la ETSII -UCLM (Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Castilla la Mancha) usan energía solar concentrada mediante una lente de Fresnel y proponen nuevos procesos de sinterización y modificaciones de superficies de componentes metálicos. El objetivo es realizar investigación para incrementar la resistencia de los materiales metálicos (aleaciones principalmente ferrosas y titanio) al desgaste, la corrosión y la oxidación a altas temperaturas. Las investigaciones llevadas a cabo incluyen los procesos que implican la sinterización de las aleaciones metálicas, tratamiento de la superficie de placas de acero y de fundiciones, revestimiento con acero inoxidable, nitruración a alta temperatura de las aleaciones de titanio y otras reacciones auto-propagantes de alta temperatura. En la investigación de Ferriere et al. (2006), analizan la resistencia a la corrosión de los revestimientos de acero inoxidable depositados sobre un sustrato de acero al carbono con un procesamiento solar; el revestimiento solar consiste en fundir el polvo de acero inoxidable AISI 316 bajo un haz de energía solar concentrada, seguido por una solidificación rápida.

El objetivo de las investigaciones de Herranz y Rodríguez (2010), es no sólo para hacer incursiones en el uso de nuevas tecnologías no contaminantes que contribuyen a resolver los problemas ambientales derivados de la metalurgia de alta temperatura, sino también para aumentar el conocimiento científico sobre los mecanismos implicados en estos procesos que se llevan a cabo a altas temperaturas bajo condiciones de no-equilibrio. Se expone que han encontrado un claro efecto activador de la energía solar concentrada que da lugar a tiempos de tratamiento que son más cortos, y que se añade a la eficiencia del proceso, así como aumento de la calidad de la superficie modificada. Esto es debido, entre otros factores, a las propiedades de la radiación solar: el espectro solar visible se extiende desde las longitudes de onda entre 400 y 700 nm, donde la mayoría de los metales presentan una mayor absorptividad, por lo que los procesos son energéticamente más eficientes; al tiempo se ha argumentado que la fracción contenida en el espectro UV puede tener una influencia notable. Ciertamente, estas investigadoras no son las únicas que discuten las ventajas de la energía solar concentrada aplicada a metales.

La energía solar concentrada representa una alternativa a otros tipos de tratamientos por radiación y convencionales de calentamiento para tratar y modificar las superficies de materiales metálicos. La investigación llevada a cabo por el grupo de Materiales Metálicos de la ETSII-UCLM (España) es interesante por dos razones: en primer lugar, propone el uso de nuevas tecnologías no contaminantes y ambientalmente aceptables para procesos que implican la modificación superficial de materiales metálicos a altas temperaturas, donde la posibilidad de tratamientos es sumamente amplia, tanto para

difusión, tratamientos superficiales y reacciones auto-propagantes en las superficies de los metales. En segundo lugar, está aumentando el conocimiento científico sobre los mecanismos implicados en el tratamiento de los materiales a altas temperaturas, en condiciones de no equilibrio. Estas investigadoras han observado que la energía solar concentrada tiene un claro efecto activador, que da como resultado tiempos de tratamiento más cortos y eficiencia de procesamiento mayor, e incluso en algunos casos una mejor calidad de las superficies modificadas. Para procesos de alta temperatura, la energía solar concentrada ha demostrado ser altamente eficiente y también competitiva en términos de costos, aunque no se debe perder de vista que la inversión inicial en las instalaciones para su aprovechamiento y los dispositivos ópticos no es de un costo menor comparativamente hablando, sin embargo, que se pueden amortizar en el mediano o largo plazo por efecto del recurso solar gratuito y de tecnologías cada vez más eficientes.

Con base en lo aquí descrito, debe prestarse especial atención a la característica auto-propagante de reacciones y efectos iniciales de procesos activados por energía solar; implicando que, estos fenómenos pueden estar iniciados en la superficie donde la irradiación es absorbida, pero continuadas al resto de la masa del material por efecto de difusión.

2.3. Investigaciones realizadas en torno al tratamiento térmico y afectaciones de aceros al carbono irradiados por ISC.

Diversas investigaciones han comparado la eficiencia en los procesos en ingeniería de materiales empleado radiación proveniente de láseres y radiación solar concentrada. Debido al espectro solar, incluyente de radiación infrarroja, visible y ultravioleta, metales como el acero sometidos a algún proceso de tratamiento térmico, obtienen resultados mejores. Los tiempos de tratamiento se reducen y la calidad de las superficies tratadas iguala la calidad e incluso ocurre que es superior que aquellas que se obtienen en muflas o los endurecimientos que se obtienen por tratamiento con láser o con plasma.

En el trabajo de investigación reportado por Yang et al. (1996), por ejemplo, se explica que los aceros de baja aleación son endurecibles empleando energía solar concentrada incluso, sin siquiera requerir un medio líquido para el enfriamiento dada la geometría de sus especímenes de prueba. Ellos explican que si la superficie del acero se calienta lo suficiente para convertirse en austenita, se enfriará tan rápido por conducción, al grado que la formación de martensita es inevitable; este trabajo fue desarrollado en el horno de alto flujo en la Plataforma Solar de Almería, que es capaz de densidades de flujo en el rango de 2.5 a 5.5 MWm⁻² teóricamente. Cabe destacar que cuando se realizó la campaña

experimental el horno no se había caracterizado, de manera que el flujo se estimaría como resultado del campo térmico obtenido para las probetas, medido con termopares, tanto al frente como en la parte posterior de las probetas. La temperatura máxima en el termopar ubicado al frente fue de 1 142 °C y en la parte posterior de más de 600 °C, y su modelo de calor considera que en la región frontal de las probetas tiene lugar la absorción del flujo concentrado y que las probetas se enfrían por convección natural, demostrando con esto último que no es necesario un medio líquido de enfriamiento sine qua non se logre un enfriamiento rápido. Este modelo, sin embargo, es carente de la consideración de pérdidas de calor por efecto de la emisividad.

Como conclusión, Yang et al. (1996) exponen que la forma de la microestructura cambia con la profundidad, partiendo de martensita en la superficie, sin embargo, se encontró que en todos los casos para muestras no eran de espesor uniforme. Esto se debe probablemente a que la densidad de potencia no era uniforme en toda la superficie, lo que daría lugar a una variación de temperatura a través de la cara frontal de la muestra; este efecto es resaltado de la distribución del flujo radiativo debido a las carencias de los sistemas ópticos, y es un aspecto que se puede ver acentuado por efecto de factores meteorológicos como es el paso de nubes que cubre parcialmente los dispositivos de concentración de radiación solar. Yang et al. (1996) exponen que el endurecimiento debe ser sólo posible a cierta potencia de irradiancia y con cierta profundidad; no obstante la geometría de las piezas tiene influencia, así como la naturaleza de la aleación (en cuanto al contenido de carbono de las mismas, así como otros elementos aleantes).

La investigación de Yang et al. (1996) no dista mucho del planteamiento de Rodríguez et al. (1997), pues su enfoque se encamina a la transformación de las propiedades mecánicas y metalográficas del acero de baja aleación, realizado mediante el uso del horno solar de la Plataforma Solar en Almería (España), cuya potencia térmica es de 60 kW en un sistema de doble reflexión de los rayos solares.

El artículo de Rodríguez et al. (1997), presenta los cambios microestructurales y los valores de dureza obtenidos tras el tratamiento solar en una zona superficial. De acuerdo con la densidad de potencia aplicada sobre estas muestras, la zona endurecida varió entre 1 y 10 mm de profundidad y el tiempo de tratamiento fue de menos de 30 s, obteniendo una microestructura bainítica. En razón de que absorptividad de la superficie del acero es de aproximadamente 0.65 en el espectro solar, Rodríguez et al. (1997) decidieron recubrir los especímenes de prueba con Pyromark para alcanzar una absorptividad de 0.9. La mayoría de los valores de dureza fueron de alrededor de 60 HRC, lo que significa que la superficie estaba completamente austenitizada antes de la muestra se enfriase rápidamente en agua. Estos valores son similares a los obtenidos con el mismo acero tratado en un horno convencional.

Rodríguez et al. (1997) argumentan que un aumento en el tamaño de grano produce también una reducción en las propiedades mecánicas, si acaso se deja más tiempo la probeta expuesta al flujo radiativo. Los valores de densidad de potencia obtenidos con este horno solar, que se calculan a partir de las velocidades de calentamiento, son inferiores a 300 W cm^{-2} . Rodríguez et al. (1997), comprueban a través del modelo de calor que las densidades de potencia obtenidas son menores que otras técnicas que utilizan otros tipos de flujos concentrados; este aspecto refuerza la idea del efecto fotoactivador de la energía solar concentrada.

Como aspectos del flujo radiativo empleado, se retoma que las tasas de calentamiento más altas en las muestras de 35 mm de diámetro y 35 mm de altura fueron de $40 \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$, cuando la irradiación 790-850 Wm^{-2} ; las temperaturas a las que se realizaron las experimentaciones fueron de $927 - 1\ 057 \text{ }^\circ\text{C}$ en la investigación de Rodríguez et al. (1997).

Por su parte, un modelo de Sánchez Bautista et al. (2008), se centra en la determinación de los parámetros de procesamiento para la sinterización del recubrimientos de una cara de una probeta, con acero inoxidable bajo diferentes condiciones. Esto es potencialmente útil para optimizar los parámetros de procesamiento, tales como la velocidad de desplazamiento de la probeta, la masa de polvos depositados, las dimensiones de las muestras, etc.

Sánchez Bautista et al. (2008) exponen que teniendo en cuenta la dependencia de la temperatura de las propiedades termofísicas, calor latente, las pérdidas por convección y radiación, etc. se han logrado modelos que permiten que las simulaciones sean consistentes con los resultados experimentales, y luego, la validación de los resultados numéricos se realiza teniendo en cuenta las medidas de la temperatura de experimentación y evaluación microestructural. Con esto se resalta que cuando se desconocen parámetros dentro de una campaña experimental, tales se pueden determinar mediante la evaluación de las propiedades obtenidas en el metal, como en el caso del temple del acero que requiere alcanzar la temperatura de austenita; cuando esto ocurre, se reconoce que la temperatura es superior al umbral de transformación micro-estructural.

Sánchez Bautista et al. (2008), reportan que los valores de coeficiente de convección de calor y la emisividad se eligen de acuerdo a las publicaciones y después de un procedimiento de prueba y error se ajusta el calentamiento en el modelo numérico, con base en la experimentación. De esta manera, la capacidad calorífica para el AISI 1026 se introduce mediante la ecuación 2.1:

$$Cp_{AISI1026} = 0.1487 * T + 462.15 \quad (2.1)$$

Donde T es la temperatura a la que se encuentra el material. La estrategia utilizada por Sánchez Bautista et al. (2008) para validar la precisión del modelo implica el uso de los termopares soldados a la base de las muestras, coincidiendo las temperaturas experimentales con los resultados numéricos y posteriormente, se realizan los análisis de la microestructura de las secciones transversales con sus correspondientes temperaturas calculadas. Con esto se confirma que el planteamiento de utilizar termopares para monitorear y registrar las temperaturas obtenidas en ciertos puntos de las probetas, permite asegurar que el modelo numérico es adecuado e integral de las condiciones del experimento. El estudio de la micro-estructura revela también las magnitudes alcanzadas en el campo térmico desarrollado durante la exposición al flujo radiativo concentrado.

Sánchez Bautista et al. (2008) demostraron la posibilidad de emplear un modelo basado en el método de elementos finitos, con el objetivo de aumentar el conocimiento con respecto al proceso de revestimiento solar, implicando que las propiedades desconocidas fueron determinadas mediante el ajuste del modelo numérico a los resultados experimentales mediante prueba y error.

En otra investigación, Herranz et al. (2013) sinterizaron polvos de acero en un horno solar y en una lente de Fresnel, logrando menores tiempos de enfriamiento en comparación con horno convencional. Estas investigadoras analizaron los efectos de los parámetros de procesamiento y el uso de la energía solar concentrada en la densificación y propiedades mecánicas. Sus resultados experimentales demostraron el efecto activador de la energía solar concentrada en el proceso de sinterización, consiguiendo una densificación óptima a 1150 °C en ambas instalaciones solares en tan sólo 90 min para el horno solar y en 30 min en el caso de instalación de la lente Fresnel en comparación con una temperatura óptima de 1290 °C y de 10 h de tratamiento en el horno convencional. También se obtuvieron mejores propiedades mecánicas al utilizar la energía solar concentrada con mediciones de microdureza.

Herranz et al. (2013) analizaron la evolución de la densificación y de la microdureza de las muestras tratadas en el horno solar y comprobaron que la densificación se lleva a cabo en un intervalo de temperatura más baja (175 °C menor) en comparación con la sinterización en el horno convencional; además observaron que la porosidad fue muy reducida y que por igual, es posible una densificación completa. Al tiempo, se redujo el tiempo de procesamiento total de 500 a 90 min y les fue posible obtener microestructuras con mayor dureza sin ningún tratamiento térmico adicional. Herranz et al. (2013) realizaron un análisis microestructural con microscopio electrónico de barrido, que revela la presencia de nitruros de vanadio tamaño submicrónico y partículas de tamaño nanométrico en unas muestras de material sinterizado, que podrían ser responsables de los altos valores de dureza

obtenidos. Estas microestructuras obtenidas después de la sinterización en el horno convencional son acordes con los resultados obtenidos mediante energía solar concentrada.

Por otro lado, el resultado logrado en la lente de Fresnel indica que es posible obtener piezas sinterizadas con ciclos totales de menos de 30 min comparables a las sinterizadas en el horno eléctrico convencional usando ciclos de casi 10 h. En este último caso, a pesar de que se desarrolló un crecimiento ligeramente mayor del tamaño de grano, los valores de dureza aumentan hasta 936 HV.

El conjunto de experimentos sugiere fuertemente que la energía solar concentrada muestra un efecto foto-activador al realizar diferentes procesos termoquímicos, en un tratamiento como el descrito. Este efecto parece estar relacionado con la naturaleza del espectro de radiación solar, ya que la absorción de energía para materiales metálicos en el rango UV es superior a la energía absorbida de láseres monocromáticos. La distribución espectral de la radiación solar, con la absorción máxima en el intervalo UV, y las condiciones termofísicas adecuadas de la aleación, pueden ser responsables de las altas velocidades de calentamiento y la reducción sustancial del tiempo de procesamiento. Herranz et al. (2013) creen que las velocidades de calentamiento y enfriamiento rápidos justificarían la evolución de la microestructura para obtener mayores durezas.

2.4. Investigaciones relacionadas con los transitorios en los receptores solares.

En una de sus investigaciones Irfan y Chapman (2009), realizan un análisis de los esfuerzos térmicos en tubos radiados con energía solar concentrada. Para verificar su análisis, emplean un modelo de elemento finito, y entre sus conclusiones más importantes, encuentran que los gradientes de temperatura axiales no son una fuente de tensiones térmicas, siempre y cuando la distribución de temperatura sea lineal (aspecto que de hecho ocurre difícilmente por situaciones explicadas en este apartado). Por su parte, los picos en los gradientes de temperatura axial son una fuente de altos esfuerzos térmicos. Los gradientes circunferenciales simétricos generan esfuerzos térmicos, que son bajos en comparación con el valor de fractura por tensión de tubos radiados. Los gradientes radiales de temperatura crean tensiones biaxiales y pueden ser una fuente importante de esfuerzo térmico en tubos radiados. De hecho, un punto caliente local genera tensiones, que pueden conducir a una fractura del tubo. Ante tales aspectos discutidos por estos autores, es necesario garantizar la integridad física de los tubos, pues existen condiciones particulares que los pueden afectar severamente, y por supuesto destruir.

A diferencia de otros autores citados anteriormente, Irfan y Chapman (2009) señalan que las fracturas durante la operación debidas a las tensiones de los tubos receptores, han sido el principal obstáculo en la vida de los tubos radiados por energía solar concentrada. Cuando el grado de deformación es el factor limitante, el esfuerzo de diseño se basa en el esfuerzo de fluencia; mientras que cuando la fractura es el factor limitante, el esfuerzo a los valores de ruptura debe ser considerado en el diseño. No debe omitirse también, el caso extremo de aumento repentino de temperatura de una pequeña sección como un calentamiento localizado.

Las grietas suelen ocurrir en una dirección perpendicular al esfuerzo máximo principal otras grietas secundarias pueden aparecer en la dirección del esfuerzo de acuerdo con la discusión de Irfan y Chapman (2009). La dirección del esfuerzo principal es muy importante, ya que los esfuerzos radiales al margen de tener magnitudes elevadas o pequeñas, su naturaleza es compresiva y no contribuyen a la propagación de grietas. Esto es acorde a la teoría de propagación de grietas en el estudio de fatiga del Metals Handbook Vol. 19.

El aumento de la tensión viene desde el momento de flexión en los extremos libres debido a la deflexión hacia fuera del tubo. Por otra parte, si el desplazamiento del extremo es impedido por soportes rígidos, el esfuerzo tangencial al final puede reducirse en aproximadamente un 43% en comparación con el estrés en un cilindro infinito, según lo expuesto por Irfan y Chapman (2009). Dado que el tubo probeta que se plantea para la investigación doctoral cuenta con restricciones en los extremos, el análisis de elemento finito considera de manera intrínseca la reducción de este esfuerzo en el extremo del tubo-probeta. En la práctica, los gradientes de temperatura radiales y circunferenciales existen simultáneamente y los esfuerzos creados por cada uno deben ser superpuestos o bien obtenidos de forma resultante en los modelos numéricos, tal cual comprende la presente investigación doctoral.

Por otra parte, entre los aspectos que dificultan la operación de una planta de este tipo, al tiempo que exigen más de las propiedades de los materiales de los receptores es el paso intermitente de las nubes en el campo de helióstatos. Para esto, Augsburg y Favrat (2013) realizan un análisis y proponen cinco recomendaciones estratégicas: el modelado de las nubes así como su paso sobre el campo de helióstatos, el control de helióstatos, control del receptor, una operación dinámica global de la planta para atenuar los efectos de las nubosidades, y el almacenamiento a corto plazo regenerativo de calor en el circuito principal del receptor. Lo ideal es modelar el peor de los casos de flujo transitorio, que se define como la situación en la que la variación de flujo en $\text{kW m}^{-2} \text{s}^{-1}$ alcanza su máximo anual, de esta forma es posible proponer diseños que al soportar dichas condiciones, sean aptos para el resto de las

mismas. En razón de que no se conocen las condiciones que conducen al peor de los casos anuales y que se produce al azar, se hacen suposiciones sobre estos relativo al tiempo, irradiación normal directa, dirección y velocidad de la nube al cubrir o descubrir el sistema. El tiempo se encuentra en el solsticio de verano (21 de junio) al mediodía, es decir, cuando se espera DNI teórico para llegar a su máximo en el hemisferio norte. Así, el valor más alto de DNI es tomado de una base de datos: 990 W m^{-2} .

El máximo flujo transitorio alcanza $56 \text{ kW m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y ocurre antes de la sombra de una nube alcanza la mitad de la distancia de campo, después de lo cual ocurrirá la mayor potencia transitoria de 4 MWt s^{-1} entre 30 s y 45 s. Luego, después de 45 s el gradiente de flujo realiza un máximo de $325 \text{ kW m}^{-2} \text{ m}^{-1}$ en los paneles del norte; finalmente el flujo incidente alcanza y se estabiliza en un máximo de 1338 kW m^{-2} . Cabe destacar que posiblemente no se pueda experimentar con tales magnitudes de flujo radiativo, en razón de que los materiales selectos tienen propiedades termo-mecánicas más pobres.

En el estudio de Boerema et al. (2012), llevaron a cabo una comparación entre las propiedades termofísicas de dos fluidos de transferencia de calor, Hitec (una sal ternaria fundida 53% KNO_3 + 40% NaNO_2 + 7% NaNO_3) y sodio líquido (Na), para determinar su posibilidad de su uso en sistemas de energía solar térmica concentrada de alta temperatura, para los sistemas térmicos de tipo receptor de torre central para generación de energía. El proyecto de receptor central Gemasolar (anteriormente conocido como Solar Tres), está diseñado para utilizar temperaturas de entrada y salida de ciclo solar de alrededor de $285 \text{ }^\circ\text{C}$ y $565 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente, usando como fluido de transferencia de calor una sal fundida. Mientras que las sales fundidas comenzarían a descomponerse, el sodio, con su alta temperatura de vaporización de $873 \text{ }^\circ\text{C}$ a presión ambiente, seguirá siendo estable.

Boerema et al. (2012) exponen que el aumento de la eficiencia del ciclo de trabajo se reducirá el tamaño del campo de heliostatos requerido para recibir la misma energía. Esto se puede lograr mediante el aumento de la temperatura del fluido de trabajo, y mediante el aumento de la eficiencia receptor.

El principal fluido de transferencia de calor utilizado hoy en día en los sistemas de torre central es la sal Hitec. Boerema et al. (2012) calcularon el coeficiente de calor interno de la tubería de diámetro 10 mm, empleando el número de Prandtl y el número de Nusselt, así como el número de Reynolds y el factor de fricción. Éste último se ha resuelto mediante la ecuación de Colebrook implícita de acuerdo con Cengel (2007). Para el modelo de receptor, se ha contemplado un tubo de espesor de 1 mm de pared, junto con una conductividad térmica de la tubería de $22.6 \text{ (W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$ (AISI 304 @ $527 \text{ }^\circ\text{C}$). Se utilizó también una rugosidad de superficie de la tubería de 0.002 mm (de acero inoxidable). Se ha asumido una

condición adiabática trasera (respaldo adiabático) y por lo tanto el receptor pierde calor al medio ambiente (25 °C) desde un solo lado. Se ha supuesto también, una radiación incidente de distribución uniforme sobre la superficie de la tubería expuesta. La reflectividad de la superficie fija, del 7% se utilizó junto con una emisividad constante, y, para longitudes de onda largas.

Para una relación de concentración de 1 300 en un sistema particular, la temperatura del fluido caloportador de salida usando sal Hitec es de aproximadamente 690 °C. Con este valor y una tubería de 9 mm, Boerema et al. (2012) vuelven a calcular la geometría del receptor utilizando sodio líquido, entonces encontraron que es permisible una relación de concentración de 2 400 que conduce a un aumento de la eficiencia 1.5%. De acuerdo con Boerema et al. (2012), si se detiene el flujo de masa del fluido caloportador, la temperatura de superficie del receptor inicialmente se aumenta a un ritmo de 125 °C/s y se incrementará en un 1000 °C en menos de 20 s. Esta condición debe ser prevenida por el análisis de los materiales ante la ISC. Estas mismas condiciones y aspectos físicos se emplean para modelar el flujo interno de aire que sirve como medio para realizar más rápidamente el enfriamiento y de esta forma aumentar el número de ciclos de térmicos posibles.

Farouk y Atef (2008) determinan el campo de temperaturas mediante modelado de objetos en 2D y posteriormente realizan el estudio de esfuerzos y fatiga térmica mediante ANSYS, realizado para estructuras metálicas que son componentes de satélites, y que reciben radiación solar directa, aunque no concentrada; al tiempo que no existen mecanismos de calor por convección. El campo de temperaturas determinado lo utilizan para modelar un ciclado térmico. Subsecuentemente, con su modelo realizan cálculos de fatiga para comprobar daños de la parte del mecanismo de rotación y el panel cerca de éste. Los análisis de fatiga bajo ésta visión, se realizan para cualquier elemento que sea sometido a flujos radiativos. Nuevamente, considerar la ocurrencia en el análisis de las condiciones más extremas permite asegurar el tiempo de vida mínimo de los componentes.

Un aspecto más que contribuye al ciclado térmico de los elementos de los receptores, es la descarga del fluido caloportador, al comienzo de la ausencia de irradiación solar por intervalos de tiempo largos como la noche. Este bombeo de sal fundida al interior del tubo agrega un ciclo térmico más a la operatividad normal, y desarrolla gradientes térmicos temporales, a medida que se va llenando el tubo, según lo explican Jianfeng y Jing (2009). El proceso de llenado de los tubos del receptor es principalmente un proceso de flujo multifase cuando la sal fundida que proviene de los tanques de almacenamiento del sistema, reemplaza al aire en el sistema de tuberías. Jianfeng y Jing (2009) expresan que debido a que el llenado es un proceso transitorio, no hace fácil de medir los parámetros locales dinámicos y térmicos a detalle, sin embargo, como en los casos anteriores, es posible emplear

un método numérico puede realizar la investigación realizando algunas suposiciones. Jianfeng y Jing (2009) proponen entonces su modelo de distancia de penetración de la sal fundida, como un análisis que comprende la fracción del tubo llenado.

2.5. Investigaciones relacionadas con instalaciones de irradiación solar concentrada

La investigación experimental sobre el comportamiento térmico de receptores tipo cavidad de sales fundidas que realizaron Zhang et al. (2013) se llevó a cabo para determinar el rendimiento térmico de un receptor de sales fundidas de 100 kWt. En su trabajo de investigación desarrollaron un sistema de cavidades por las que circulan sales fundidas y emplean calentamiento eléctrico cuya corriente eléctrica con tensión de 10 V y magnitud de 20 kA, actúa como simulador de la potencia incidente. Analizaron el impacto de los parámetros clave (como la energía incidente y flujo de las sales) en el rendimiento térmico de los receptores de la cavidad, así como un análisis de los transitorios en el receptor de cavidad de sales fundidas. No obstante, en una situación real de flujos de irradiación solar concentrada, la potencia de entrada del receptor resulta difícil de mantener constante debido a cambios en las condiciones ambientales, tales como las nubes, aspecto que ya se discute anteriormente y que las publicaciones de otros autores aquí reportadas, exponen. Aunque esta investigación no es reveladora en cuanto a modelar las situaciones de gradientes térmicos en los tubos que componen el receptor, es ilustrativa al respecto de la eficiencia térmica de la operación global del receptor. Esto sucede principalmente por efecto de que la energía eléctrica que calienta al receptor por efecto Joule, no imita situación de calentamiento que se logra por la distribución de energía solar concentrada.

Las propiedades termo-mecánicas que se obtienen mediante la investigación, son la base de los cálculos de diseño termo-estructural y permiten el desarrollo de modelos por método de elementos finitos precisos, este es el argumento que motiva a las investigaciones como la de Codrington et al. (2009). Las propiedades de los materiales de alta temperatura que son adecuados para el desarrollo de modelos constitutivos en los análisis no están fácilmente disponibles en la literatura, según lo discuten.

La principal motivación para el estudio de Codrington et al. (2009) es el desarrollo de un aparato sujetador de costo relativamente bajo, sencillo de usar y fiable para medir las propiedades termo-mecánicas en el régimen de alta temperatura para su uso en el análisis térmico-estructural de estructuras. A altas temperaturas, las fuerzas externas que generalmente se consideran insignificantes pueden afectar en gran medida el comportamiento mecánico de las pequeñas muestras. Por ejemplo, las fuerzas de contacto del equipo medidor de temperatura o de medición de deformación, tales como termopares o extensómetros mecánicos, pueden producir grandes concentraciones de esfuerzos. Por

lo antes descrito es conveniente emplear solo termopares en la presente investigación doctoral o instrumentos de medición de no-contacto con los que cuenta el HoSIER.

2.6. Investigaciones relativas a materiales de receptores de torres centrales

Los sistemas de concentración solar están constituidos de numerosos dispositivos ópticos que se fabrican con la intención de proporcionar eficiencia y ser tan duraderos como sea posible para garantizar la fiabilidad del proceso de conversión de energía. Desde esta perspectiva, los materiales que constituyen estos sistemas tienen que ser seleccionados debidamente y proporcionar las características para cumplir con su función específica. Los receptores solares utilizados se diseñan para absorber el máximo de energía solar y transferirla al fluido de trabajo con la mayor eficiencia.

Boubault et al. (2012) explican que actualmente, se utiliza para los tubos de absorción el Inconel 625, mismo que está recubierto con una capa de pintura a base de silicio (negro PyroMark 2500) para aumentar la capacidad de absorción de la radiación solar. Este metal-sustrato es empleado debido a sus excelentes propiedades mecánicas a altas temperaturas. Con el objetivo de determinar las condiciones óptimas para acelerar el envejecimiento de este material revestido (metal y revestimiento de pintura), Boubault et al. (2012) desarrollaron un modelo simétrico bidimensional que reproduce el comportamiento térmico. Varios indicadores térmicos, que son representativos de los factores de envejecimiento térmico y el rendimiento térmico del material (i.e. temperatura, gradientes térmicos, gradiente temporal), se consideraron en su análisis utilizando diferentes configuraciones de condiciones de frontera en regímenes permanentes y variables. Las condiciones de frontera que generan mayor influencia en el esfuerzo térmico para degradar las propiedades de los materiales se pusieron de relieve mediante un análisis de sensibilidad.

Boubault et al. (2012) recomiendan que para diseñar los correspondientes ensayos de envejecimiento, se debe prestar especial atención a la energía solar incidente y las características de enfriamiento del material. La absorptividad superficial total, la conductividad térmica y la resistencia térmica de contacto entre la pintura y las capas de metal, son los parámetros que más afectan el comportamiento térmico del material. Ellos simulaban ciclos de irradiancia sobre el material, para posteriormente analizar la evolución de los indicadores térmicos.

Es relevante la siguiente idea que Boubault et al. (2012), y que es una de las motivaciones fundamentales del presente desarrollo doctoral. En virtud de que el tiempo de vida de un receptor

puede ser de varios años, el envejecimiento de los materiales no puede ser estudiado en tiempo real o bajo condiciones normales de trabajo.

No todos los receptores solares emplean fluidos líquidos en su ciclo primario de calor. Boubault et al. (2012) exponen que los tubos receptores SOLHYCO están diseñados para ser irradiados por una irradiancia solar concentrada típica de 150 kW m^{-2} . El fluido de trabajo es aire presurizado a 4.5 bares con un flujo de masa de 0.8 kg s^{-1} . En este sistema, el aire a la salida puede llegar a $800 \text{ }^\circ\text{C}$. En este caso de estudio, para una relación de concentración solar de 16 000, que se alcanza el valor en el foco de un horno solar parabólico de 2 m de diámetro (PROMES CNRS laboratorio, Odeillo, Francia), el pico de irradiancia media alcanzaría $5\,056 \text{ MW m}^{-2}$, para una velocidad media de variación de $0.368 \text{ MW m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, lo que llevaría a choques térmicos muy fuertes para ese material. No es la magnitud de flujo radiativo concentrado para los experimentos de esta investigación doctoral, no obstante, sirve como marco de referencia de las pruebas.

Las propiedades termo-mecánicas, termo-físicas y termo-ópticas se ven afectadas por los ciclos repetidos de irradiancia, según lo que exponen Boubault et al. (2012). Las propiedades químicas también pueden verse afectadas durante la vida útil de servicio del material, pero no se estudian en esta investigación. En el desarrollo de la presente investigación doctoral se tiene el objetivo de que todas las condiciones que estén actuando en la degradación del material generen un impacto en las propiedades mecánicas, las cuales serán validadas en el ensayo monotónico a la tracción.

En régimen variable, la capacidad calorífica así como de la densidad de los materiales están involucrados en el desempeño térmico instantáneo, como se desarrolló en el trabajo previo de maestría (Alvarez O., 2011). Sin embargo en este estudio se consideran fijos. Boubault et al. (2012) eligieron aplicar una irradiancia de forma cuadrada en lugar de otras formas (triangular, sinusoidal, etc.), porque en amplitud fija y período fijo, la amplitud máxima de energía se obtiene. Por lo tanto, los factores de estrés (temperatura, gradientes espaciales y temporales) son teóricamente superiores. En el análisis que Boubault et al. (2012) realizan ponen indicadores térmicos con el argumento de que eso será lo que determinara la fatiga, i.e. los gradientes térmicos, sin embargo, no presentan en este estudio un análisis de los esfuerzos térmicos, que son responsables de la degradación de las propiedades mecánicas del material (i.e. fatiga térmica e/o iniciación de microgrietas). Cabe destacar que su geometría es plana.

En otra investigación de Boubault et al., en (2014), presentan un enfoque experimental para estudiar el envejecimiento de los materiales absorbentes usados en los receptores de las centrales termosolares.

Nuevamente estudian un material considerado de dos capas (pintura metálica y recubrimiento) que se utiliza comúnmente en los receptores de torres solares, llevando a cabo pruebas de envejecimiento acelerado en un dispositivo de concentración solar en el laboratorio PROMES (Odeillo, Francia).

Boubault et al. (2014) exponen que las normas de ensayo acelerado deben complementarse con nuevos métodos de predicción, de manera que el tiempo de vida de servicio de los receptores solares de alta temperatura sea extendido. Con base en la investigación realizada para la presente investigación doctoral, se reconoce que no existe una metodología establecida para evaluar el envejecimiento de la diversidad de propiedades termofísicas que evolucionan en un material metálico como producto de la exposición a flujos radiativos de alta concentración.

El envejecimiento en general se refiere a la degradación de alguna propiedad de los materiales durante un período de tiempo. Para materiales empleados como absorbedores solares, entre las propiedades más esenciales son la absorción de la radiación solar y la transferencia de calor a un fluido caloportador, al tiempo que debe garantizarse la integridad mecánica de los materiales.

Se supone en este estudio de Boubault et al. (2014) que todos los metales operan bajo condiciones en que son capaces de soportar los esfuerzos térmicos. En diversas investigaciones discutidas anteriormente, se explica que se encuentra trascendental determinar caracterizar los materiales frente a los choques térmicos, que de cualquier forma la degradación mecánica ocurre por degradación de las fases.

Un material será considerado "sostenible" si la vida de servicio es superior a un mínimo aceptable de vida útil. Para el receptor SOLHYCO, el flujo solar concentrado es absorbido a través de tubos metálicos por los que circula el aire a presión. El aire se calienta de 600 °C a 900 °C para operar una microturbina de 100 kW de potencia. Los tubos de absorción están hechos de la super aleación Inconel 625, con un revestimiento de Pyromark 2500. Algunas pruebas bajo alto flujo solar concentrada demuestran que este material puede soportar temperaturas de hasta 1 027 °C, y que es muy resistente a la corrosión y la oxidación. Los tubos tienen espesores de 1 mm con recubrimiento de 15 micras. Las muestras de tubos se observaron por microscopía electrónica de barrido.

Para la investigación de Boubault et al. (2014), una instalación denominada Solar Accelerated Aging Facility (SAAF, por sus siglas en inglés) fue empleada para exponer el material a un flujo radiativo solar concentrado controlado, con magnitudes de 1500 kW m⁻². En esta instalación se emplean muestras cuadradas de 50 mm por lado. La cara posterior de la muestra se enfría por convección con el aire a 4

bar, que es el mismo medio de enfriamiento para el desarrollo de la campaña experimental de este trabajo doctoral.

Como las centrales CSP están en el comienzo de su desarrollo empresarial, aún se carece de información de retroalimentación sobre la historia radiativa y térmica de materiales de receptores solares, según lo que discuten Boubault et al. (2014). Con la construcción de una base de datos extensa sobre la historia y las propiedades de envejecimiento de materiales absorbentes, será posible entender mejor cómo se producen los mecanismos de envejecimiento en tales condiciones y así mitigar sus efectos.

En la Plataforma Solar de Almería en España, A. Rojas-Morín y J. Fernández-Reche (2011) realizaron investigaciones sobre el comportamiento de material metálico Inconel 625 LCF, mediante un sistema eléctrico y neumático instalado en el concentrador solar de tipo disco parabólico de nombre DISTAL I, mismo que permite realizar pruebas abruptas de calentamiento y enfriamiento en materiales para receptores solares de torre central, al exponerlos a radiación solar concentrada. Estas pruebas se realizaron para simular las condiciones de operación de un receptor solar. Con este sistema se estimó el tiempo de vida bajo fatiga térmica de una placa de Inconel 625 LCF recubierto con Pyromark 2500, que constituyen materiales típicamente empleados en la construcción de elementos componentes de los receptores de los sistemas de torre central. Esta investigación tiene el objetivo de ampliar el conocimiento respecto a la vida útil de los materiales de alta resistencia térmica y mecánica, así como de gran estabilidad química, cuando se someten a la diversidad de factores degradantes combinados que implica la exposición a alto flujo radiativo en condiciones ambientales comunes donde se requiere que operen los sistemas de concentración solar.

A fin de llevar a cabo el ensayo de envejecimiento acelerado se empleó un sistema en el que se colocó un dispositivo de posicionamiento que manipulaba los materiales del receptor. Un brazo neumático accionaba el marco de las pruebas en la dirección tangencial; al tiempo que un mecanismo con un motor de corriente directa posicionaba al mecanismo neumático para obtener una mayor gama de distancias focales. Este sistema fue previamente modelado para su operación realizando un trazado de rayos mediante el software SolTrace de NREL, y un posterior análisis de calor realizado mediante diferencias finitas. Mediante este análisis se concluyó que en un tiempo de 14 s, se alcanzaría una temperatura máxima de 1033 °C y mediante el campo de temperaturas obtenido, se obtuvo el campo de esfuerzos térmicos. Estos esfuerzos se han utilizado para estimar la fatiga estructural de los materiales mientras exponen por la radiación solar, con el objetivo también de obtener mejores

estimaciones de la vida útil de los materiales de receptores, mediante una representación de una curva de fatiga S-N; que implica la representación del número (N) de ciclos termo-mecánicos de cierta magnitud (S) que los materiales pueden soportar.

Finalmente se representan los resultados del análisis teórico experimental mediante el coeficiente y exponente de la ecuación de Basquin (4.6), misma que tiene un fundamento semejante a la curva de esfuerzo monotónico:

$$S_{Nf} = A(N_f)^B \quad (2.2)$$

Donde S_{Nf} es el esfuerzo soportable para el número de ciclos posible hasta la fractura por fatiga N_f ; y A y B son el coeficiente y exponente de Basquin, respectivamente. Rojas-Morín y Fernández-Reche (2011) concluyen que es posible realizar 1 000 ciclos térmicos en 8 horas de funcionamiento; al tiempo con base en los resultados obtenidos para el esfuerzo térmico máximo en condiciones operativas de los sistemas de alta concentración (500 kW m⁻², 650 ° C y 800 kW m⁻², 908 ° C de temperatura máxima, respectivamente), es posible suponer que el material puede operar para tales condiciones con un criterio de vida útil aceptable para tal material, mismo que representa que para aleaciones de metales, debe soportar de 10³ a 10⁸ ciclos antes de cualquier componente falle por fatiga térmica.

Rodríguez-Sánchez et al. (2014) coinciden en que uno de los principales problemas de las plantas de torre de energía solar con sales fundidas como fluido de transferencia de calor, es la fiabilidad de los receptores centrales. Señalan que el receptor debe soportar temperaturas de trabajo muy elevadas, corrosión de sales fundidas y transitorios de flujo solar importantes, que conducen a esfuerzos térmicos y fatiga. Por tal motivo la investigación debe ser más extensa para involucrar todos los factores, es impensable descartar la integridad mecánica de los materiales como una garantía si los límites de esfuerzo se respetan durante la operatividad, ya que esto es muy poco factible en razón de lo impredecible de las condiciones meteorológicas, y de la constante corrosión y erosión de los materiales.

En esta investigación se realiza un análisis térmico, mecánico e hidrodinámico de los receptores, asumiendo flujo de calor constante en cada sección discreta axial en la frontera de la pared del tubo, considerando las variaciones circunferenciales en el perímetro de los tubos causada por la diferencia entre el flujo de calor recibido por la parte de frontal de los tubos y la parte trasera; estas consideraciones son de completa relevancia, pues la distribución del flujo radiativo es dependiente tanto de la forma del Sol considerada, la distribución lograda con los elementos ópticos de

concentración, así como de la geometría de los elementos del receptor. El análisis térmico muestra que las pérdidas de radiación son más altas que en otras publicaciones, y en consecuencia, la eficiencia térmica es más baja también. Esto es debido al hecho de que la temperatura efectiva de la pared externa del tubo es mayor que la temperatura promedio de todo el tubo. La temperatura de la capa límite de los fluidos caloportadores del interior de los tubos es el parámetro más limitante para el diseño del receptor, debido a que es responsable de la descomposición de sal y la corrosión del tubo. Los diámetros pequeños de tubos y pocos paneles de estos tubos dan como resultado bajas temperaturas de capa límite, no obstante que este tipo de diseño aumenta la caída de presión. Por lo tanto, existe un compromiso entre la temperatura de capa límite y la caída de presión.

Mucha de la atención a estas plantas tiene que ser prestada al campo de helióstatos, ya que significa alrededor del 50 % del costo total de la inversión de capital, pero también para el receptor, ya que representan el 20 % del costo total de la inversión de capital, según lo que exponen Rodríguez-Sánchez et al. (2014). Este hecho pone en relieve la importancia de una correcta estimación de la eficiencia térmica del receptor, para evitar el aumento de tamaño del campo de helióstatos.

También se expone que durante el funcionamiento del receptor, el principal problema es la corrosión del tubo causada por el efecto altamente corrosivo de la sal fundida a elevada temperatura; pero también es de extrema importancia considerar el desarrollo de grietas en las zonas soldadas y problemas relacionados con la resistencia del material, debido a esfuerzos térmicos y el desarrollo de fatiga, el sobrecalentamiento de los tubos, que como se ha descrito anteriormente, puede conducir a un choque térmico, así como la congelación de la sal cuando existe un transitorio de baja temperatura (paso de las nubes). En el desarrollo del presente trabajo doctoral, no se analiza la degradación de las propiedades mecánicas de los materiales de los receptores frente a la corrosión por sales fundidas, lo que se supone que acentuaría de forma relevante esta afectación, sin embargo, una corrosión que se puede considerar menor, sí se presenta en razón de las altas temperaturas y el aire circundante y el aire de enfriamiento al interior al tubo.

Este análisis térmico tiene en cuenta variaciones axiales y variaciones circunferenciales de la temperatura de la pared del tubo, situación que no es común encontrar en los sistemas térmicos de las plantas que emplean hidrocarburos, y por lo cual los sistemas de concentración solar requieren análisis muy particulares. Los mismos parámetros o lo más parecido posible, a los de Gemasolar han sido utilizados en este estudio, con la excepción del diámetro del tubo externo y el número de paneles, ya que son variables. La sal binaria entra en el receptor a una temperatura global de 290 °C (para que la sal no se congele) y sale a 565 °C para evitar la descomposición de sal solar. La descomposición térmica de

la sal solar comienza alrededor de 580 °C. Es muy importante resaltar que en el análisis de calor para la operación normal, en el panel que contiene al tubo representante, la temperatura máxima de pared exterior del tubo es de 686 °C. En un tubo receptor representante y considerado para el modelo, la temperatura de capa límite alcanza los 642 °C; debido a que la conductividad del material del tubo es similar para todos los metales mencionados en su texto, para todas las capas límite la temperatura es más o menos la misma. Eso significa que el receptor que está hecho con acero inoxidable 316 o Inconel 625LCF tiene riesgo de una severa corrosión y por lo tanto sólo un receptor hecho de Incoloy 800H podría operar a esta temperatura sin riesgo de fractura temprana.

Al igual que se enuncia en otras investigaciones aquí presentadas y en el propio Metals Handbook Vol.19, la deformación plástica es acumulativa y los tubos fallarán en el futuro debido a la fatiga de bajo ciclado. Por otra parte, la combinación de tensión térmica y la corrosión pueden producir un daño aun más severo en los tubos. Rodríguez-Sánchez et al. (2014) discuten que es comúnmente aceptado que el esfuerzo térmico en los tubos debe ser inferior al 40 o 50 % de la resistencia máxima a la tracción, para evitar fallos debidos a la fatiga. Sin embargo, esto representa una recomendación operativa que los autores comentan, ya que la acumulación de daño por deformación plástica puede ser la causa de fatiga del material, sin importar, en muchas ocasiones, la magnitud de tal esfuerzo.

La tensión térmica más alta siempre es inferior a 0.35 de acuerdo con lo que Rodríguez-Sánchez et al. (2014) exponen entre sus resultados. En este caso las tensiones térmicas nunca superan el límite de fatiga y por lo tanto la temperatura de la capa límite es el parámetro crítico en el diseño del receptor considerado en este estudio. No obstante, se ha discutido en Metals Handbook Vol. 19 que esta consideración no siempre es acertada, pues el concepto de límite de fatiga puede no aplicarse en realidad a ningún material. El esfuerzo máximo es principalmente una función del flujo de calor absorbido por los tubos y luego del área efectiva del receptor. En todos los casos se observó que la tensión térmica es menor que el límite impuesto, siendo este parámetro menos restrictivo que la temperatura de la capa límite. Por lo tanto, los esfuerzos térmicos, no son un parámetro crítico inmediato en los términos de radiación solar utilizados en este trabajo. No obstante, se expone que el límite de esfuerzo para que la acumulación de daño por esfuerzos en la región plástica sea nulo, es en realidad inexistente, por lo que cuando se mantienen los esfuerzos bajo las magnitudes señaladas, el riesgo está aún presente, a pesar de lograr reducir las afectaciones por corrosión. Al tiempo no se debe perder de vista que estas consideraciones son aplicables cuando el fluido caloportador son sales fundidas, y esta situación no sería presente cuando se utilice aire o agua en un sistema semejante; por esta razón y por el hecho de que la eficiencia global del sistema aumenta con la temperatura, es

necesario mayor conocimiento de los límites mecánicos de operación de los materiales de los receptores en situaciones de mayor exigencia térmica.

El comportamiento de la caída de presión es opuesto a la temperatura de la capa límite y las tensiones térmicas. El mejor diseño, teniendo en cuenta todos los factores de la caída de presión, la temperatura de la capa límite y el esfuerzo térmico, parece ser un alto número de paneles y diámetro del tubo de 4.83 y 4.22 cm utilizando Incoloy 800H como material del tubo, o bajo número de paneles con diámetros de 3.34 y 2.67 cm utilizando Incoloy 800H o Inconel 625LCF. Este diseño contempla un total de 576 tubos y 10 toneladas de aleación 800H, y conduce a una eficiencia térmica cerca de 78 % y una caída de presión de 4 bar. Coinciden con el resto de las investigaciones en que una superficie metálica es altamente absorbente en el espectro solar, con baja emisión general, y altamente reflectante en el espectro térmico; aspectos que pueden lograr el objetivo de minimizar las pérdidas debidas a la re-radiación en el rango del infrarrojo térmico. Esta investigación pretende responder a la necesidad de obtener materiales cuyo comportamiento óptico permita lograr mejores eficiencias globales de los sistemas fototérmicos.

2.7. Investigaciones relativas a análisis de calor en receptores y elementos de receptores de ISC

En el estudio de Jianfeng et al. (2010) investigan la transferencia de calor y características de absorción de un tubo receptor tipo externo, bajo radiación solar concentrada que incide unilateralmente. Esta es una investigación teórica. Exponen que dado que la relación de la pérdida de calor de la radiación infrarroja tiene un máximo en flujo de energía moderada, la eficacia de absorción de calor primero aumenta y luego disminuye con el flujo de energía incidente. Los resultados de los cálculos que realizan muestran que los parámetros de transferencia de calor calculado a partir del flujo incidente de energía promedio tienen buena concordancia con los valores medios de la circunferencia bajo diferentes condiciones de frontera. Para una tubería entera con recubrimiento de PyroMark, la eficacia de absorción de la región principal está por encima de 85%, y sólo la eficacia de absorción cerca de la región incidente paralelamente está por debajo de 80%. Con esto, muestran la variación la absorptividad con base en la variación del ángulo de la circunferencia. En general, la eficacia de absorción de todo el conducto se incrementa con la velocidad de flujo y la disminución de la longitud del tubo, y se aproxima al máximo a óptimo flujo solar concentrada; este aspecto es de gran relevancia para el modelo por desarrollar en cuestión, previo a la experimentación en el HoSIER.

Además, reportan las distribuciones de la temperatura de la pared y la eficiencia de absorción en el tubo entero. Sus resultados mostraron que la eficiencia térmica de un receptor puede ser mejorada con

la convección forzada y el rendimiento de la transferencia de calor desigual a lo largo de la circunferencia de la tubería es muy importante para el esfuerzo térmico del receptor, aspecto que se investiga profundamente en el desarrollo de la investigación doctoral.

Al igual que en otras investigaciones incluidas en estos fundamentos teóricos, el flujo de calor del sistema de energía solar concentrada debe calcularse utilizando un trazador de rayos dados los elementos ópticos de concentración, pero la radiación solar concentrada en esta investigación se asume como uniforme. La radiación solar concentrada unilateral tiene una densidad uniforme de I_0 . El flujo de energía incidente y la temperatura de la pared de la circunferencia del tubo para $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$, son modeladas como funciones angulares. Sin embargo, estas ecuaciones no son útiles en virtud de que se cuenta con el trazado de rayos realizado con el software SolTrace de NREL, del que se obtienen tablas del flujo radiativo discreto como dato de entrada para el modelo.

En los concentradores cilindro-parabólicos con sistema de tubo receptor, el flujo radiativo concentrado y el fluido de transferencia de calor que fluye a través del tubo receptor y puede inducir esfuerzos térmico y deflexión. En este estudio puramente teórico de Wang et al. (2010), analizan el receptor de tubo excéntrico con el objetivo de reducir las tensiones térmicas de tubo receptor. Ellos acoplan a su análisis numérico las distribuciones de flujo de calor concentrado, distribuciones de temperatura y campos de estrés térmico, tanto de los receptores de un tubo excéntrico y uno concéntrico. La distribución de flujo de calor concentrado en la periferia media inferior del receptor tubo se obtiene por el método de seguimiento de rayos Monte-Carlo, para luego ajustar la distribución de flujo de calor calculada desde el método Monte-Carlo al modelo de análisis de dinámica de fluidos computacional; de esta forma obtienen las distribuciones de temperatura y campos de esfuerzo térmico por el análisis de dinámica de fluidos computacional y de elementos finitos, respectivamente.

El modelo presentado contempla un aceite térmico (Syltherm 800) circulando dentro de un tubo de acero inoxidable. Mediante el análisis de elementos finitos, Wang et al. (2010) obtienen el campo de esfuerzos térmicos de Von Mises, que resulta ser un campo de esfuerzos radial, así como el campo de esfuerzo circunferencial y axial; el campo resultante es concluyente respecto de la temperatura extrema máxima de los tubos de esta investigación doctoral.

El receptor de tubo concéntrico tiene un valor más alto de temperatura máxima que es de aproximadamente 11°C mayor que el de receptor de tubo excéntrico. A lo largo de la mitad inferior interna de la circunferencia (entre 180° y 360°) en donde se encuentran los picos de temperaturas de receptores tanto en el tubo concéntrico y excéntrico, lo que puede conducir a mayores esfuerzos

térmicos. La causa de este fenómeno se debe atribuir al aumento de capacidad térmica en la sección inferior del tubo receptor debido al aumento grosor de la pared en esta sección. Los valores de pico de estrés térmico de los dos perfiles de ambos se encuentran en un ángulo de 270° , donde los valores pico de temperatura se encuentra también.

En otro estudio puramente teórico de Wang et al. (2012), cuatro diferentes materiales (acero inoxidable, aluminio, cobre, SiC) se consideran para el análisis numérico del campo de esfuerzos desarrollado. La distribución de la irradiación concentrada de calor solar se obtiene por el método de Monte-Carlo, y se utiliza como condición de frontera para la Dinámica de Fluidos Computacional. Con este análisis se obtienen los campos de temperatura y el campo de temperatura resultante definido en los nodos de esta malla se interpola como dato de entrada para los nodos de la malla con la cual se obtiene el análisis de esfuerzo térmico. Finalmente, se obtienen los gradientes de temperatura, campos de esfuerzo térmico y relaciones de esfuerzo de falla de los materiales diferentes, y los comparan para dar sugerencias sobre la selección de materiales.

Dos fenómenos han sido considerados en el análisis de transferencia de calor: la conducción en el interior de la pared del tubo receptor y la convección desde la superficie interior del tubo receptor para el fluido que fluye dentro de él. El análisis se basa en el estado de equilibrio, continuidad tridimensional, ecuación de momento y la ecuación de la energía. También, el receptor se considera ilimitadamente extenso y libremente expandible. Por lo tanto, el esfuerzo térmico es causado por los gradientes de temperatura internos en la pared del tubo. La menor conductividad del material ocasiona que se obtenga un perfil con forma de oblonga en el campo térmico obtenido del perfil del tubo.

2.8. Estudios relativos a las afectaciones microestructurales en materiales con tratamientos térmicos de índole convencional.

El propósito del estudio de Hsieh et al. (2008) es exponer la evolución de la microestructura y las propiedades mecánicas del material de soldadura en los diferentes aceros inoxidables debido al proceso de soldadura por arco con tungsteno y cubierto por gas inerte. En su estudio, observaron precipitados masivos de ferrita- δ junto a la fase de austenita en el metal de soldadura de acero inoxidable AISI 430 y AISI 304. En sus análisis de XRD, mostraron que la ferrita- δ obtuvo la mayor intensidad de difracción que el resto de las fases en los metales de soldadura.

Se identificó que la ferrita- δ era una fase rica en Cr y baja en Ni mediante los análisis de dispersión de energía de rayos X, lo que indica que el elemento Cr es un estabilizador de la ferrita- δ en los aceros

inoxidables, y de esta misma situación los investigadores exponen que la ferrita- δ es aparente en virtud de la migración del Ni que es el estabilizador de la fase austenítica a temperatura ambiente. La precipitación de la ferrita- δ reportó también valores altos de microdureza en ambos aceros inoxidable afectados térmicamente y por supuesto en el metal fundido por el proceso. Estos investigadores no discuten al respecto de afectaciones negativas debidos a la generación de ferrita- δ a partir de su proceso; sin embargo, el hecho de perder la fase austenítica deseable, antepone la posibilidad de un material susceptible de corrosión. Cabe destacar un importante aspecto: la soldadura por arco eléctrico empleada, posee una importante componente emisiva en el espectro UV al margen de la temperatura de fusión alcanzada.

El trabajo de Sokolov et al. (2009) consistió en preparar películas de titanio sobre sustratos de acero AISI 430, 304 y 316Ti sometidos a diferentes pretratamientos, los cuales consistieron en material “rayado” para obtener rugosidad, rayado-calcinación y rayado-ataque químico. Estudiaron entonces la influencia del tipo calidad del acero y las condiciones de pretratamiento sobre la morfología y la microestructura de la película y se dilucidaron los motivos de degradación de éstas películas. La parte de particular interés para el objeto del desarrollo del proyecto doctoral es reconocer las afectaciones y transformaciones que se obtuvieron en los aceros inoxidable debido a los pretratamientos realizados para el estudio.

El proceso de calcinación que realizaron para los sustratos de acero inoxidable, consistió en calentar a 600 °C por método convencional durante dos horas, de donde se observan los siguientes resultados de interés. Los análisis de difracción de rayos X, revelan que existen picos que revelan material cristalino a los 44.1°, 51.4° y 75.6°, los cuales son característicos de la composición $Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}$ y que se encontraron en ambos aceros austeníticos 304 y 316Ti sin importar su tratamiento térmico previo. Una particularidad ocurre con el acero inoxidable AISI 430, cuyos picos aparecen en 44.8° y 65.2°, los cuales son específicos de la cromoferrita; lo que sugiere un análisis cuidadoso en el momento de la caracterización de las fases obtenidas. Abundando en esta misma situación de caracterización, estos investigadores reportan que el acero de carácter austenítico AISI 304 si obtiene una transformación de fase en el ángulo 44.8° luego de su calcinación, mismo ángulo en el que el AISI 430 muestra cromoferrita; implicando obtener una transformación de fases hacia cualquiera de ambos materiales cristalinos.

Otro aspecto de gran interés para la presente investigación doctoral es que el acero inoxidable AISI 316Ti calcinado bajo el mismo proceso descrito por estos investigadores (con temperatura de estudio similar a la de interés para los procesos de operación de los sistemas de concentración de tipo torre

central), no obtienen ninguna transformación de fases debida al proceso térmico; sino que retiene sus características puramente austeníticas reveladas por el análisis XRD. Este material señalado a pesar de estar enriquecido en Ti, es en todo semejante al material propuesto en la presente investigación doctoral.

Una investigación en un acero muy similar al empleado para el presente desarrollo doctoral, es la presentada por Saeidi et al. (2015), en la que obtienen una transformación de acero inoxidable austenítico en un acero con las dos fases austenítica y ferrítica. Su trabajo consistió en crear elementos sólidos de este acero a partir de sinterización con láser, para posteriormente realizar un tratamiento térmico de recocido sobre las mismas piezas obtenidas.

La caracterización realizada sobre las piezas, empleó análisis por difracción de rayos X, y microscopía electrónica de barrido, entre otros; para reconocer a partir de éste que los elementos sólidos tratados a 800 °C y 900 °C por método convencional no lograron la transformación de fases descrita; en tanto que el mismo fenómeno de transformación si ocurrió a las temperaturas de 1100 °C y 1400 °C. El reporte de la investigación señala que desde varias perspectivas se deben tener reservas cuando un acero inoxidable de este tipo sea seleccionado para aplicaciones térmicas a más de 900°C. Los investigadores exponen que el propósito de su trabajo es evidenciar la confiabilidad de este tipo de acero con objetivo de aplicaciones térmicas.

La investigación es clara en cuanto a los siguientes aspectos metalúrgicos factibles e influenciados por los elementos presentes en la aleación: el contenido de C, es influyente en el endurecimiento del material mediante la obtención de martensita, de modo que, conjuntando este aspecto con los descritos por los anteriores autores, el Cr es un agente de retención de ferrita- δ , como lo es el níquel para la fase austenítica.

Es en todo rescatable un la situación particular de que la transformación de fase mediante recocido por método convencional, logra una transformación de fase dual austenita-ferrita hasta conseguir temperaturas mayores a 1100 °C.

Capítulo 3. Definición del problema.

Las tecnologías termo-solares de alta temperatura se clasifican entre los sistemas de aprovechamiento solar activos; es decir, que los sistemas cuentan con dispositivos que se mantienen siguiendo al Sol a lo largo del día para aprovechar la irradiación que llega a la superficie terrestre.

Los sistemas termo-solares activos que emplean energía solar concentrada, cuentan con dispositivos ópticos que les permiten obtener el flujo radiativo solar concentrado en un área focalizada. A esta primera etapa, se denomina sistema óptico de concentración solar. Posteriormente, el flujo radiativo obtenido es aprovechado por un receptor que puede tener diferentes características físicas para aprovechar directamente o indirectamente el flujo radiativo concentrado. Se conoce como receptores de aprovechamiento indirecto, a aquellos receptores que absorben el flujo radiativo concentrado y que le utilizan para calentar un fluido que circula para operar un ciclo termodinámico; el receptor constituye lo denominado la segunda parte del sistema de aprovechamiento foto-térmico. Finalmente, el fluido caloportador, circula para operar un ciclo termodinámico, en el que otros dispositivos operan para realizar una conversión de energía térmica, típicamente en energía eléctrica aunque puede tratarse de cualquier sistema de aprovechamiento térmico. Esta última parte, que considera diferentes componentes dependiendo de la naturaleza y objetivo de aprovechamiento del calor, constituye la tercera etapa del sistema termo-solar.

Entre los sistemas que aprovechan el flujo radiativo concentrado, se encuentran los de canal parabólico, los de plato parabólico, las torres centrales, etcétera. En el receptor que utiliza esta última tecnología, es donde se centra el interés del presente estudio.

Para que las tecnologías termo-solares se mantengan compitiendo e incluso puedan prevalecer sobre las tecnologías de aprovechamiento de energía térmica para producción de energía eléctrica y otras, es necesario que operen con la mayor eficiencia posible a lo largo del tiempo, que su vida útil sea tan prolongada como sea posible y que su costo de instalación y operación sea minimizado. Sin duda, todos estos aspectos en conjunto representan un gran reto para la investigación, la cual debe proponer una solución para cada uno y mejorar la funcionalidad de los dispositivos actuales.

Es bien sabido que para que un sistema termodinámico obtenga la mayor eficiencia posible, es necesario que sea operado en una diferencia de temperaturas cuya brecha sea tan grande como sea posible. Esto es, a partir del planteamiento de la eficiencia de Carnot, se conoce la ecuación (3.1)

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{baja}}{T_{alta}} \quad (3.1)$$

Donde η_{Carnot} es la eficiencia de Carnot, y T_{baja} y T_{alta} son las temperaturas baja y alta respectivamente en las que opera el sistema térmico.

Para la que en el caso de un sistema de concentración solar se puede escribir la ecuación (3.2)

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{alrededores}}{T_{receptor}} \quad (3.2)$$

Donde $T_{alrededores}$ y $T_{receptor}$ son las temperaturas del alrededor (ambiental) y del receptor sobre el que incide la irradiación concentrada, respectivamente, en las que opera el sistema térmico.

Por esta razón, es posible decir que una de las mejoras globales del sistema termodinámico, es la de obtener la mayor temperatura posible en el receptor. Sin embargo, esto tiene diversas implicaciones y limitantes.

El hecho de que los receptores tengan una temperatura elevada, exige más de los materiales mientras mayor sea la temperatura deseada. Esto, sin importar el material que sea, bajo la óptica de tener una temperatura muy alta, requiere en principio de factores de concentración altos y una alta potencia proveniente del sistema óptico de concentración. Es evidente entonces que requiere de un sistema óptico de mayor costo mientras mayor sea la temperatura planteada. Una alta temperatura, sin importar el material constituyente del receptor del que se trate, necesariamente implica que se obtengan campos y esfuerzos térmicos de mayor magnitud, puesto que la distribución del flujo radiativo concentrado, que siempre carece de uniformidad, impondrá gradientes térmicos que se traducen en esfuerzos de mayor magnitud; por supuesto, sin olvidar la restricción anterior de que el flujo radiativo concentrado pueda llegar a fundir el material del receptor, como de hecho sucede con los receptores de espuma cerámica, en los que se puede observar fusión de las regiones absorbentes de la irradiación solar concentrada. Esta situación desfavorable se presenta, no solamente debido a la distribución no uniforme del flujo radiativo, sino también por el aspecto de que los absorbedores tienen una sección de su superficie expuesta al flujo concentrado mientras que otra parte está “a la sombra”; que si bien está expuesta a la radiación infrarroja que proviene de las zonas calientes de otros elementos estructurales y zonas absorbedoras vecinas, no tiene una absorción directa del flujo radiativo concentrado.

Un aspecto de reciente investigación y que se discute en el presente trabajo, es el de la capacidad que presenta el espectro radiativo solar para transformar las soluciones sólidas de los metales conocida

como alotropía. Esta situación es favorable en el campo de la manufactura, ya que se obtienen transformaciones deseadas en menores tiempos si se compara con las técnicas convencionales de transformación y tratamientos térmicos superficiales, puesto que los materiales metálicos son altamente absorbentes en el espectro solar. Sin embargo, esta misma situación puede resultar sumamente desfavorable en el caso de los materiales metálicos de los receptores, ya que ante la necesidad de la prolongada exposición, se obtiene transformación de las soluciones sólidas y envejecimiento de la matriz metálica con la formación de nuevos compuestos intermetálicos, aspecto que puede lograr una transformación de sus propiedades mecánicas iniciales deseables (como en el caso de ductilidad en fragilidad), que le hace susceptible a la fractura en caso de presentarse un choque térmico provocado a su vez por un aumento súbito en la irradiación en la superficie terrestre o por una falla en el control del sistema óptico de concentración, y que logra un alto impacto cuando se toma en cuenta que gracias a este último sistema, la energía solar es decenas a cientos de veces concentrada.

Herranz y Rodríguez (2010), coinciden en que el espectro solar, además de presentar una alta absorptividad por los metales, tiene esta capacidad de activar la alotropía y otras transformaciones de estos materiales debido a las componentes en el ultravioleta. Esta es la razón por la que los materiales, obtienen transformaciones y/o afectaciones más rápidas que cuando se exponen a otros flujos radiativos, i.e. tratamiento térmico con láser, o los que tienen lugar por el método convencional de calentamiento con mufla. Deben entonces reconocerse cualitativamente las transformaciones que tiene lugar en el material seleccionado en la presente investigación, a fin de reconocer implicaciones de cualquier carácter para el desempeño de un receptor, esencialmente si estas transformaciones incentivan degradación o interfieren con la operatividad propia de los sistemas.

Al igual que la mayoría de las fuentes de energía renovables, la energía proveniente del Sol, tiene la característica de la intermitencia. Por una parte, tiene lugar el día y la noche, en el que un receptor opera durante cierto número de horas en el periodo de las veinticuatro, y cuya duración de la exposición es dependiente de la temporalidad en el año. Al tiempo, existen fenómenos meteorológicos sobre los cuales tampoco se tiene control, como el de las nubosidades y pueden disminuir y aumentar súbitamente la irradiación en la superficie terrestre. Este último aspecto, es uno que antepone las condiciones más exigentes para los materiales del receptor; ya que el ciclo continuo de calentamiento y enfriamiento somete al receptor a esfuerzos intermitentes que con el paso del tiempo van acumulando daño en el material. Estos esfuerzos, independientemente de la magnitud de la que sean, generan deformaciones plásticas en el material y pueden, después de determinado número de ciclos, inducir fatiga mecánica térmica. El factor de nubosidad total periódica y/o parcial, contribuye también a la no-

uniformidad del flujo radiativo concentrado, en razón de que cuando las nubes han cubierto parcialmente una zona del sistema óptico de concentración, solamente una porción del sistema óptico se encuentra concentrado la radiación proveniente del Sol de manera sistemática.

Entre los alcances que tiene el presente trabajo, se tiene una de las principales limitantes de no contar con un sistema de bombeo de sales fundidas, que permita someter a los materiales metálicos a las condiciones de presión, erosión y corrosión que provocan las sales calientes, y que desde luego someten al material a una pronunciación de las condiciones degradantes; pues los sistemas que utilizan fluidos caloportadores que circulan como parte de un ciclo termodinámico, calientan este fluido al hacerlo circular al interior de tubos radiados por el flujo proveniente del sistema óptico de concentración y lo conducen a otra parte del sistema donde se almacena o se lleva a cabo otro intercambio de calor. Es importante mencionar, en este mismo sentido, que actualmente algunas investigaciones están enfocadas al estudio del comportamiento de los receptores con agua como fluido caloportador, generando vapor directamente en el interior del receptor solar, lo que hace que la situación de alta presión sea aún más considerable. La presión que tiene lugar por el bombeo de sales fundidas, de sodio líquido o de generación y circulación de vapor, produce una importante componente de esfuerzo en el material. Estas problemáticas mencionadas no toman lugar en el planteamiento experimental que tiene alcance el presente proyecto de doctorado.

Finalmente no se descarta que la alta temperatura hace susceptible al material metálico de sufrir oxidación por la reacción con los constituyentes de la atmósfera circundante de aire. Con el paso del tiempo, los óxidos formados y que carecen de resistencia mecánica por lo general, hacen que los componentes del receptor pierdan masa continuamente, provocando que el material, por este efecto, finalice con unas condiciones geométricas menores a las de diseño y por supuesto, presentando también una menor resistencia mecánica; sin embargo, con base en la duración de los experimentos realizados la ocurrencia de oxidación y eliminación de masa por este efecto puede no llegar a ser significativa.

Es en todo deseable que los receptores de los sistemas de concentración solar se compongan de materiales que sean tan duraderos como sea posible, para evitar nuevas inversiones con el objeto de reemplazar el receptor o algunos de sus componentes.

Con base en esta discusión, se retoma que las situaciones de alta temperatura, distribución del flujo radiativo, aspectos de presión, fatiga por ciclos térmicos, y capacidad del espectro solar de activar la alotropía y otras transformaciones de los materiales, oxidación incentivada por altas temperaturas;

operan en conjunto de manera sinérgica para transformar al material metálico que compone al receptor e incluso degradar algunas de sus propiedades deseables para la aplicación. Se hace necesario entonces comprender de la manera más cercana a las condiciones de operación como es que los materiales encuentran una degradación de las propiedades mecánicas iniciales y deseables de diseño.

El presente trabajo tiene la finalidad de investigar las afectaciones en las propiedades mecánicas de algunos materiales metálicos, que se obtienen por efecto de la exposición al flujo radiativo concentrado y en el que se presentan de manera combinada los fenómenos degradantes anteriormente descritos. Entre las motivaciones de este estudio, se encuentra determinar la transformación de estas propiedades mecánicas mediante un ensayo mecánico a la tracción una vez que algunas probetas de materiales metálicos se han expuesto a flujo radiativo concentrado; debido a que tal comprensión permitirá aportar conocimiento con respecto de la vida útil de estos materiales cuando se exponen al flujo radiativo solar concentrado, teniendo la geometría propia de los tubos componentes de los receptores de los sistemas de concentración de tipo torre central. También se tiene el objeto de reconocer cualitativamente las transformaciones que el material para reconocer las implicaciones que tienen estas en el desempeño a largo plazo del mismo.

De esta forma será posible determinar en qué medida se ha contribuido para un material metálico en específico el acortamiento de su vida útil, así como la magnitud del esfuerzo que un material afectado simultáneamente con todo este conjunto de factores puede soportar.

Actualmente no existe una metodología normalizada para ensayar los materiales para determinar sus propiedades mecánicas cuando han sido expuestos a radiación solar concentrada; por esta razón el presente trabajo presenta una metodología propia de experimentación, y un conjunto de procedimientos para determinar esta degradación de propiedades mecánicas y metalúrgicas mediante un ensayo monotónico a la tracción, estudios micrográficos y de difracción de Rayos X; luego de haber sido expuesto a ciclos de flujo radiativo que generan temperaturas y esfuerzos semejantes a los de los sistemas de concentración de tipo torre central en el material, cuya geometría particular cilíndrica tubular es particular de los mismos. El ensayo mecánico por su parte, pretende averiguar propiedades mecánicas particulares, la resistencia a la fluencia, la resistencia máxima a la tensión, el esfuerzo de fractura, y en general toda la curva de esfuerzo-deformación verdadera de la que se obtienen el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento a la deformación.

La importancia de este estudio reside en comprender como es que se desarrolla la fatiga térmica y la degradación de propiedades mecánicas para la ocurrencia de un bajo número de ciclos térmicos dentro

de los límites de operación máximo y mínimo de los sistemas de concentración de tipo torre central; si esta situación ocurre. Al tiempo se pretenden determinar las transformaciones en la microestructura, así como cualquier otra transformación alotrópica o de fase como producto de la exposición a la irradiación solar concentrada para aportar en el conocimiento; ya que como se expone, tiene una influencia particular por efecto de la componente ultravioleta propia del espectro solar incidente en la superficie terrestre.

Capítulo 4. Método.

4.1. Análisis de transformación de propiedades mecánicas en las probetas de acero inoxidable 316 por método de tracción monotónica

4.1.1. Curva de esfuerzo contra deformación verdaderos; trazo de la curva fluencia.

El objetivo es obtener una comprensión fundamental de los efectos que una historia previa de esfuerzos foto-térmicos cíclicos tiene sobre las propiedades mecánicas monótonas del acero inoxidable 316. Para este propósito, las muestras de este acero que fueron sometidas inicialmente a un número de ciclos esfuerzos provocados en distintas regiones de la probetas de acero inoxidable 316 por exposición el flujo radiativo concentrado en el HoSIER. Posteriormente, las probetas son cargadas monotónicamente empleando esfuerzos de tracción hasta la fractura. Con el número de ciclos en una amplitud de temperaturas definidas por los márgenes de calentamiento de sal caliente y el umbral térmico de sal fría obtenidos en la exposición de probetas de este material a 50 mm y 60 mm del punto focal en el HoSIER; se examinó su influencia combinada en las posteriores propiedades mecánicas de este tipo de acero.

4.1.2. Descripción de la metodología de análisis.

La curva de tensión-deformación ingenieril no da una indicación real de las características de deformación de un metal, ya que se basa totalmente en las dimensiones originales de la muestra, y estas dimensiones cambian continuamente durante la prueba; por este motivo se elige la curva de esfuerzo-deformación verdaderos descrita por G. E. Dieter en *Mathematical Expressions for the Flow Curve* del ASM Handbook Vol. 8 Mechanical Testing and Evaluation.

En realidad, el metal de la probeta se va endureciendo por deformación hasta el momento de la fractura, de modo que la tensión requerida para producir deformación adicional también debe aumentar. Si se utiliza la tensión verdadera, basada en el área de la sección transversal real de la muestra, la curva de tensión-deformación aumenta de forma continua hasta la fractura. Si la medición de la deformación también se basa en la medición instantánea, la curva que se obtiene se conoce como la curva verdadera esfuerzo deformación. Esta también se conoce como una curva de fluencia, ya que representa las características de fluencia plástica básica del material; misma que se emplea para demostrar la transformación de propiedades del material por efecto de la exposición a los ciclos foto-térmicos.

Cualquier punto sobre la curva de fluencia se puede considerar la tensión de fluencia para un metal deformado en tensión por la magnitud mostrada en la curva. Por lo tanto, si la carga se retira en este

punto y luego se vuelve a aplicar, el material se comportará elásticamente a lo largo de todo el rango de recarga.

La tensión verdadera (σ) se expresa en términos de esfuerzo ingenieril (s) por la ecuación (4.1)

$$\sigma = \frac{P}{A_0}(e + 1) = s(e + 1) \quad (4.1)$$

La ecuación (5.1) asume tanto la constancia de volumen y una distribución homogénea de tensión a lo largo de la longitud de calibre de la probeta bajo la carga monotónica. Por lo tanto, la ecuación (4.1) es útil en virtud de que el análisis de la transformación de propiedades mecánicas se realiza hasta después del esfuerzo de fluencia y hasta la resistencia máxima del material; esto implica que se debe utilizar sólo hasta el inicio de la formación del “necking” (cuello). Aunque no es relevante para efectos del análisis de transformación de propiedades más allá de la carga máxima, no se omite mencionar que la tensión verdadera debe ser determinada a partir de mediciones reales de la carga y el área real de la sección transversal. Para efecto de conocer cualquier punto de la curva de fluencia y determinar el comportamiento mecánico de las mismas, se emplea la ecuación (4.2):

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.2)$$

Donde σ es el esfuerzo verdadero en la probeta, y P y A son la magnitud de la carga y el área instantáneos respectivamente.

La deformación real, ε , puede determinarse a partir de la deformación ingenieril (e) por la ecuación (4.3), misma que debe ser usada para convertir deformación ingenieril a deformación verdadera, hasta antes del “necking” (deformación localizada o formación del cuello).

$$\varepsilon = \ln(e + 1) = \ln \frac{L}{L_0} \quad (4.3)$$

Donde ε es la deformación verdadera, e es la deformación ingenieril y $\frac{L}{L_0}$ es el cociente de la longitud instantánea y la longitud original de la probeta. La ecuación (4.3) es útil nuevamente en razón de que tiene aplicación para el trazo de la curva de fluencia a partir de la deformación plástica de la probeta y hasta la resistencia máxima del material.

Con frecuencia, la curva de fluencia es lineal a partir de la carga máxima a la fractura, mientras que en otros casos su pendiente disminuye continuamente a la fractura. La tensión verdadera en la carga máxima corresponde a la resistencia verdadera a la tracción. La resistencia máxima a la tracción se puede definir arreglando matemáticamente, como en la ecuación (4.4).

$$\sigma_u = s_u e^\varepsilon \quad (4.4)$$

Aunque no es el interés de este análisis, no se omite mencionar que el esfuerzo verdadero a la fractura es la carga a la fractura dividida entre la sección transversal de fractura.

La deformación verdadera en la carga máxima (uniforme) ε_u , es la deformación verdadera basada sólo en la deformación hasta la carga máxima. Puede calcularse a partir de ya sea la superficie de la sección transversal de la muestra (A_u) o la longitud (L_u) a carga máxima (ecuación (4.5)).

$$\varepsilon_u = \ln \frac{A_0}{A_u} \quad (4.5)$$

Expresiones matemáticas de la curva de fluencia.

La curva de fluencia de muchos metales en la región de deformación plástica uniforme se puede expresar por la relación curva de potencia simple en la ecuación (5.6)

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (4.6)$$

donde n es el exponente de endurecimiento por deformación, y K es el coeficiente de resistencia. Para la mayoría de los metales, n tiene valores entre 0.10 y 0.50.

Sin embargo la ecuación (5.6) no representa por completo el comportamiento de la curva, ya que si la deformación plástica es igual con cero, implica que esfuerzo aplicado es también nulo, y de esta manera se omite el esfuerzo por la tensión de fluencia. Por esta razón se reconoce que la ecuación de Ludwik considera esta situación al tener el término σ_0 , en la ecuación 5.7.

$$\sigma = \sigma_0 + K \varepsilon^n \quad (4.7)$$

donde σ_0 es la tensión de fluencia, y K y n son constantes de los mismos como en la ecuación (4.6) de potencia simple expuesta primero. Esta ecuación de Ludwik puede ser más satisfactoria que la ecuación anterior, debido a que ésta implica que a cero deformación verdadera la magnitud de tensión es cero.

Se ha demostrado que σ_0 se puede obtener de la intersección de la porción de endurecimiento por deformación de la curva de tensión-deformación y la línea de módulo elástico por la ecuación 4.8:

$$\sigma_0 = \left(\frac{K}{E^n} \right)^{\frac{1}{1-n}} \quad (4.8)$$

No obstante, a partir de los experimentos desarrollados este esfuerzo se puede determinar mediante el criterio de “límite elástico”, que es el esfuerzo requerido para deformar el material en una cantidad muy pequeña de deformación plástica, que para este caso la deformación considerada es de 0.2%.

La curva de tensión-deformación verdadera de metales como el acero inoxidable austenítico, que se desvían notablemente de la ecuación de potencia simple en deformaciones bajas (i.e. 10^{-3}), se puede expresar a través de la ecuación (4.9)

$$\sigma = K\varepsilon^n + e^{K_1} + e^{K_1}e^{n_1\varepsilon} \quad (4.9)$$

donde e^{K_1} es aproximadamente igual al límite proporcional (quizá entre curvas), y n_1 es la pendiente de desviación de la tensión de la ecuación de potencia simple frente a la deformación ε . Deformaciones altas se consideran $\varepsilon = 1$. Puesto que el objeto de este análisis es para deformaciones altas y hasta la fractura, no es trascendental adquirir la parte de análisis para deformaciones bajas.

4.1.3. La inestabilidad en la prueba de tensión monotónica.

La formación del cuello o “necking” generalmente comienza a carga máxima, durante la deformación a la tracción de un metal dúctil.

Sin embargo, a un metal sometido a la tracción monotónica, le ocurre un endurecimiento causado por la deformación, que implica que su capacidad de soportar carga sea aumentada mientras la deformación aumenta. Este efecto es opuesto a la disminución gradual en el área de la sección transversal que ocurre mientras son alargadas las probetas en este tipo de ensayo. Entonces el “encuellameinto” o “necking” ocurre en el momento en que se aplica la carga máxima, de manera que el aumento en el esfuerzo debido a la reducción del área transversal del tubo sometido a la prueba se vuelve mayor que el aumento en la capacidad del material para soportar carga debido al endurecimiento por deformación.

Esta condición de inestabilidad debida a la deformación localizada está definida por la condición

$$dP = \sigma dA + Ad\sigma = 0 \quad (4.10)$$

O bien

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{dA}{A} \quad (4.11)$$

En tanto que de la situación de volumen constante durante la deformación (alargamiento) en el ensayo de tracción monotónica:

$$\frac{dL}{L} = -\frac{dA}{A} = d\varepsilon \quad (4.12)$$

De manera que

$$\frac{d}{d\varepsilon}\sigma = \sigma \quad (4.13)$$

De esta manera el punto de “necking” a carga máxima puede ser obtenido de la curva de esfuerzo verdadero - deformación verdadera encontrando el punto en la curva con una tangente de pendiente uno (figura 4.1(a)), o bien, el punto en que la tasa de endurecimiento por deformación (verdadera) iguala al esfuerzo verdadero (figura 4.1(b)).

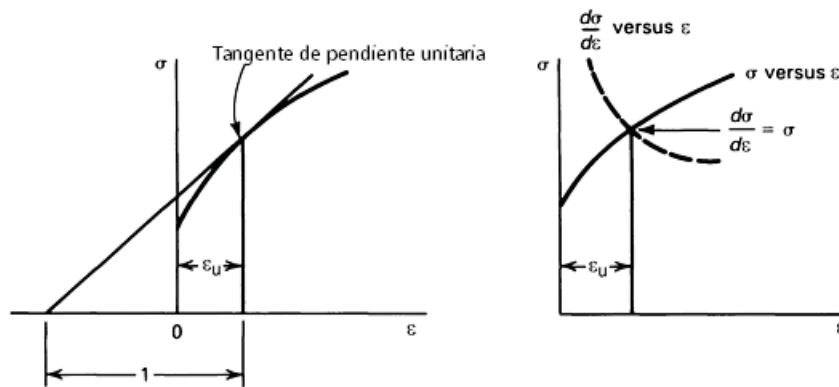


Figura 4.1(a)

Figura 4.1(b)

El criterio de “necking” puede ser expresado más explícitamente empleando la deformación ingenieril:

$$\frac{d\sigma}{de} = \frac{d\sigma}{de} \frac{de}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma}{de} \frac{dL}{L_0} \bigg/ \frac{dL}{L} = \frac{d\sigma}{de} \frac{L}{L_0} = \frac{d\sigma}{de} (1 + e) = \sigma \quad (4.14)$$

De manera que:

$$\frac{d\sigma}{de} = \frac{\sigma}{(1 + e)} \quad (4.15)$$

Esta misma expresión de la ecuación (4.15) permite una construcción geométrica muy interesante para la determinación del punto de máxima carga. En la figura figura 4.1(b), la curva de esfuerzo-deformación está trazada en términos de esfuerzo verdadero contra deformación ingenieril. Si se coloca un punto imaginario “A” en donde la deformación es -1, una línea que parte de este punto y que sea tangente a la curva esfuerzo verdadero contra deformación ingenieril, estará en el punto de máxima carga, pues con base en la ecuación (4.15), la pendiente en este punto es $\frac{\sigma}{(1+e_u)}$, Figura 4.2.

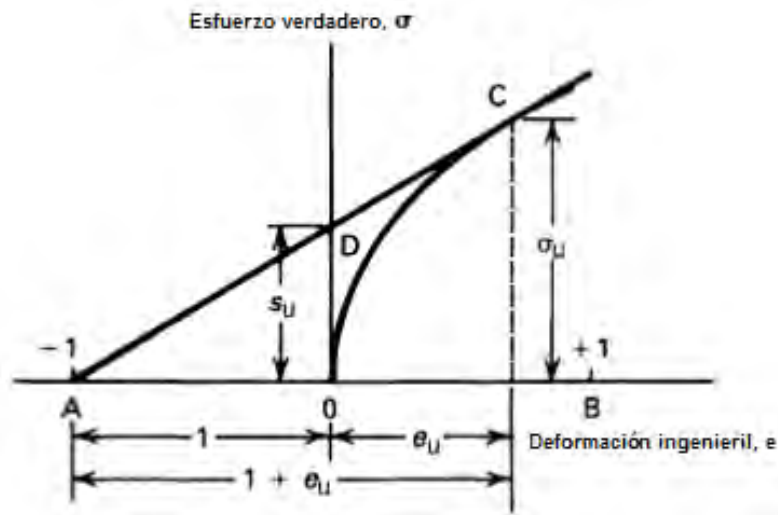


Figura 4.2. Consideraciones de elementos que constituyen un modelo para determinar el punto de carga máxima

A partir de sustituir el criterio de “necking” dado en la ecuación $\frac{d}{d\varepsilon}\sigma = \sigma$ (ecuación 4.13), en la ecuación (4.15)

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.16)$$

Se obtiene una relación simple para la deformación real en la ecuación (4.16), en la que la ocurrencia del “necking” tiene lugar

$$\varepsilon_u = n \quad (4.17)$$

Para la que se ha demostrado que la característica de potencia de la ecuación de Ludwik, no es afectada y es aplicable de esta relación.

4.2. Modelo numérico realizado en COMSOL MULTIPHYSICS®, para determinar campo térmico y de esfuerzos principales en probetas de acero inoxidable 316.

En el presente trabajo doctoral, se plantea un análisis de calor realizado mediante el software COMSOL MULTIPHYSICS®, donde el flujo radiativo obtenido mediante el trazado de rayos en SolTrace de NREL es introducido de forma discretizada. Para desarrollar el diseño experimental de la exposición de probetas cilíndricas tubulares al ciclado foto-térmico en el interior del HoSIER, se realizó un modelo previo de elemento finito con la finalidad de reconocer el campo térmico, la magnitud de los esfuerzos principales, así como el tiempo en que estos ocurren. Tal como lo exponen Xu et al. (2008) y Klobcar et al. (2008) las condiciones térmicas y mecánicas deben modelarse para predecir parámetros de experimentación y condiciones limitantes que pueden presentarse durante la misma.

Como se ha descrito anteriormente en lo descrito por Boerema et al. (2012), las temperaturas que se tienen típicamente en los receptores de tipo torre central que operan con sal fundida (ya sea sal binaria o sal HiTECH) tiene como componentes variaciones en el porcentaje en masa de nitrato de sodio y nitrato de potasio (NaNO_3 y KNO_3). Estas sales requieren por lo general una temperatura mínima de operación de 285 °C, de manera que no exista una congelación de la sal en el interior de los tubos. Por otra parte la temperatura máxima de operación de estos sistemas es de 565 °C, pues aunque es deseable operar con una temperatura mayor, este tipo de sales comienzan a descomponerse y resultan

corrosivas para los materiales metálicos que constituyen los elementos de los receptores y/o del resto de ductos de la planta, aunque ciertamente, el mayor problema se presenta en los receptores pues son las secciones constituyentes de las plantas que se encuentran a una mayor temperatura y por consiguiente donde existe la mayor afectación no solamente por corrosión sino por la absorción del flujo radiativo que proviene del campo de helióstatos y por los esfuerzos térmicos provocados por la distribución de los flujos radiativos concentrados, las imperfecciones ópticas de los sistemas de concentración, así como de los ciclos térmicos provocados por fallas de control o la aparición de nubosidades.

Se ha expuesto que es deseable que las plantas operen en rangos de temperatura con mayor amplitud, pues esta situación implica de acuerdo con la ecuación de Carnot una mayor eficiencia y la obtención de una conversión energética mayor para un cierto tamaño de planta termo-solar. Un ciclo con mayor amplitud de temperatura puede lograrse empleando sodio fundido como fluido caloportador, no obstante la situación de los esfuerzos térmicos está presente y resultaría aún más acentuada, ya que los umbrales térmicos al tiempo están más alejados entre sí.

Los modelos numéricos de elementos finitos son ampliamente utilizados en los diseños experimentales para definir las características de experimentación y los protocolos de operación de los diferentes sistemas, en este caso es particularmente importante definir los parámetros experimentales para la exposición de las probetas de acero inoxidable 316 en el interior del HoSIER al ciclado térmico. Al tiempo, estos modelos numéricos son también utilizados para reconocer propiedades de los materiales que aún no se han determinadas; esto es de suma utilidad cuando las condiciones y propiedades se conocen y alguna de las propiedades desconocidas ocasiona variabilidad en el fenómeno, si se realiza comparación de aspectos en particular.

Ciertamente, no todas las condiciones se pueden modelar, pues los experimentos y las características del flujo radiativo para cierto día y momento durante el año son siempre impredecibles y se trata de factores que impactan en la forma del flujo radiativo concentrado y en el desarrollo de los ciclos térmicos durante el experimento.

El modelo de calor desarrollado es necesario para determinar que los elementos expuestos alcanzan determinada temperatura máxima de operación de planta en alguna región de la geometría de la pieza (se trata de probetas cilíndricas tubulares del tipo de las que se emplean en las plantas termo-solares de tipo torre central), al tiempo es necesario determinar la magnitud de los esfuerzos principales a la temperatura dada, para reconocer que no es factible que una probeta se encuentre sometida a

esfuerzos que superen la resistencia máxima a esa temperatura. Finalmente, existe el objeto de determinar si las deformaciones no originan una flexión de la probeta que pueda desplazar partes de su geometría en el eje focal en el HoSIER y recibir de esta manera un flujo radiativo concentrado de mayor magnitud y que pudiese generar en este mismo sentido la fusión del material o una fractura por los mismos motivos.

Se desarrolló un programa en el lenguaje de LabView® de National Instruments® para controlar la apertura y cierre de la persiana que permite realizar los ciclos térmicos en las probetas cilíndricas tubulares; situación que se modeló también para el primer ciclo térmico, sin embargo, no pudo considerarse en este modelo la transformación de propiedades termo-radiativas en el material por efecto de la presencia de óxidos diferentes al de cromo en el mismo. De esta forma, el modelo es comparado con los resultados experimentales para temperaturas donde el material no ha desarrollado óxidos.

El modelo numérico desarrollado se realizó empleando el software COMSOL MULTIPHYSICS® donde una geometría cilíndrica tubular fue introducida y el modelo de calor contempla condiciones de frontera radiativas, convectivas forzadas y naturales, y el flujo radiativo incidente en la geometría cilíndrica de la probeta que se obtiene a partir de SolTrace. Se emplea también la librería de materiales de COMSOL MULTIPHYSICS® para introducir las propiedades termofísicas que son dependientes de la temperatura en el material. Otras propiedades como la absorptividad y la emisividad del material que no están incluidas en la librería del material dentro del software fueron investigadas y obtenidas a partir de Sibir et al. (2015).

Geometría de la probeta cilíndrica tubular de acero inoxidable 316.

La geometría considerada para las probetas de acero inoxidable es cilíndrica tubular con un diámetro interior y exterior respectivo de 9.5 mm y 12.7 mm. Asimismo, las piezas tienen una longitud de 0.55 m. Estudios como el de Ho e Iverson (2014) que han enfatizado que el diámetro del tubo del receptor debe ser controlado, ya que afecta la eficiencia de transferencia de calor y las pérdidas de presión. La geometría determinada de los tubos cilíndricos debe estar próxima a un diámetro externo e interno de 12.7 mm y 9.5 mm, respectivamente. Se ha demostrado que esta geometría proporciona un equilibrio entre ambos aspectos de la eficiencia de transferencia de calor y pérdidas de presión. Véase la figura 4.3.



Figura 4.3. Geometría de las probetas cilíndricas tubulares para el modelo en COMSOL MULTIPHYSICS® .

Esta geometría fue considerada de esta forma para hacer posible que la probeta sea colocada a diferentes distancias del punto focal, ya que el HoSIER tiene un ángulo de su “cono de concentración solar” de aproximadamente 54°. Esto implica que aunque las distancias con respecto del punto focal a las que sean colocados los receptores sean relativamente cortas, la magnificación del área de irradiación de flujo concentrado será significativamente aumentada con los incrementos de la distancia del punto focal. Para efecto de diseño y tener en cuenta cualquier posibilidad, la longitud de las probetas fue considerada de esta manera.

4.2.1 Trazado de rayos para modelo de calor de probetas de acero inoxidable 316 expuestas al flujo radiativo concentrado.

El modelo considera que para esta geometría, en la región media longitudinal sean irradiadas las probetas con el flujo radiativo concentrado. Se han contemplado dos casos principalmente para esta exposición. El primer caso es el ciclado térmico a 50 mm de distancia sobre el eje focal, detrás del punto focal, como lo muestra la figura 4.4, el segundo caso es con la probeta a 60 mm sobre el eje focal y con las mismas consideraciones.

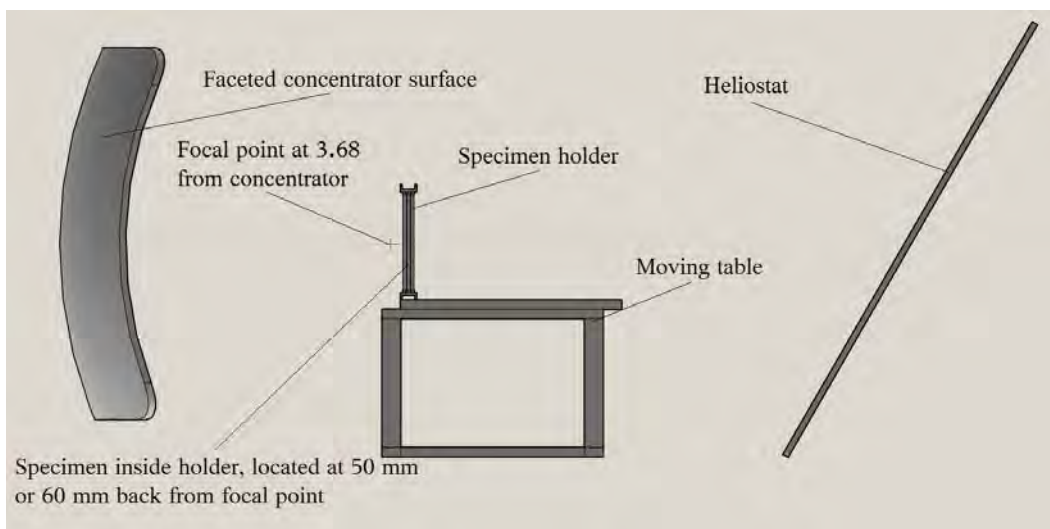
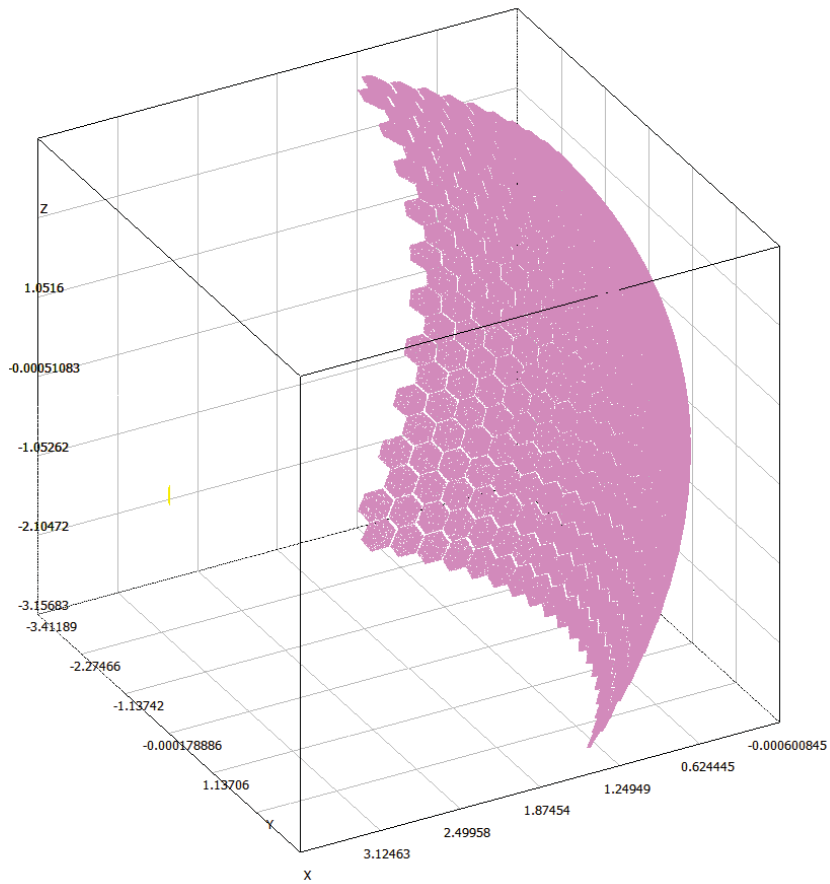


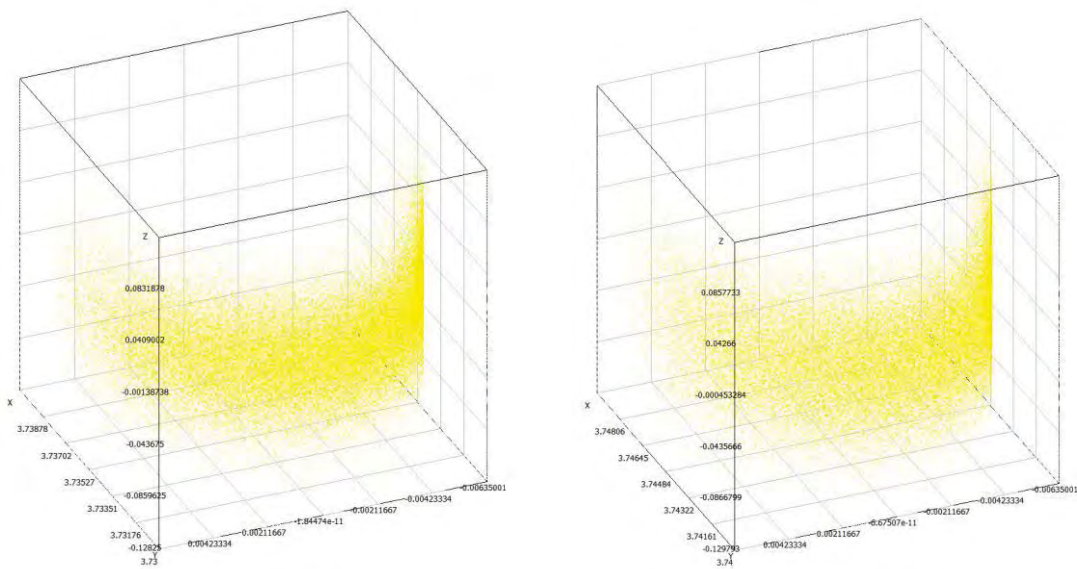
Figura 4.4. Esquema de colocación de realización del experimento de fatiga foto-termo-mecánica en el HoSIER.

Considerar la realización del modelo con la irradiación solar concentrada requiere un trazado de rayos a fin de ingresar en el modelo la distribución del flujo radiativo concentrado a las dos diferentes distancias, contemplando la geometría cilíndrica de la superficie externa de las probetas. De esta forma, se realizan dos trazados de rayos con SolTrace de NREL, consiguiendo el trazado que se encuentra en la figura 4.5.

En la figura 4.5(a) se encuentran las intersecciones del trazado de rayos para un modelo realizado con 10^6 rayos. La radiación solar reflejada por el helióstato incide sobre la superficie de facetas con curvatura esférica y forma hexagonal en el que se aprecia en esta figura, de manera que la radiación solar es concentrada en un punto focal a 3.68 m de distancia a partir de la superficie facetada concentradora. Parte de este flujo, incide sobre la superficie cilíndrica que representa el receptor, que para este caso es una probeta cilíndrica al frente de esta superficie concentradora. Posteriormente, en las figuras 4.5(b) y 4.5(c) se encuentran las intersecciones de rayos sobre esta superficie cilíndrica que corresponde a una distancia atrás del punto focal de 50 mm y 60 mm respectivamente; aunque en este par de figuras no es notable una diferencia en la magnitud de la potencia radiativa concentrada, si lo es en las figuras 4.5(d) y 4.5(e), donde la diferencia de magnitud es notable. Estas figuras 4.5(d) y 4.5(e), son una representación plana del flujo radiativo que incide sobre las superficies cilíndricas; como es de esperarse, a una menor distancia del punto focal (50 mm), existe una menor magnificación del flujo radiativo concentrado, sin embargo, la magnitud de potencia concentrada es mayor, en tanto que para una mayor distancia (60 mm) la magnificación del flujo es mayor, pero la magnitud de la potencia concentrada es menor, siendo notable esta diferencia en el “pico” de ambas superficies graficadas.

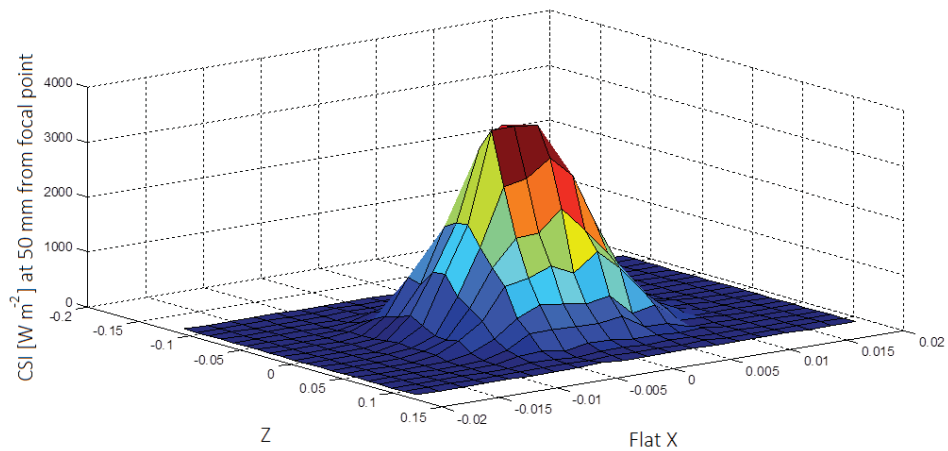


(a) Intersecciones del trazo de rayos en el HoSIER, para un modelo con 1 000 000 rayos, para un receptor de superficie cilíndrica de 12.7 mm φ , dentro de la simulación ejecutada en el software SolTrace® de NREL® y documentada en Pérez-Enciso et al. (2014) (Obsérvese apéndice A)

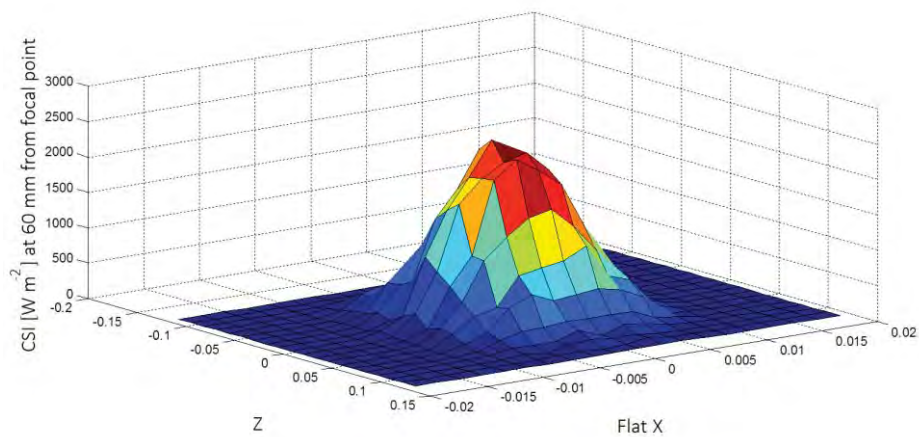


(b) Intersecciones de los rayos sobre el receptor cilíndrico con diámetro externo de 12.7 mm, localizado a 50 mm del punto focal del HoSIER, simulación ejecutada en el software SolTrace® de NREL® (Obsérvese apéndice A)

(c) Intersecciones de los rayos sobre el receptor cilíndrico con diámetro externo de 12.7 mm, localizado a 60 mm del punto focal del HoSIER, simulación ejecutada en el software SolTrace® de NREL® (Obsérvese apéndice A)



(d) Flujo radiativo concentrado a 50 mm atrás del punto focal, considerando una interpretación plana sobre el receptor tubular de 12.7 mm de diámetro



(e) Flujo radiativo concentrado a 60 mm atrás del punto focal, considerando una interpretación plana sobre el receptor tubular de 12.7 mm de diámetro

Figura 4.5. Intercepciones del trazo de rayos o potencia obtenida en el mismo modelo, para ambas distancias del punto focal en el HoSIER

El flujo radiativo concentrado para cada caso, se obtiene en forma de una matriz de 20 x 20 datos de magnitud que representan la potencia radiativa discreta. Esta discretización del flujo radiativo concentrado se separa en 20 vectores que forman una envolvente para la superficie cilíndrica de las probetas.

La tabla B.1. del apéndice B contiene los 20 vectores de flujo radiativo concentrado discreto para la distancia de 50 mm; en tanto que la tabla B.2. del mismo apéndice contiene la información homóloga para una distancia de 60 mm. Ambas tablas consideran una irradiación de un sol ($1\ 000\ \text{W m}^{-2}$), sin embargo, en el modelo numérico realizado en COMSOL MULTIPHYSICS® este flujo radiativo podría implicar una destrucción de la probeta mediante fusión del material o una fractura por esfuerzo térmico en una condición de Cielo despejado; esta condición no siempre ocurre y se debe limitar además la magnitud del flujo radiativo mediante factores menores que la unidad para una condición de menor irradiación y porcentaje de apertura de la persiana a fin de conseguir que la probeta sea calentada sin un choque térmico inminente y se obtenga la posibilidad de realizar el ciclado térmico para obtener el fenómeno de fatiga foto-termo-mecánica.

Estos veinte vectores del flujo radiativo discreto se introducen en COMSOL MULTIPHYSICS®, considerando la distribución en la figura 4.6. El flujo de calor se introduce como una función generada a partir de los 20 datos de cada uno de los 20 vectores, donde se considera una función continua para estos 20 datos. De esta manera, 20 funciones de flujo de calor se toman en cuenta como condición de frontera de irradiación como flujo de calor incidente y está limitada esta condición por la absorptividad promedio del acero inoxidable en el espectro solar de 0.3835, señalada por Sibin et al. (2015).

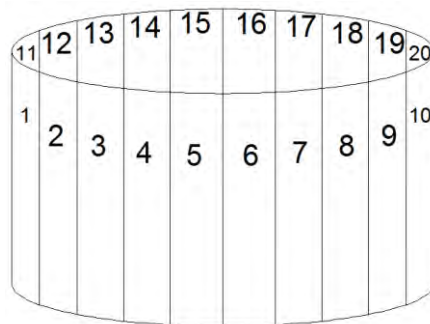
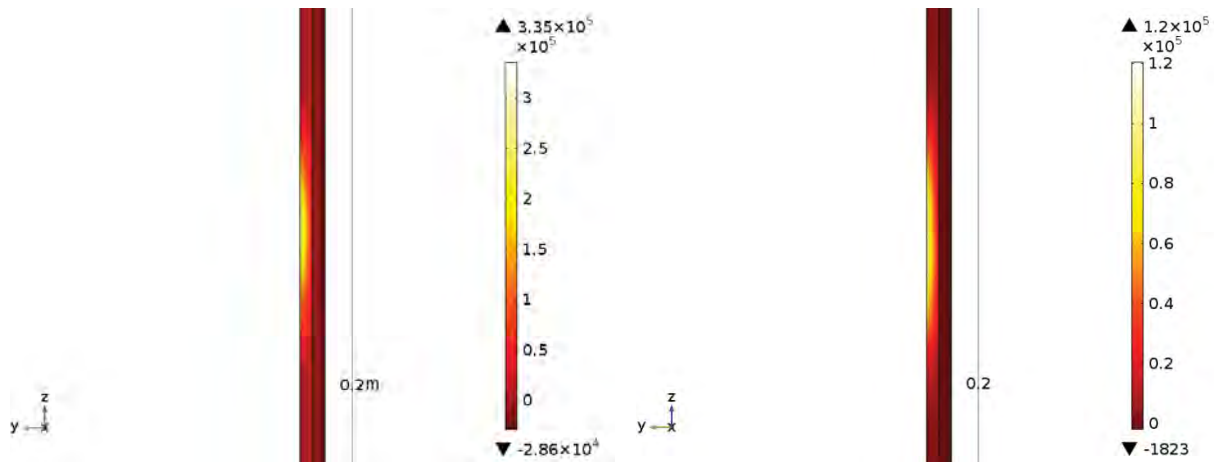


Figura 4.6. Distribución de los 20 vectores de flujo radiativo sobre la superficie cilíndrica externa

De esta manera es posible graficar el campo de flujo radiativo en las probetas cilíndricas, para cada caso de acercamiento. En la figura 4.7 se aprecian las probetas irradiadas con los flujos en el interior del HoSIER; en notable que el flujo radiativo a 60 mm del punto focal tiene una magnificación mayor del flujo radiativo, como se anticipó dadas las características sistemáticas de los sistemas ópticos de concentración:



(a) Flujo radiativo sobre probeta cilíndrica a 50 mm detrás del punto focal en el HoSIER

(b) Flujo radiativo sobre probeta cilíndrica a 60 mm detrás del punto focal en el HoSIER

Figura 4.7. Modelo de irradiación sobre las probetas para ambas distancias de exposición en el interior del HoSIER

4.2.2 Modelo, ecuaciones y condiciones de frontera para el análisis de termomecánico

Con base en las condiciones físicas simuladas anteriores descritas, se plantea el siguiente modelo mostrado en la figura 4.8 que al resolverse, obtiene como resultados los campos de temperatura y de esfuerzos; así como el desplazamiento debido a la deformación de la probeta.

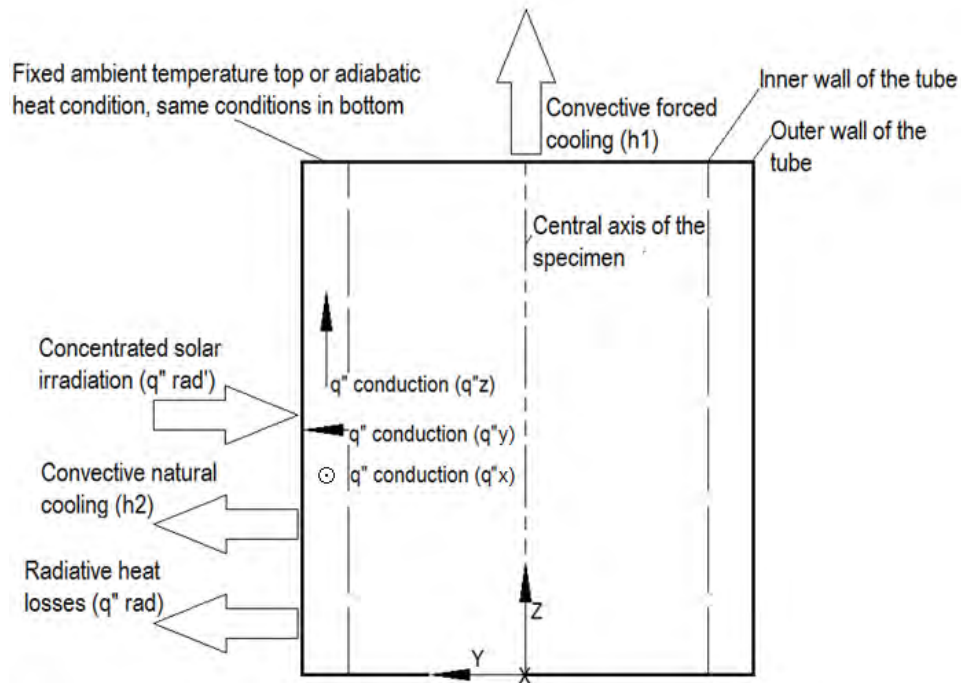


Figura 4.8. Condiciones de calor para la simulación en COMSOL MULTIPHYSICS®

La ecuación de calor 6.1 es necesaria para determinar el campo térmico con dependencia temporal:

$$\nabla \cdot (k\nabla T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.18)$$

Por su parte y debido a la expansión térmica, se modelan los esfuerzos producidos mediante la resolución de la ecuación 4.19. Para esfuerzos tridimensionales, el criterio empleado y que incluye el efecto de todos los esfuerzos que actúan en un punto del material es conocido como el esfuerzo principal de Von Mises:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2}{2}} \quad (4.19)$$

Las condiciones de frontera que se consideran en la geometría cilíndrica tubular de las probetas de acero inoxidable son de temperatura fija ambiente en los extremos de la probeta, descrita por la ecuación (4.20). Al tiempo, la temperatura inicial de la totalidad de las probetas es la temperatura ambiente también, descrita en la ecuación (4.21).

$$T_{inferior} = T_{superior} = T_{ambiental} = 302 \text{ K} \quad (4.20)$$

$$T_{i,0} = 302 \text{ K} \quad (4.21)$$

La condición convectiva en las paredes externas de las probetas está definida por la ecuación (4.22), donde el coeficiente de convección h es una función de la longitud del tubo para una condición de convección natural.

$$-k\nabla T = h(T_{ext} - T) \quad (4.22)$$

Para la pared interna la condición convectiva de calor es descrita también por la ecuación (4.22), sin embargo, para esta situación, h es una función del diámetro interno del tubo, y la velocidad de “bulto” del aire que resulta ser de 31.35 m s^{-1} (medida por un flujómetro el cual corresponde a $8 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$). La presión considerada para el sistema es en ambas partes de 1 atm para evitar las consideraciones de compresión del aire en el cálculo.

Pérdidas por radiación al ambiente denotadas por la ecuación (4.23)

$$-k\nabla T = \varepsilon_r \sigma_r (T_{ambiental}^4 - T^4) \quad (4.23)$$

Para la que se considera una emisividad promedio de $\varepsilon = 0.125$, como lo reporta Sibin et al. (2015). El parámetro σ es la constante de Stefan-Boltzmann.

El flujo de calor discreto que se describe en el apartado anterior es la condición de frontera térmica final en la ecuación (4.24). q_o corresponde a los veinte diferentes flujos de calor dados en kW m^{-2} , y α es la absorptividad del acero inoxidable en el espectro solar, misma que tiene un valor promedio de 0.3835 también reportado por Sibin et al. (2015).

$$-k\nabla T = \alpha q_o \quad (4.24)$$

Las condiciones adiabáticas para la parte superior e inferior de la muestra también se consideraron en la misma simulación para demostrar que no había influencia. Este es el segundo caso de análisis de simulación. La condición de frontera se determina en la ecuación (4.25).

$$-k\nabla T = 0 \quad (4.25)$$

Los esfuerzos para cada elemento finito en que la geometría discreta se analiza en el software son ocasionados por la expansión térmica volumétrica del acero inoxidable austenítico AISI 316 SS. En cuanto a las condiciones de frontera mecánicas, existe restricción de movimiento en las caras superior e inferior de la probeta (extremos de la geometría cilíndrica tubular) denotadas por la ecuación (4.26).

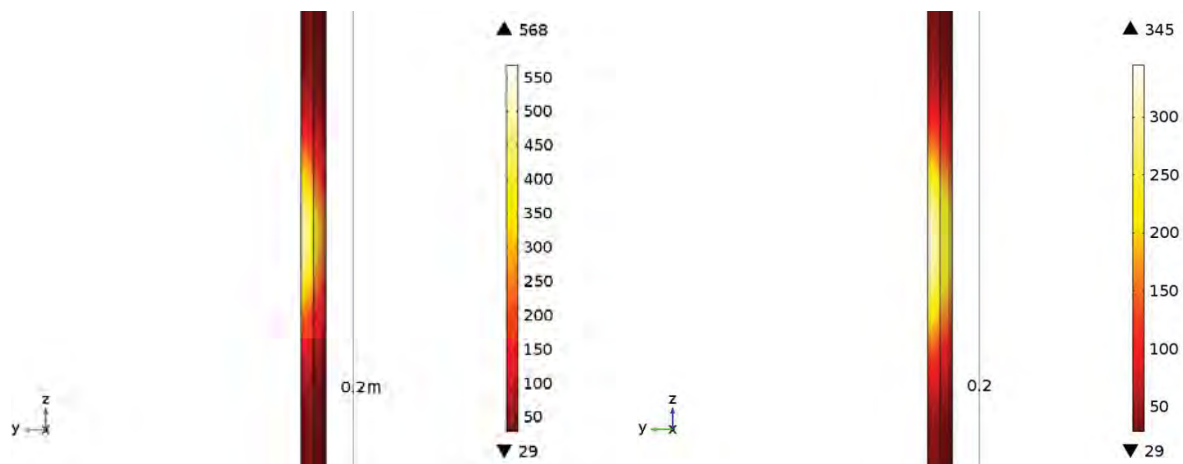
$$u_x = u_y = u_z = 0 \text{ s}^{-1} \quad (4.26)$$

Ciertamente el esfuerzo que el material soporta en un punto es dependiente de la temperatura a la que se encuentra y es entonces necesario aplicar un criterio restrictivo y que puede denotar que puede presentarse un inicio de fractura. Este criterio de termo-dependencia se explica en el siguiente apartado.

4.3 Resultados del análisis térmico de las probetas cilíndricas tubulares de acero inoxidable 316 de condiciones supuestas para el HoSIER.

Por efecto de las condiciones de calor y de frontera que antes se han descrito se obtiene un campo térmico en las probetas cilíndricas tubulares que, debido a su distribución, genera posteriormente esfuerzos térmicos. Los gradientes térmicos provocan posteriormente esfuerzos térmicos debidos a la expansión del material. En la figura 4.9(a) y 4.9(b) se encuentran los campos térmicos que se obtienen por efecto de la exposición a los flujos radiativos a las diferentes distancias. Es importante destacar que los resultados se obtienen mediante un análisis temporal por segundo, de manera que los resultados obtenidos son para tiempos determinados de las probetas expuestas, donde el flujo radiativo es limitado a diferentes porcentajes de atenuación en la simulación numérica, considerando la condición del “factor de horno” definido por Pérez-Enciso (2015) en la ecuación (4.27) (en la que cada factor representa de forma respectiva la transmisividad del vidrio del heliostato (η_{t1}), reflectividad de los espejos del heliostato (η_{r1}), reflectividad de los espejos del concentrador (η_{r2}), sombreado estructural del horno (η_{e1}), sombreado de mesa experimental (η_s), sombreado por persianas del atenuador (η_p), suciedad del heliostato (η_{d1}), suciedad del concentrador (η_{d2})), una irradiación por día reducida y determinado porcentaje de apertura del atenuador del HoSIER.

$$F = \eta_{t1}^2 \eta_{r1} \eta_{d1} \eta_{e1} \eta_s \eta_p \eta_{r2} \eta_{d2} \quad (4.27)$$



(a) Campo térmico de la probeta de acero inoxidable a 29 segundos de exposición en el punto focal, para un “factor de horno” de 27%. Probeta a 50 mm detrás del punto focal.

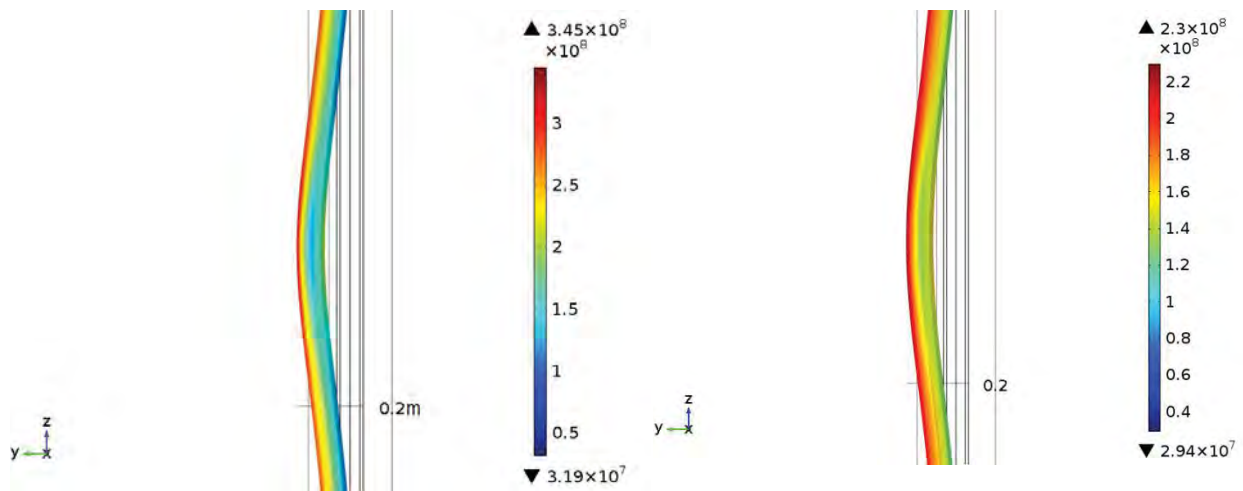
(b) Campo térmico de la probeta de acero inoxidable a 100 segundos de exposición en el punto focal, para un “factor de horno” de 16%. Probeta a 60 mm detrás del punto focal.

Figura 4.9. Campos térmicos obtenidos en el modelo de ISC en el HoSIER

Con base en lo que se ha descrito, los gradientes térmicos en las diferentes zonas del material generan diversas expansiones térmicas, mismas que provocan que el material experimente esfuerzos. Estos esfuerzos del material pueden estar cerca del límite de resistencia a la tensión del material a determinada temperatura, en indeseables circunstancias este esfuerzo puede superar el límite elástico y provocar deformaciones permanentes en el material. La mayoría de los materiales metálicos a elevadas temperaturas presentan reducción en las magnitudes de los esfuerzos de límite elástico y de resistencia máxima, por esta razón un aspecto restrictivo en el diseño experimental es que las probetas de este material no sobrepasen un esfuerzo principal de aproximadamente 600 MPa a una temperatura de 600 °C aproximadamente, según es posible reconocer con base en la interpolación de la figura 15 (temperature versus tensile, yield, and rupture strengths of the iron-, nickel-, chromium-, molybdenum- and nickel-based alloys) en el capítulo “Hot Tension and Compression Testing” del Metals Handbook Vol. 8, Mechanical Testing and Evaluation.

El análisis temporal del modelo en COMSOL MULTIPHYSICS® permite reconocer el momento en el tiempo en que las probetas de acero inoxidable AISI 316 experimentan determinada magnitud de esfuerzos principales; esto brinda la posibilidad de reconocer que las probetas en determinado momento del tiempo pueden ser expuestas sin que se presente una fractura súbita y asimismo ajustar

los parámetros operativos del atenuador del HoSIER para generar el calentamiento sin que represente un riesgo de destrucción para el material. Ciertamente, dadas las características del análisis temporal, es posible conocer el instante en el tiempo en que este esfuerzo se presenta a determinada temperatura, permitiendo reconocer que los instrumentos controlados en el HoSIER hacen posible el experimento. Los campos de esfuerzos térmicos en las probetas se presentan en las figuras 4.10(a) y 4.10(b) para cada caso de exposición a 50 mm y 60 mm detrás del punto focal del HoSIER; en estas figuras la deflexión de las probetas es visualmente acentuada, para efecto de obviedad del efecto termo-mecánico.



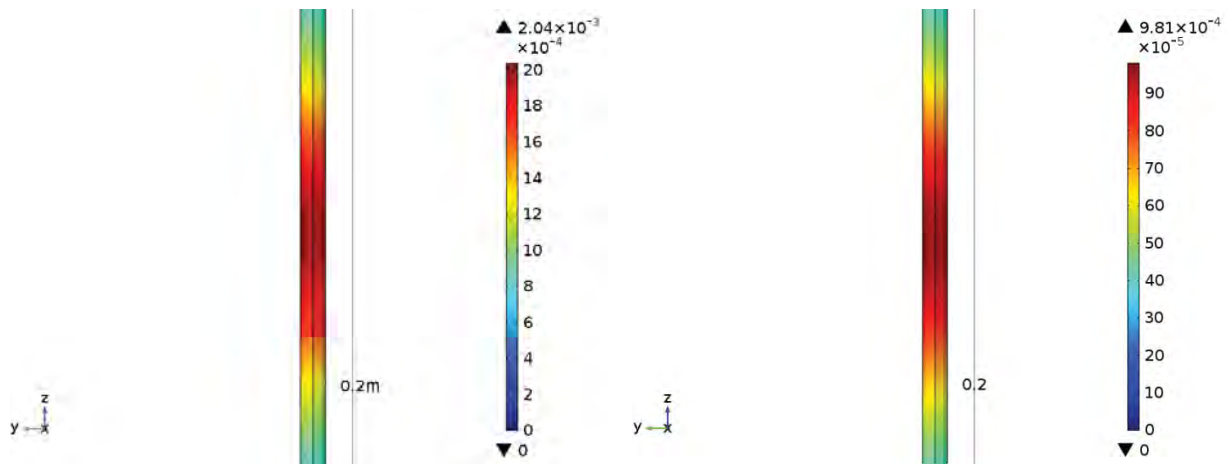
(a) Gráfica de los esfuerzos principales en Pa de la probeta de acero inoxidable 316 a 50 mm detrás del punto focal del HoSIER, obtenida a 29 s de calentamiento para un “factor de horno” de 27%

(b) Gráfica de los esfuerzos principales en Pa de la probeta de acero inoxidable 316 a 60 mm detrás del punto focal del HoSIER, obtenida a 100 s de calentamiento para un “factor de horno” de 16%

Figura 4.10. Campos de esfuerzos principales (Von Mises) obtenidos en el modelo de ISC en el HoSIER

Un aspecto importante revelado por la simulación del software de modelado COMSOL MULTIPHYSICS® es que las probetas tienen un desplazamiento insignificante en el eje focal (que no es representativo de la figura 4.10), por lo que no hay riesgo de que se funda el material como si tuviera un mayor desplazamiento debido a la flexión. Los gráficos de desplazamiento se muestran en las figuras 4.11(a) y 4.11(b). El desplazamiento más alto en la dirección Y positiva es de aproximadamente 2 mm. En este sentido, los desplazamientos pueden ser considerados no importantes y la experimentación es posible. Las tablas 4.1 y 4.2 son ejemplos de los resultados numéricos obtenidos mediante las simulaciones,

mismos que son los campos de esfuerzo termo-mecánico (solid.mises), temperatura (T) y desplazamientos ocasionados por las expansiones térmicas (v).



(a) Gráfico del desplazamiento en la dirección de del eje focal en metros, par alas probetas de AISI 316 SS, obtenidas a 50 mm del punto focal en 29 s

(b) Gráfico del desplazamiento en la dirección de del eje focal en metros, par alas probetas de AISI 316 SS, obtenidas a 60 mm del punto focal en 100 s

Figura 4.11. Campos de desplazamiento obtenidos en el modelo de ISC en el HoSIER

Tabla 4.1. Modelo de la probeta a 50 mm atrás del punto focal, y un tiempo de exposición de 29 s al flujo radiativo concentrado.

Coordinates						
X	Y	Z	solid.mises (N/m ²) @ t=29 s	T(K)@ t=29 s	v(m)@ t=29 s	
0	0.00635	0	2.26E+08	302	-1.86E-23	
0	0.00635	0.18	2.79E+08	305.623501	0.00103739	
0	0.00635	0.23	2.93E+08	445.367665	0.00170564	
0	0.00635	0.28	3.15E+08	841.079557	0.00218701	
0	0.00635	0.33	2.91E+08	476.522139	0.00174779	
0	0.00635	0.38	2.81E+08	305.641865	0.00106538	
0	0.00635	0.55	2.12E+08	302	-1.10E-19	
0	-0.0064	0	1.14E+08	302	1.40E-23	
0	-0.0064	0.18	1.11E+08	303.535489	0.00103131	

0	-0.0064	0.23	1.41E+08	358.103945	0.00167988
0	-0.0064	0.28	2.16E+08	521.744143	0.00209762
0	-0.0064	0.33	1.46E+08	370.071924	0.0017174
0	-0.0064	0.38	1.10E+08	303.4854	0.00105932
0	-0.0064	0.55	1.07E+08	302	7.51E-20
0	0.00475	0.28	3.42E+08	816.523712	0.0021701

Tabla 4.2. Modelo de la probeta a 60 mm atrás del punto focal, y un tiempo de exposición de 100 s al flujo radiativo concentrado.

Coordinates						
X	Y	Z	solid.mises (N/m ²) @ t=100 s	T(K)@ t=100 s	v(m)@ t=100 s	
0	0.00635	0	1.78E+08	302	-1.48E-23	
0	0.00635	0.175	2.14E+08	312.2819299	5.49E-04	
0	0.00635	0.225	2.24E+08	463.0378914	8.92E-04	
0	0.00635	0.275	2.32E+08	632.9154625	0.001078352	
0	0.00635	0.325	2.20E+08	430.8854644	8.59E-04	
0	0.00635	0.375	2.13E+08	310.470087	5.25E-04	
0	0.00635	0.55	1.63E+08	302	-9.30E-20	
0	-0.00635	0	1.18E+08	302	2.37E-23	
0	-0.00635	0.175	1.27E+08	309.0143466	5.42E-04	
0	-0.00635	0.225	1.49E+08	394.1937499	8.60E-04	
0	-0.00635	0.275	1.71E+08	495.1164794	0.001016867	
0	-0.00635	0.325	1.45E+08	377.0273296	8.32E-04	
0	-0.00635	0.375	1.28E+08	307.1709826	5.18E-04	
0	-0.00635	0.55	1.16E+08	302	7.68E-20	
0	0.00475	0.275	2.39E+08	621.5173054	0.001068263	

Las condiciones de temperatura más exigentes pueden aplicarse a los especímenes porque las altas temperaturas alcanzadas permiten una alta eficiencia en todo el sistema térmico. En cuanto al uso de sales solares o sal Hitec como fluido de transferencia de calor, la temperatura no debe ser superior a 565 °C. Entonces, el caso operacional más exigente es permitir que la temperatura sea cercana a 565 °C y aún un poco más alta en virtud de que el tubo debe obtener una temperatura mayor para transferir energía calorífica al fluido caloportador. Temperaturas muy superiores a la señalada son una limitación debido a la descomposición química de las sales.

Las condiciones adiabáticas para la parte superior e inferior de la muestra que también se consideraron en la simulaciones, obtuvieron resultados térmicos, de esfuerzo y desplazamiento con una diferencia despreciable con respecto de la condición de frontera isotérmica en las mismas caras y para ambos casos de simulación de 50 y 60 mm de colocación de las probetas detrás del punto focal. De esta manera y con base en este caso secundario de análisis mediante simulación, se determina que los resultados pueden ser usados indistintamente para el diseño experimental y de igual forma probar la consistencia del estudio. Las caras de la parte superior e inferior de la probeta no presentan una condición de calor significativa, o bien, es posible señalar que su temperatura se mantiene constante a la temperatura inicial; durante la situación de calentamiento mediante los ciclos de ISC y en el caso de sobrecalentamiento de las probetas.

En este trabajo se realizó una propuesta experimental para establecer condiciones procesales de alta demanda para estudiar posteriormente los daños y las transformaciones metalúrgicas del acero inoxidable AISI 316, que es un acero austenítico, como material para receptores solares. Los especímenes se calientan localmente para permitir el desarrollo de altas tensiones térmicas cuando un "hot spot" es obtenido por ISC en el HoSIER. El esfuerzo que cada espécimen debe soportar es el Esfuerzo de Von Mises, con una magnitud de la resistencia a la tracción final térmicamente dependiente obtenida de los datos extrapolados mostrados en la Fig. 16 (temperatura versus resistencia a la tracción, rendimiento y resistencia a la ruptura de las aleaciones a base de hierro, carbono, níquel, cromo, molibdeno y níquel) en el capítulo Prueba de tensión y compresión en caliente, Metals Handbook Vol. 8, Pruebas mecánicas y evaluación. Con base en ese criterio, cada punto evaluado mostrado en la figura 4.12 está bajo el límite de esfuerzo térmico excepto el central tomando como referencia la figura 4.13, donde podría iniciarse una grieta, no obstante, el experimento puede desarrollarse considerando un riesgo menor y una condición de límite operativo con base en estas condiciones para este material metálico.

En este sentido, el software de modelado COMSOL MULTIPHYSICS® muestra que cuando hay una temperatura de 565 °C en el termopar central ubicado en la sección trasera del tubo, se alcanza una temperatura más alta de 837 °C en el centro del frente central junto con una tensión térmica principal de 437 MPa. Debido a las condiciones de transferencia de calor en los sistemas ISC, siempre hay una temperatura más alta en las paredes externas de los tubos en los receptores, y las mayores tensiones térmicas están cerca de las secciones donde el ISC es absorbido. Entonces, para estas condiciones extremas, el espécimen puede superar las condiciones exigentes y el experimento puede ser llevado a cabo.

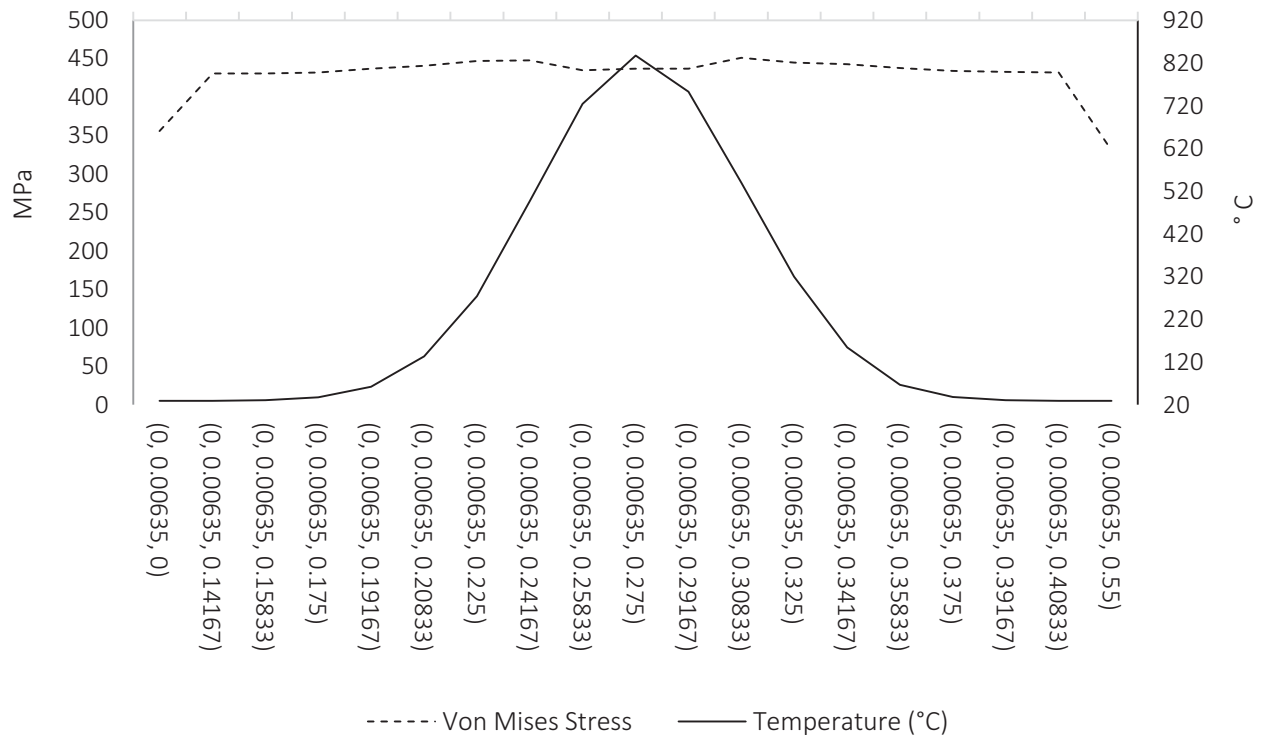


Figura 4.12. Ocurrencia especial de los esfuerzos de Von Mises y temperatura, simulado a 93 s

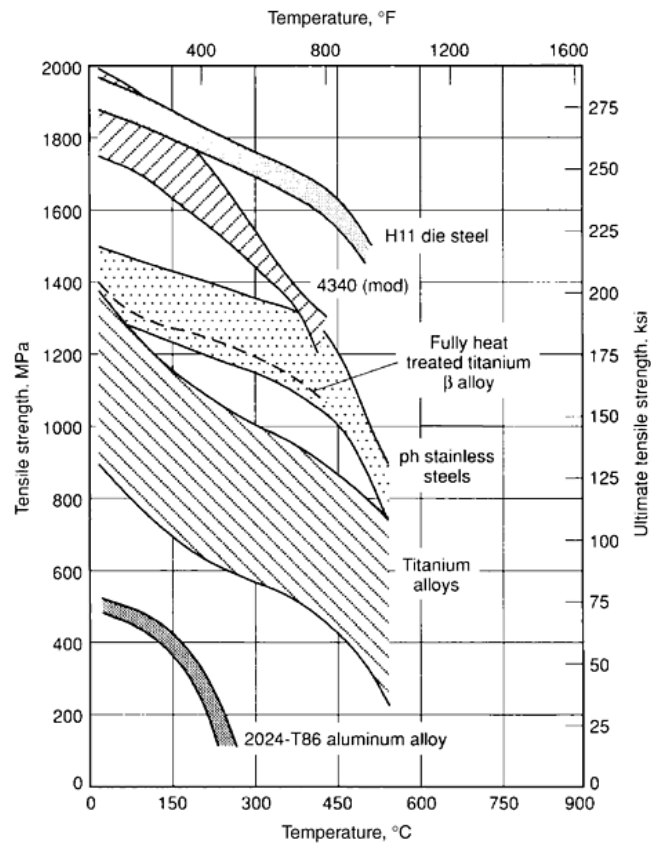


Fig 4.13. Correspondiente a la figura 16, sobre temperatura versus resistencia a la tracción, rendimiento y resistencia a la ruptura de las aleaciones a base de hierro, carbono, níquel, cromo, molibdeno y níquel, en el capítulo Prueba de tensión y compresión en caliente, *Metals Handbook Vol. 8, Pruebas mecánicas y evaluación*

4.4 Realización experimental de la exposición de las probetas en el HoSIER, UNAM.

El Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSIER) es una instalación que forma parte de Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar, ubicado en la Ciudad de Temixco, Morelos, México.

El HoSIER es un sistema de concentración solar que se denomina horno solar de eje horizontal, que cuenta con un helióstato de seguimiento automático del movimiento del Sol, programado para que reflejar la irradiación hacia la superficie reflejante concentradora en el interior del HoSIER, este laboratorio es descrito por Riveros Rosas et al. (2010).

La superficie concentradora en el interior del HoSIER es un arreglo de espejos de primera superficie, compuesto por facetas dispuestas con distribución esférica. Estas facetas de la superficie

concentradora tienen una corrección de ángulo de manera que el punto focal del HoSIER se encuentra a 3.68 m de esta superficie en el mismo eje horizontal. Esta superficie concentradora tiene el carácter de un concentrador inmóvil; es la mesa móvil (ubicada en el interior del recinto del HoSIER), la que mediante su movimiento, posiciona el sujetador de probetas para proporcionar la ubicación deseada en el eje focal de este sistema. La mesa cuenta con un sistema de control a distancia, que al igual que el heliostato, está programada empleando LabView® de National Instruments®. La figura 4.14, es una fotografía del HoSIER, en donde se llevaron a cabo todos los experimentos de este proyecto.



Figura 4.14. HoSIER, de la UNAM-Conacyt donde se realizó el experimento de fatiga foto-termo-mecánica para probetas cilíndricas tubulares de acero inoxidable AISI 316.

El experimento de probetas tubulares de acero inoxidable 316, contempla piezas que tienen una dimensión semejante a las que son empleadas como componentes en los receptores de tipo torre central, y que al tiempo son asequibles en México. Estas probetas tienen una longitud de 0.55 m, con 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro interior y exterior respectivamente.

La exposición de probetas ha contemplado dos distancias en el eje focal del HoSIER, esto es 50 mm y 60 mm detrás del punto focal del HoSIER, que se encuentra a una distancia de 3.68 m de la superficie facetada concentradora como se muestra en la figura 4.15. Estas distancias se han determinado de esta manera con base en que se debe asegurar una operatividad del HoSIER, y además en que sea posible tener una magnitud de concentración suficiente para obtener temperaturas de operatividad de los sistemas de tipo torre central. Una distancia más corta con respecto del punto focal no es posible, pues

a tal apertura mínima planteada, las probetas podrían ser súbitamente fundidas, y al tiempo se desea que el flujo radiativo tenga afectaciones en la mayor proporción de la longitud de la probeta.

La figura 4.15 es un esquema de la realización de estos experimentos, donde en 4.15(a) se encuentra el esquema del experimento de la exposición de probetas cilíndricas tubulares de acero inoxidable y en 4.15(b) se encuentra el esquema de localización de las probetas sobre el eje focal.

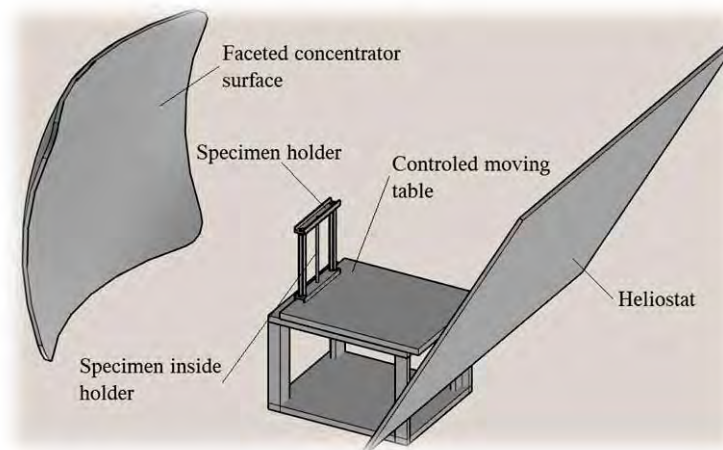
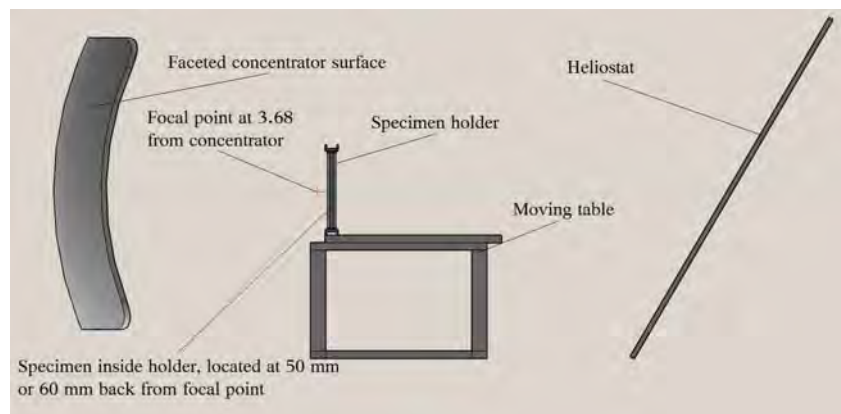


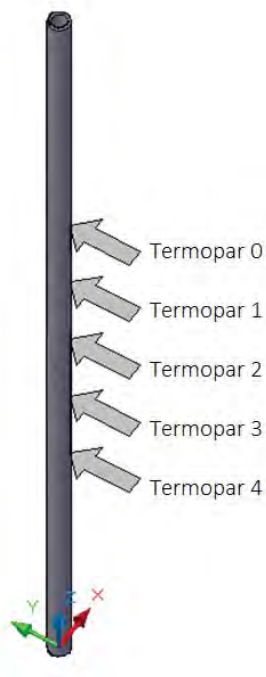
Figura 4.15(a). Esquema de la instalación de los experimentos de exposición a la ISC en el HoSIER



(b)

Figura 4.15(b). Esquema de exposición de las probetas de acero inoxidable AISI 316 en el HoSIER

Cada probeta fue instrumentada con 5 termopares tipo "K" dispuestos uno en la parte central y dos más en la parte superior e inferior cada 5 cm, esto permite obtener un perfil térmico que se desarrolla sobre las probetas cuando son radiadas. Su disposición se encuentra definida con base en la figura 4.16.



Número de termopar	Coordenadas del termopar
4	(0, -0.00635, 0.175)
3	(0, -0.00635, 0.225)
2	(0, -0.00635, 0.275)
1	(0, -0.00635, 0.325)
0	(0, -0.00635, 0.375)

Figura 4.16. Número de termopar para registro térmico, coordenadas de localización de los termopares

Un sujetador de probetas fue diseñado y construido a fin de contar con un instrumento que permita exponer las probetas al flujo radiativo, permitiendo su enfriamiento y con mínima intervención mecánica del instrumento. Este soporte permite el enfriamiento pues la parte que sujeta a las probetas cuenta con orificios por los que entra aire de enfriamiento y tiene medio de salida. Asimismo, es posible cambiar la probeta para los siguientes experimentos. La figura 4.17 muestra una fotografía de la instrumentación completa

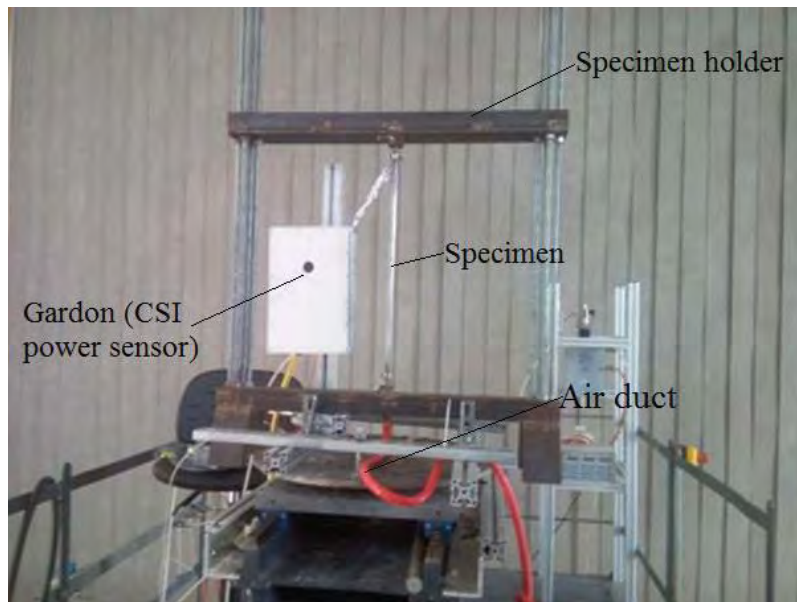


Figura. 4.17. Fotografía de la probeta instalada en la mesa de experimentos del HoSIER

Se desarrolló un programa para el control del atenuador del HoSIER con base en umbrales de temperatura donde el atenuador abre hasta una apertura determinada manualmente de 20% y hasta 100% de acuerdo con la irradiación del día, y posteriormente cierra por completo cuando el mismo programa de control detecta que en el termopar central existe una temperatura en la sección trasera de la probeta ha llegado a la temperatura de “sal caliente” que corresponde a 565 °C. El atenuador vuelve a abrir para el siguiente ciclo a la apertura predispuesta cuando se ha detectado en este mismo termopar una temperatura de 285 °C que es la temperatura de operación con “sal fría” en los sistemas de concentración de tipo torre central. Esta temperatura fría implica que la sal no sería congelada en el interior del elemento tubular, asemejando el caso de operación continua pero una interrupción en el flujo radiativo debido a un meteoro o una falla de control del campo de helióstatos.

El aire de enfriamiento para las probetas tiene un flujo de $8\text{m}^3\text{ hr}^{-1}$, mismo que con base en el diámetro corresponde a tener una “rapidez de bulo” de 31.35 m s^{-1} .

El acero inoxidable fue elegido como material de los experimentos del presente proyecto, pues es el material más económico que es empleado en algunos receptores de tipo torre central. Sus características de resistencia a la oxidación y su resistencia mecánica a elevadas temperaturas, permiten contemplarlo para los elementos tubulares por los que circulan los fluidos caloportadores. No obstante, siendo esta aleación la más carente en cuanto a estas características deseables, se trata del material que más restricciones tiene si se compara con las denominadas super-aleaciones de níquel (i.e.

Inconel 625, Incolloy 800). El acero inoxidable 316 tiene una denominación ASTM A 313, y tiene una composición nominal de Cr 16%-18%, Ni 10%-14%, Mo 2%-3% de acuerdo con el Metals Handbook Vol. 1. Este acero inoxidable es empleado cuando se requiere una mayor resistencia a la corrosión que el acero inoxidable AISI 302 o el 304

El acero inoxidable tiene una absorptividad en el espectro solar de 0.3835, según lo que reportan Sibir et al. (2015). Este valor es considerado para realizar los modelos de calor y termo-mecánicos en COMSOL MULTIPHYSICS®, cuya finalidad es determinar parámetros para el diseño del experimento como se ha venido exponiendo. Estos parámetros son determinar la temperatura máxima obtenida en las probetas con base en el tiempo de los ciclos, y la apertura del atenuador del HoSIER.

4.4.1. Ciclos térmicos de las probetas de acero inoxidable 316 en el HoSIER.

Ambas exposiciones a 50 mm y 60 mm del punto focal, realizadas para obtener temperaturas semejantes a las obtenidas durante la operación de los receptores de los sistemas de concentración solar de tipo torre central con fluido caloportador constituido por sales fundidas y la mezcla de éstas; se realizaron con ciclos térmicos con el objetivo de lograr una afectación de los materiales por causa de la fatiga foto-termo-mecánica y por efecto de la propia exposición a la radiación solar concentrada. Ambos umbrales térmicos (285 °C y 565 °C) representan para el programa en Lab View que el atenuador debe cerrarse en el caso de obtener la temperatura máxima y de abrirse para la temperatura mínima y así comenzar un nuevo ciclo para las probetas. Considérese la instrumentación descrita en la figura 4.18.

La sola exposición al flujo radiativo concentrado ha demostrado obtener una transformación de los materiales de acuerdo con Herranz y Rodríguez (2010) en razón de la componente de radiación ultravioleta del espectro solar y que se tienen en la irradiación sobre la superficie terrestre, pues se considera que ésta componente radiativa posee la capacidad de desplazar los elementos en las soluciones sólidas activando el mecanismo de una transformación de fase alotrópica a partir de la solución sólida original. Ciertamente, los fenómenos de transformación pueden implicar una diversidad de riesgos; i.e. los elementos precipitados intergranularmente quedan más expuestos a experimentar una reacción con el oxígeno ambiental mismo que al generar nuevos compuestos de baja adherencia al sustrato metálico y retirarse el mismo, implica la pérdida de masa gradualmente que la pieza contiene al inicio de la exposición, así como susceptibilidad mecánica a la fatiga, deformación y fractura. Este es un factor que paulatinamente impacta de forma negativa a la geometría inicial de diseño de los elementos mecánicos de los receptores, y que por estas razones logra que las aleaciones tengan una

cualidad de resistencia mecánica a altas temperaturas reducida causada porque parte de la masa se ha eliminado en forma de óxidos y que puede comprometer la operatividad y la vida útil de los elementos.

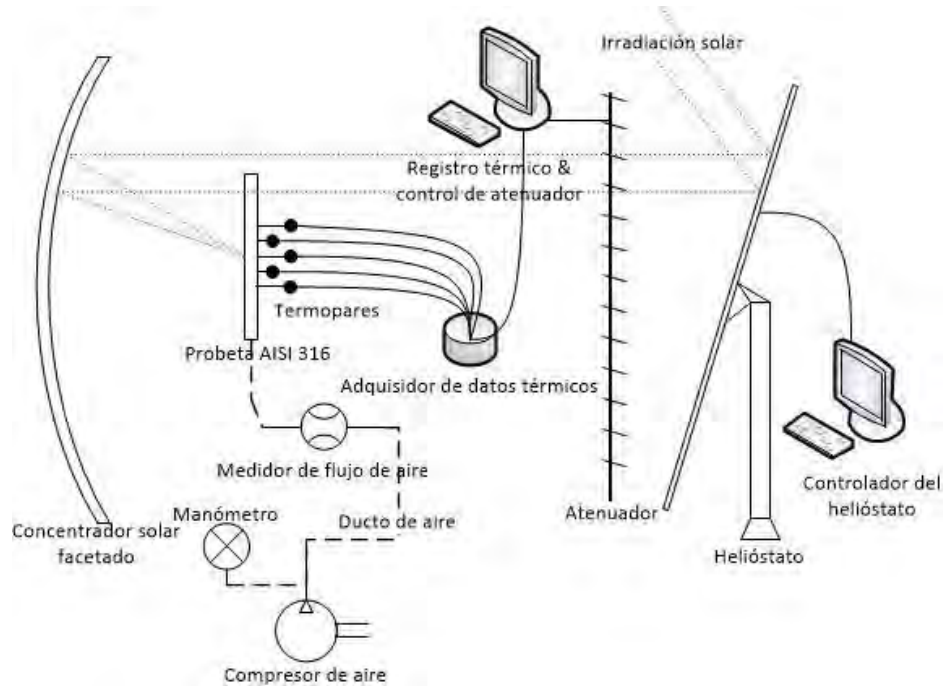


Figura 4.18. Esquema operativo de la exposición de probetas en el HoSIER

La situación de obtención de las temperaturas en el umbral alto y bajo es interpretada por el termopar central o aquel termopar que obtenga lecturas de temperatura más alta en el ciclo térmico. Para todos los casos resulta ser el termopar número dos, el cual es el termopar central. El termopar número cero es por consecuencia al ordenar los termopares en el adquisidor de datos Compac Rio® de National Instruments®, el que se ubica en la parte superior de la probeta y próximo a la salida del flujo de aire refrigerante. Cabe destacar que el enfriamiento es con flujo de aire interno y no externo como es el caso de la instrumentación de Evans et al. (2008), aunque existe una pérdida de energía calorífica externa por efectos convectivos y radiativos contempladas en el modelo descrito anteriormente.

El ciclado térmico que ha sido adquirido con base en los termopares, permite tomar registro de los ciclos realizados para cada una de las probetas. Al tiempo, el programa adquisidor también captura en el registro el horario de realización, con lecturas de irradiación y apertura del atenuador requerida para lograr el calentamiento en el umbral máximo de temperatura.

Probeta A.

La probeta A fue expuesta a 91 ciclos de flujo radiativo concentrado a una distancia de 50 mm detrás del punto focal. Por esta razón la probeta A es una probeta con un flujo más homogéneo si se compara con las que están a 60 mm del punto focal.

Los parámetros de la experimentación con la probeta “A” están contenidos en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Parámetros experimentales para probeta A

Fecha	Horario	Irradiación normal directa máxima y mínima	Apertura del atenuador
Octubre 16, 2015.	13:12 a 15:01 horas.	Máxima de 800 W m^{-2} Mínima de 740 W m^{-2}	25 %

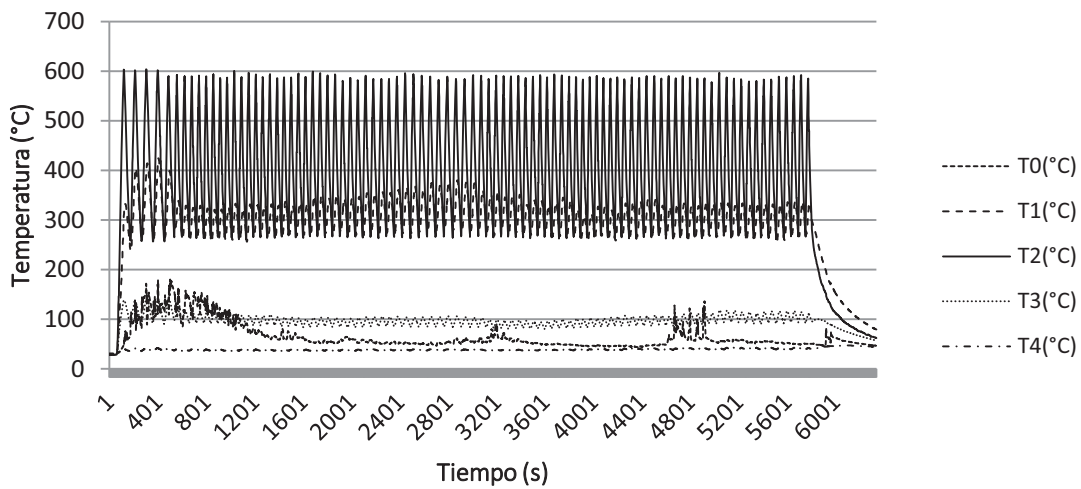


Figura 4.19(a). Ensayo térmico completo para la probeta A.

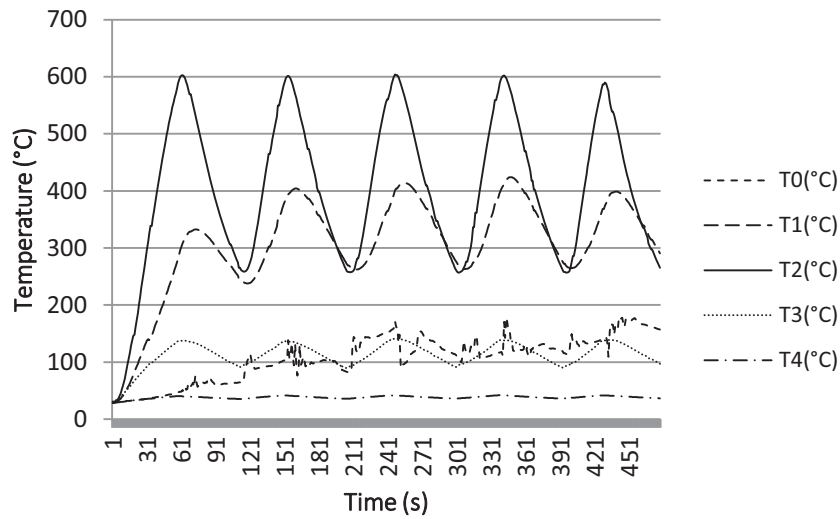


Figura 4.19(b). Cinco primeros ciclos para probeta "A"

Probeta B

La probeta B fue expuesta a 89 ciclos de flujo radiativo concentrado a una distancia de 50 mm detrás del punto focal. Al igual que la probeta A, la probeta B es una probeta con un flujo más homogéneo si se compara con las que están a 60 mm del punto focal.

Los parámetros de la experimentación con la probeta "B" están contenidos en la tabla 4.4

Tabla 4.4. Parámetros experimentales para probeta B

Fecha	Horario	Irradiación directa mínima	normal máxima y	Apertura del atenuador
Octubre 19, 2015.	10:57 a 15:11 horas.	Máxima de 800 W m ⁻² Mínima de 50 W m ⁻²		25 % y 35% predominantemente

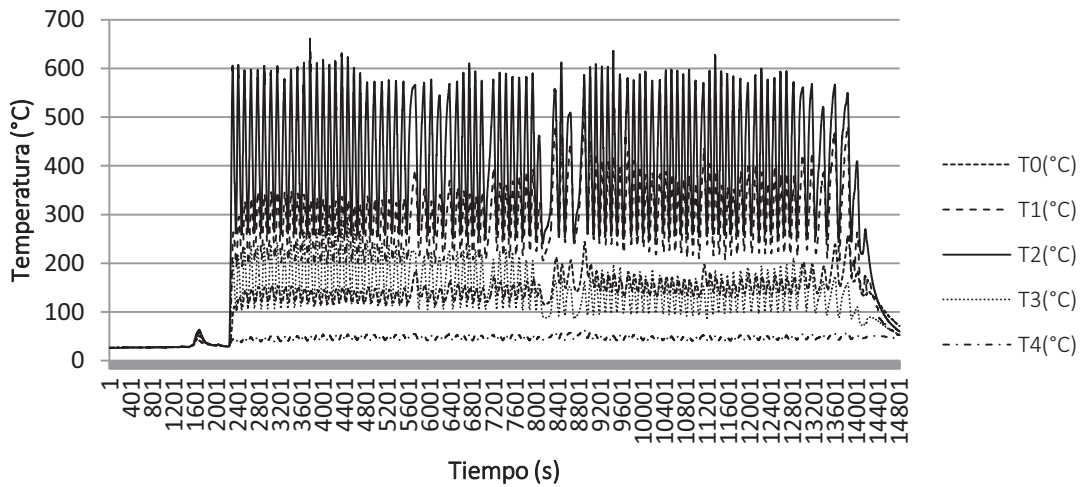


Figura 4.20(a) Ensayo térmico completo para la probeta B

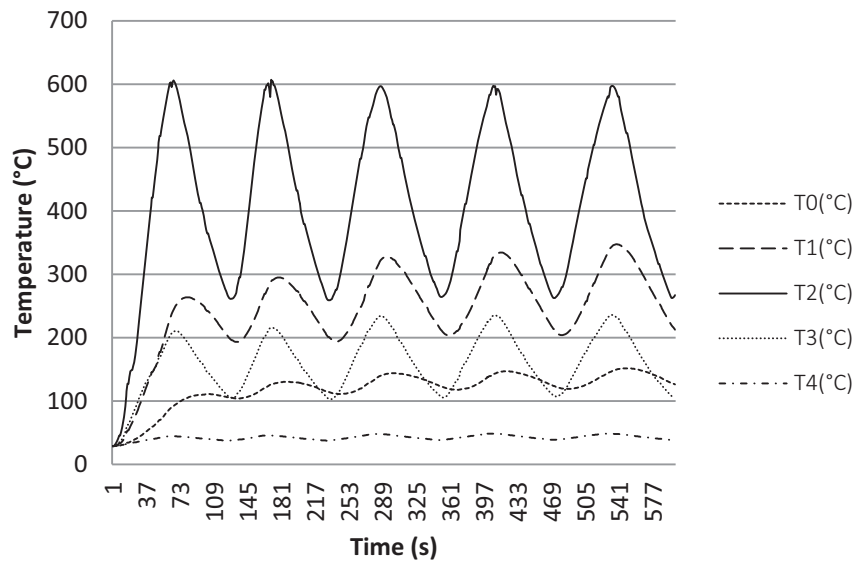


Figura 4.20(b). Cinco primeros ciclos para probeta "B"

Consideraciones de perfil térmico obtenido en las probetas A y B; expuestas a 50 mm del punto focal en el HoSIER

Para el caso de las probetas A y B, en principio, se ha definido la diversidad de parámetros del experimento; esto es, se ha definido que para esta proximidad al punto focal es posible su calentamiento, el tiempo del ciclo dadas las condiciones de calor, una deflexión de la geometría de la

probeta máxima y no relevante que no representa mayor acercamiento hacia el punto focal. De esta manera, para cierto momento y contemplando la gran paridad de condiciones de irradiación, así como la misma distribución de flujo radiativo sobre las geometrías cilíndricas, la figura 4.21 muestra el perfil térmico obtenido:

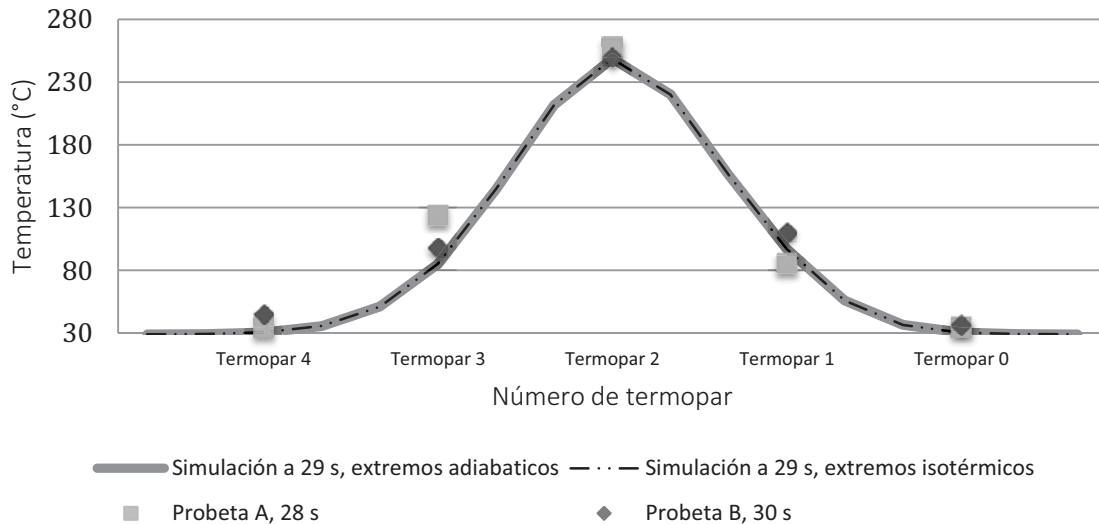


Figura 4.21 Perfiles de temperatura para las probetas A y B, y la temperatura obtenida del modelo numérico respectivo a 50 mm del punto focal en el modelo del HoSIER

Se puede observar en esta figura 4.21 que para tiempos con una variación de un segundo el perfil térmico obtenido es sumamente cercano en cuanto a su magnitud.

El perfil térmico entonces se grafica considerando que para el primer ciclo de calentamiento de las probetas, a una temperatura donde las probetas no presentan óxidos diferentes al óxido de cromo propio y característico protector de esta aleación; por esta razón, tienen el comportamiento de absorptividad y emisividad más semejante al reportado en la literatura y es posible asumir condiciones de calor semejantes.

La semejanza en la comparación da validez al modelo y demuestra que la simulación numérica ha sido útil por completo para definir los parámetros de experimentación.

Probeta C.

La probeta C fue expuesta a 38 ciclos de flujo radiativo concentrado a una distancia de 60 mm detrás del punto focal. La probeta C, al estar situada a 60 mm detrás del punto focal recibe un flujo radiativo

menos homogéneo que el flujo recibido por las probetas A y B, tal situación se debe que a una magnificación del flujo implica que los efectos ópticos debidos a los errores de la superficie concentradora impacten más en el flujo que se obtiene a tal distancia, obteniendo un flujo con una distribución menos homogénea en cuando a la distribución de la potencia por unidad de área, para cierta región irradiada de la probeta. Tal situación implica que se estará obteniendo una zona más grande afectada por los gradientes y esfuerzos térmicos.

Los parámetros de la experimentación con la probeta “C” están contenidos en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Parámetros experimentales para probeta C

Fecha	Horario	Irradiación normal directa máxima y mínima	Apertura del atenuador
Octubre 20, 2015.	11:39 a 12:42 horas.	Máxima de 750 W m^{-2} Mínima de 600 W m^{-2}	70%

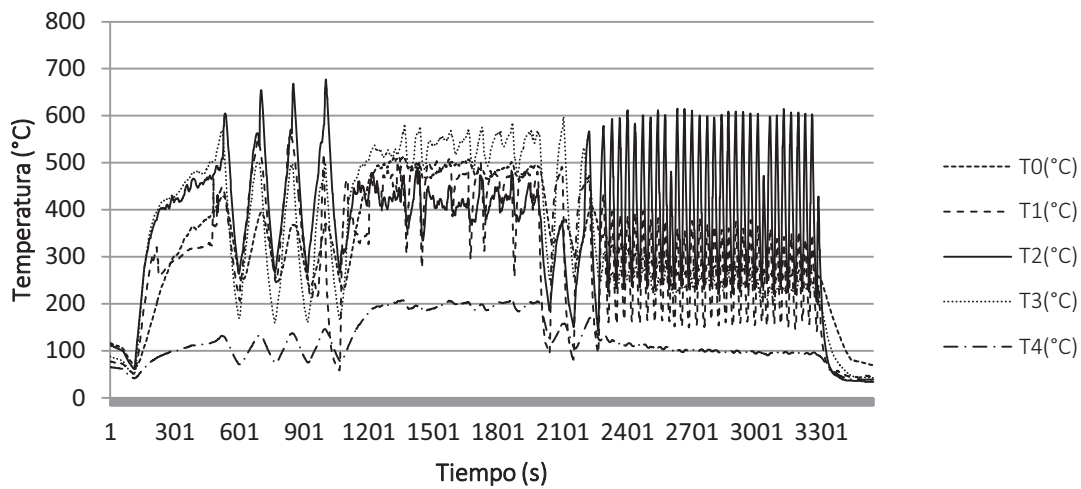


Figura 4.22(a). Ensayo térmico completo para la probeta C.

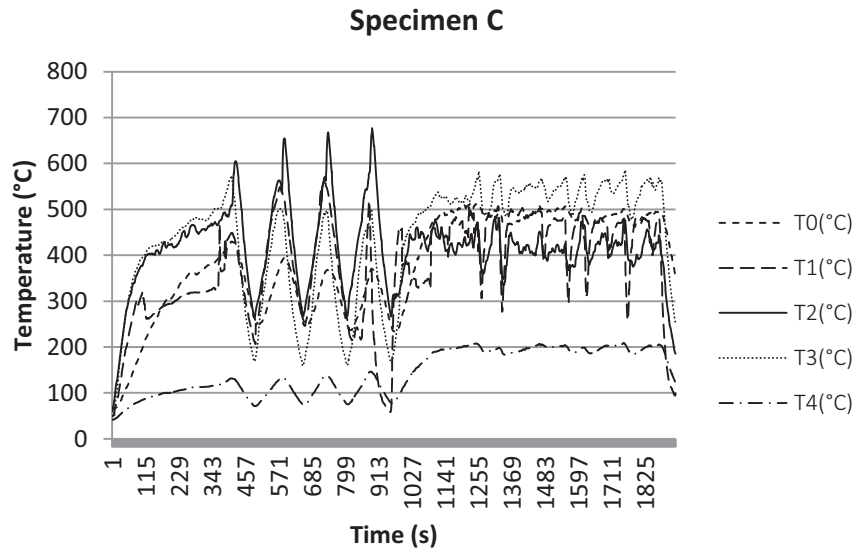


Figura 4.22(b). Cinco primeros ciclos para probeta "C"

Probeta D.

La probeta D fue expuesta a 67 ciclos de flujo radiativo concentrado a una distancia de 60 mm detrás del punto focal. Los parámetros de la experimentación con la probeta "D" están contenidos en la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Parámetros experimentales para probeta D

Fecha	Horario	Irradiación normal directa máxima y mínima	Apertura del atenuador
Noviembre 4, 2015.	12:19 a 14:53 horas.	Máxima de 885 W m ⁻² Mínima de 765 W m ⁻²	25%

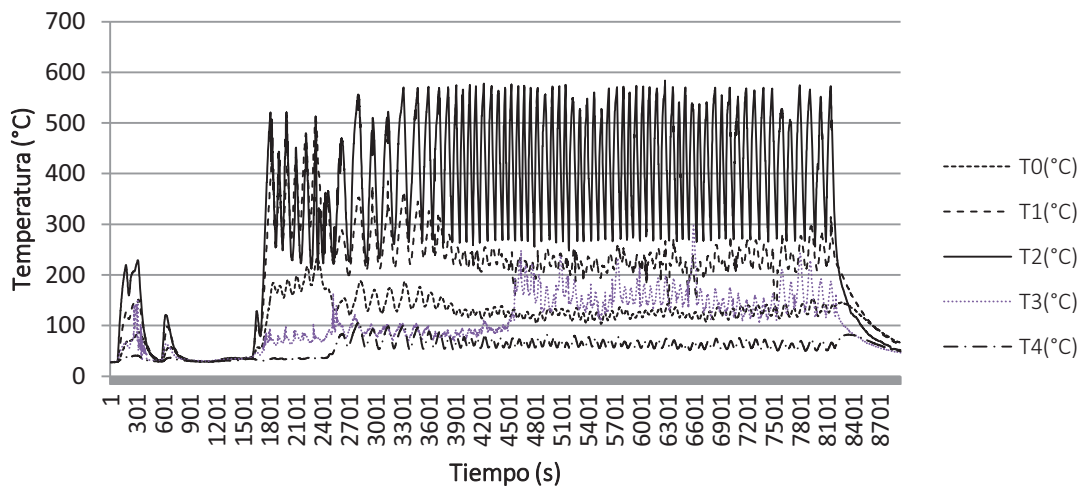


Figura 4.23(a). Ensayo térmico completo para la probeta D

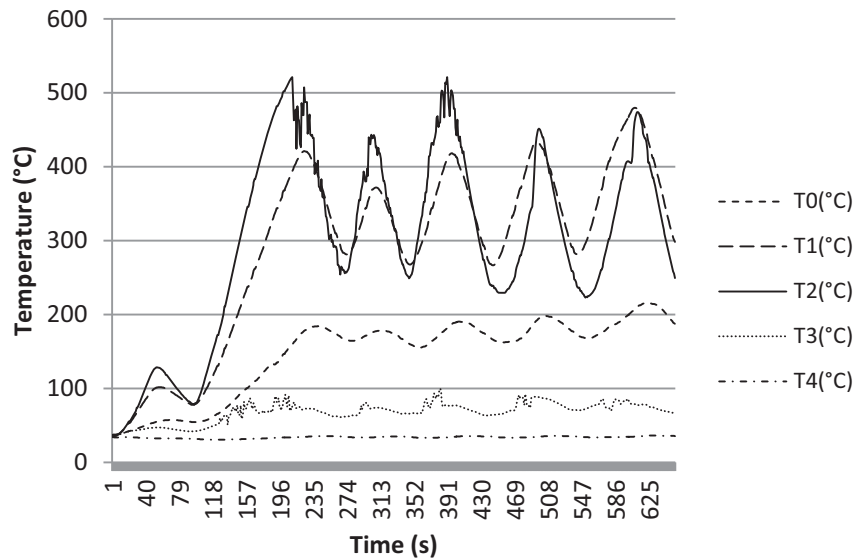


Figura 4.23(b). Cinco primeros ciclos para probeta "D"

Consideraciones de perfil térmico obtenido en las probetas C y D; expuestas a 60 mm del punto focal en el HoSIER

La comparación del perfil térmico para las probetas C y D se muestra en la figura 4.24. Nuevamente esta comparación se realiza con el objetivo de reconocer la validez del modelo numérico y determinar que el diseño experimental fue adecuado. Al tiempo esta comparación indicará que las condiciones de calor contempladas en el experimento son las adecuadas.

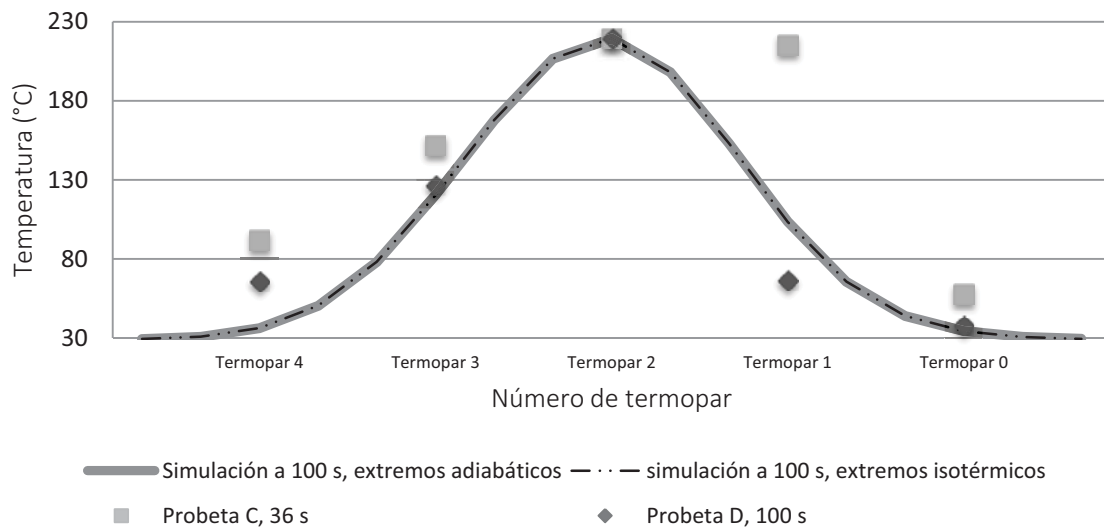


Figura 4.24 Perfiles de temperatura para las probetas C y D, y la temperatura obtenida del modelo numérico respectivo a 60 mm del punto focal en el modelo del HoSIER

En la figura 4.24 para las probetas C y D se aprecia una reservada similitud en los perfiles térmicos, sin embargo, existe también una diferencia de tiempos y una discrepancia para el termopar número 4 para la probeta C, en virtud de que durante la experimentación ocurrió un desprendimiento del adhesivo cerámico y su lectura no es confiable, por consiguiente. Al tiempo, con base en la comparación de la curva que describe la simulación y los de temperatura tomados del transductor de los termopares, es notable que la simulación subestima las temperaturas de los termopares ubicados bajo el termopar 2 y sobreestima las temperaturas de los termopares ubicados por encima del mismo; tal situación implica una falta de precisión del coeficiente convectivo selecto, ya que se trata de una correlación que no considera la expansión del fluido de aire cuando atraviesa la zona de mayor temperatura al interior del tubo. Para obtener una mayor precisión de estos resultados, futuras simulaciones deben prevenir correlaciones convectivas con el cambio de temperatura del fluido de enfriamiento.

El hecho de la diferencia en los tiempos ocurrió en virtud de que a la probeta C le toma tan solo 36 s en adquirir este perfil térmico, debido a que la apertura del atenuador le permitió obtener una potencia concentrada suministrada más alta. Esto, por su parte, hace que los calentamientos sean más abruptos y que se desarrollen los esfuerzos térmicos en intervalos de tiempo más bajos. Su número total de ciclos es de solo 38 en un tiempo de ensayo de 3300 s. Al respecto de la discrepancia en el termopar número 4 de la probeta C ocurrió un desprendimiento de este termopar durante la experimentación, lo cual implica que sus resultados son inválidos y se descartan para efecto del presente análisis.

Un argumento que explica que la probeta C obtiene un mayor calentamiento en todos sus termopares para un perfil semejante de temperatura máxima en el centro, es que la propiedad de transporte de difusividad térmica eleva la temperatura de toda la región dada una magnitud mayor de potencia concentrada. Esta situación con respecto a su temporalidad es tanto más semejante para la probeta D.

La probeta D tiene una mayor semejanza con respecto a la simulación y en virtud de que su apertura es tan solo del 25%, el perfil térmico de la probeta presenta aún menor diferencia debido a la combinación de fenómenos de calor (i.e. pérdidas radiativas y difusividad térmica), pues el modelo numérico a 60 mm considera un porcentaje de apertura semejante a 25%, afectado también por el factor de horno.

Esto valida los resultados del modelo numérico para la exposición de probetas a 60 mm. No obstante hay una gran diferencia entre los tiempos de ensayo pues para la probeta C es de tan solo 3 300 s mientras que hay un tiempo efectivo de experimentación de aproximadamente 7 200 s para la probeta D.

Capítulo 5. Análisis de resultados de las pruebas realizadas a los materiales expuestos a irradiación solar.

5.1. Ensayo de tracción monotónica.

La integridad mecánica de los elementos de los receptores de los sistemas de concentración de tipo torre central debe ser considerada para efectos de mantener la operación del sistema. Eventualmente, por causa de la fatiga térmica o una transformación de propiedades mecánicas por causa de efectos alotrópicos, los elementos pueden sufrir agrietamientos que pueden provocar fugas y que comprometen la operación total del sistema. Al tiempo este fenómeno de fatiga termo-mecánica no se encuentra aislado para el caso de este tipo de sistema, sino que existen factores que incentivan su degradación; i.e. la exposición al flujo radiativo concentrado que causa envejecimiento de los materiales, transformaciones por transformaciones de fase activadas por el espectro radiativo que pueden resultar en una transformación subsecuente de las propiedades de resistencia química, y finalmente de la degradación por erosión y corrosión conjunta debida a la circulación de los fluidos caloportadores que se convierten en agentes de ataque químico debido a la alta temperatura y su eventual descomposición. Dado el enfriamiento por aire en el diseño experimental realizado, no se espera una erosión propiamente como efecto en la presente investigación.

Realizar la comparación de la degradación de propiedades mecánicas post-ensayo térmico es una propuesta que se realiza en estudios tales como el de Sianie et al. (2014), donde sus probetas son probadas mecánicamente luego de tener cargas y calentamiento semejantes a los que suceden en la ocurrencia de un incendio.

En el experimento planteado ciertamente no existe una descomposición de sales fundidas, ya que las probetas son enfriadas con aire, no obstante el oxígeno en el aire se convierte en un agente reactivo a elevada temperatura para formar óxidos superficiales y el resto de los agentes degradantes están presentes. Este aire de enfriamiento es llevado por un ducto hasta la probeta donde empleando un flujómetro se establece una magnitud de $8 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$, mismo que considera una rapidez de bulbo de 55 m s^{-1} .

En una primera instancia el interés que existe es el de validar la posible modificación de propiedades mecánicas ocasionadas por la ocurrencia de los primeros 35 a 90 ciclos de calentamiento por exposición a la irradiación solar concentrada.

Dado que las propiedades mecánicas de dureza y resistencia máxima a la tensión, así como las propiedades obtenidas a través del trazo de la curva de fluencia pueden ser transformadas por efecto

de la exposición a los ciclos de irradiación solar concentrada, una de las finalidades de este estudio es validar dichas transformaciones, mediante la comparación de las mismas con las que una probeta hecha con un segmento del mismo material que no ha sido expuesta a tales afectaciones.

Las probetas expuestas a los ciclos foto-térmicos fueron evaluadas en cuanto a sus propiedades mecánicas en un ensayo de tracción monotónico, para las que se determina su coeficiente y exponente de resistencia a la tracción. Ambas propiedades determinadas, son útiles para validar la ocurrencia de la transformación de propiedades mecánicas del material, de la geometría específica de los tubos empleados para construir receptores de los sistemas de concentración de energía solar de tipo torre central. La figura 5.1 muestra las curvas de esfuerzo-deformación verdadera para cada uno de las probetas, donde es posible anticipar a simple vista que las propiedades de resistencia a la tracción monotónica y el endurecimiento frente a la tracción no fueron modificadas por efecto de los ensayos de ISC en el HoSIER.

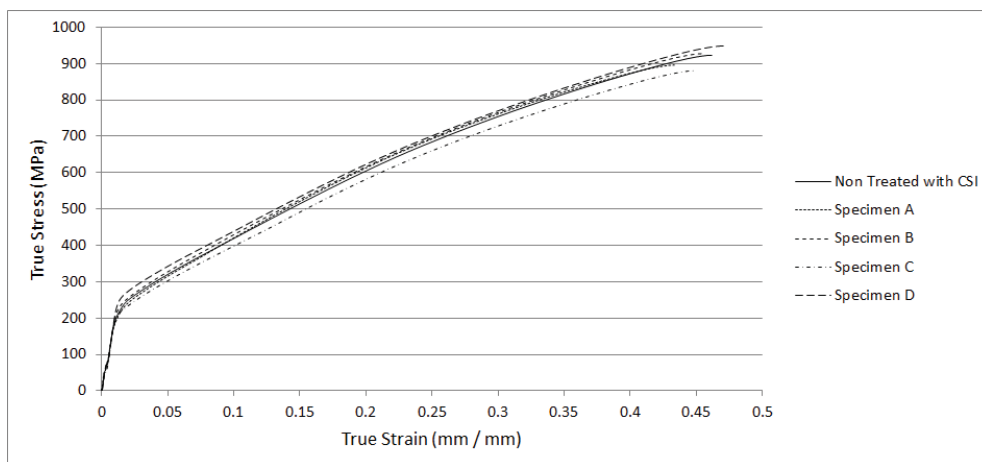


Figura 5.1. Curva de esfuerzo-deformación verdadera para cada uno de las probetas.

Es posible observar a partir de la figura 5.1, que el comportamiento mecánico de las diferentes probetas A, B, C, D y la probeta sin exposición a la ISC, a la tracción monotónica, no exhiben una diferencia notable en sus propiedades mecánicas; de esta forma es posible asumir que para los primeros ciclos foto-térmicos (35 a 90) no se obtiene una afectación importante de las propiedades mecánicas que hagan evidente una afectación por fatiga o por dispersión alotrópica, aun cuando se considera que se han realizado sobrecalentamientos del material considerables, por encima de las temperaturas de sal caliente de operación propio de estos sistemas de concentración.

Las investigaciones en este marco teórico muestran resultados al respecto de que la distribución de la irradiación concentrada proveniente de los sistemas de concentración solar tiene ciertas distribuciones

con gradiente espacial de la potencia obtenida a partir de estos, debidos a los errores ópticos inherentes del sistema; esto genera gradientes en el campo térmico y tales a su vez generan diferencias de expansión térmica que conduce a esfuerzos de esta naturaleza. Los esfuerzos afectan de una manera más acentuada cuando se presentan en un material a elevada temperatura, ya que este factor le hace más sensible dado que los materiales a elevada temperatura presentan propiedades mecánicas disminuidas y el acero inoxidable no es la excepción. Eventualmente, debido a los errores de control esta misma situación de una distribución inhomogénea del flujo radiativo se ve incentivada.

La aparición de dichos gradientes es intermitente a su vez debido a la intermitencia del recurso solar; la distribución térmica es entonces, también, intermitente y con ésta los esfuerzos térmicos que se presentan. Tales condiciones de intermitencia desarrollan el fenómeno de fatiga foto-termo-mecánica que puede estar siendo acentuada por la aparición de fenómenos de corrosión al mismo tiempo. Ciertamente, el espectro solar genera un impacto al afectar transformaciones de fase en los materiales tal como lo encuentran Herranz y Rodríguez (2010), Sjöström y Bergström (2004). Sin embargo, es posible enunciar que para los primeros ciclos foto-térmicos realizados en este experimento no se genera una afectación en las propiedades mecánicas que tenga un carácter evidente.

En la tabla 5.1 se muestran los exponentes de endurecimiento a la deformación n y coeficientes de resistencia K . También se muestran los diferentes σ_0 , que son las magnitudes de esfuerzo verdadero necesario para emplear el criterio “yield strength (esfuerzo de cedencia)” y determinar el comienzo de la curva de fluencia. La ecuación de Ludwik (5.1) se puede determinar con estos parámetros para cada una de las probetas A, B, C, D y su tratamiento de ciclos de ISC; donde no se encuentra diferencia sustancial al respecto de su comportamiento mecánico a la tracción. La propia diferencia puede considerarse dentro de error experimental y así es posible asumir entonces que no se presenta diferencia entre las diversas probetas.

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (5.1)$$

Tabla 5.1. Parámetros de la ecuación de Ludwik, (ecuación 7.1) desarrollada para cada uno de las probetas. σ_0 fue obtenida considerando el criterio “yield strength”(esfuerzo de cedencia), para permitir reconocer la región de Hollomon, y entonces obtener el coeficiente K y el exponente n a partir de la “curva de fluencia”, especificada en el Metals Handbook Vol. 8.

Probeta	σ_0	K	n
Sin tratamiento con ISC	216	1927.348	0.4429
A	212.92	1988.229852	0.4535
B	234.46	1948.47053	0.4403
C	213.03	1887.106533	0.4508
D	253.37	1876.755937	0.4205

A partir de los primeros 35 a 90 ciclos ISC con temperatura semejante a la de operación de los sistemas de concentración de tipo torre central con límites térmicos definidos con base de las temperaturas de sal fría y caliente, ejecutados sobre las probetas y con base en las ecuaciones de Ludwik obtenidas, es posible establecer que no ha habido una modificación relevante en las propiedades mecánicas comprobable mediante ensayo a la tracción monotónica.

Al tiempo, dado que se expuso que $\epsilon_u = n$, y los exponentes de la deformación a carga máxima no son sustancialmente diferentes, es posible concluir que al ser ϵ_u esencialmente invariable, las propiedades mecánicas de endurecimiento por deformación no cambian con la exposición de ciclos fototérmicos.

5.2. Estudios micrográficos ópticos de las probetas.

Para cada una de las probetas se realizaron micrografías ópticas con aumentos de 200x, 500x y 1000x. Los mismos aumentos para la micrografía de la probeta expuesta a tratamiento térmico convencional con calentamiento uniforme de 630 °C en una mufla se aplicaron para poder establecer una comparación; así mismo, a una probeta sin tratamiento también le fueron obtenidas sus micrografías con el mismo aumento. Se empleó para la realización de este estudio micrográfico óptico un microscopio Olympus® GX51.

Para cada una de las probetas las micrografías fueron obtenidas de una cara casi-perpendicular al eje de su geometría cilíndrica. El primer agente atacante empleado para observar la microestructura fue una mezcla de ácidos nítrico, acético y clorhídrico; aplicado por inmersión durante 15 a 20 segundos aproximadamente. Este primer estudio micrográfico con el agente químico atacante selecto, es revelador solo de la fase austenítica, y se ejecuta para realizar una exploración inicial y general de las afectaciones que hayan ocurrido en matriz del material de las probetas, así mismo para comprobar el carácter del propio material austenítico. Se presentan en las figuras 5.2 a 5.8 las microestructuras correspondientes a cada probeta.



Figura 5.2. Micrografía del acero inoxidable AISI 316 en estado de post-producción , 200 x

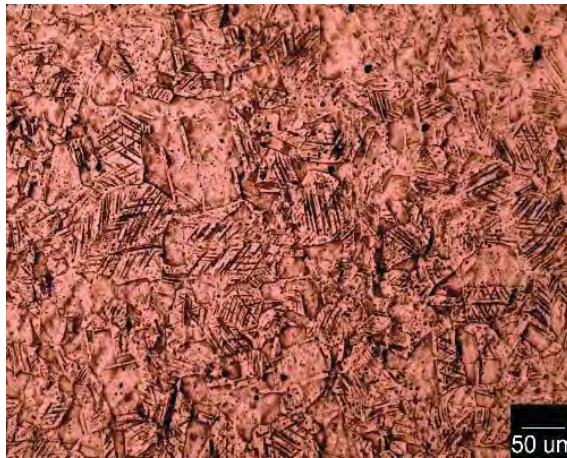
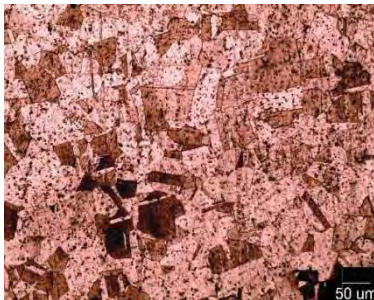
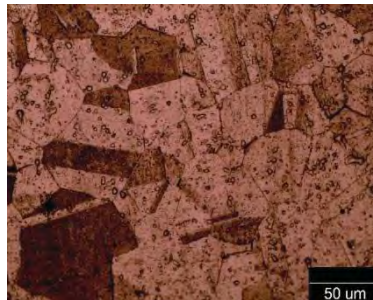


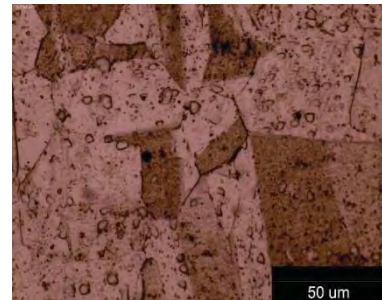
Figura 5.3. Probeta sin tratamiento térmico sometida al ensayo de tracción, 200x



(a) 200 x

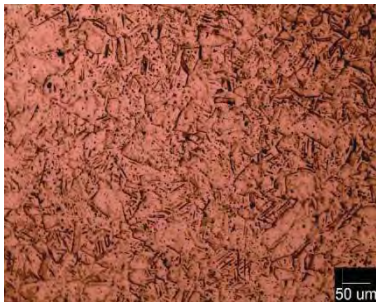


(b) 500 x

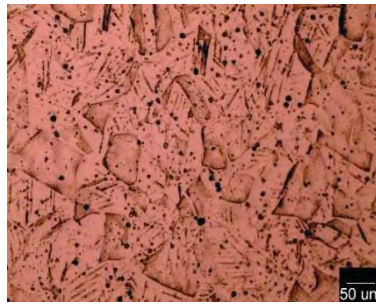


(c) 1000 x

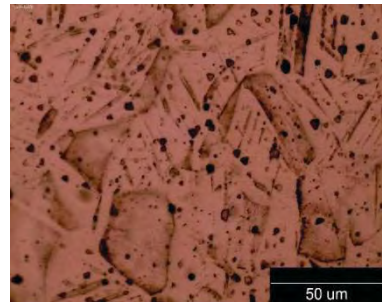
Figura 5.4. Micrografías para la probeta con tratamiento térmico convencional en mufla



(a) 200 x



(b) 500 x

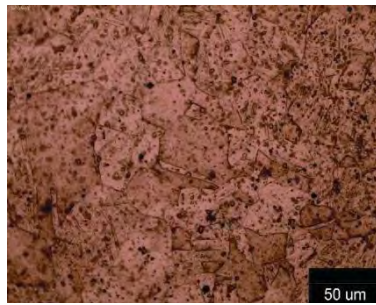


(c) 1000 x

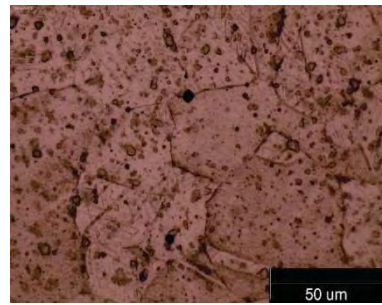
Figura 5.5. Micrografías de la probeta A



(a) 200 X

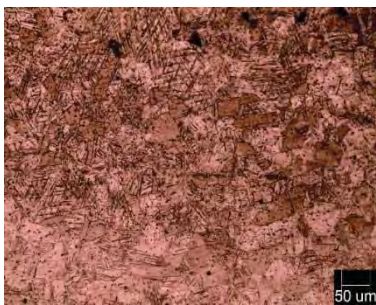


(b) 500 X

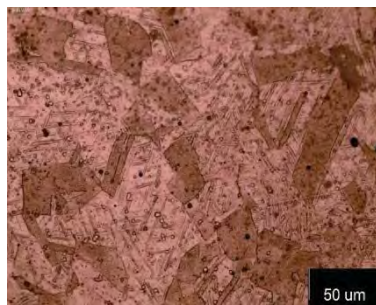


(c) 1000 X

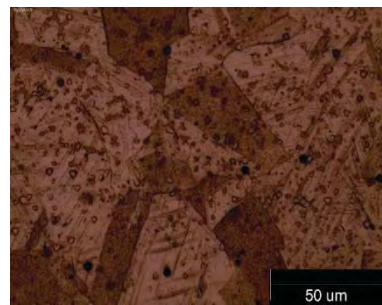
Figure 5.6. Micrografías de la probeta B



(a) 200 x



(b) 500 x



(c) 1000 x

Figure 5.7. Micrografías de la probeta C

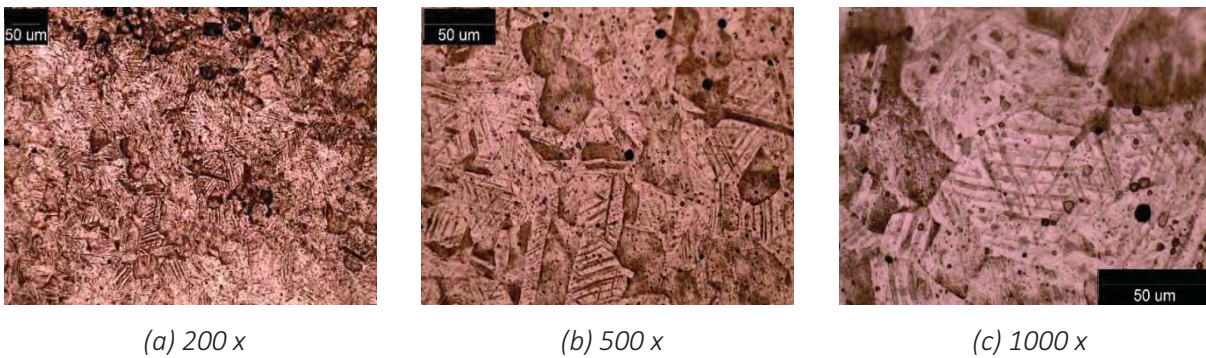


Figure 5.8. Micrografías de la probeta D

Es notable que no existe una visible transformación de las microestructuras de las diferentes probetas (A, B, C y D) de acero inoxidable austenítico AISI 316 que fueron expuestas a los ciclos de ISC si se compara con las probeta expuesta al tratamiento térmico convencional y con la que no recibió tratamiento alguno, con base en la comparación usando el primer agente de ataque. Tampoco es posible apreciar si se ha obtenido una nueva fase en el material, pues las mismas micrografías son evidentes y las fases aparentes son esencialmente equiparables.

Por su parte, debido a que las probetas son fabricadas por el método de manufactura de extrusión, se pueden observar maclas de deformación en las piezas. Esta característica está también presente en las probetas que no fueron sometidas al ensayo de tracción, de esta manera es notable que la aparición de maclas de deformación es debida al proceso de manufactura. Algunos posibles precipitados se pueden apreciar en todas las probetas, incluso en la que recibió tratamiento térmico convencional y la que no tiene tratamiento térmico; ya que esta característica es consistente, no es posible concluir hasta este momento que los posibles precipitados son originados por los ciclos de ISC identificando con este agente de ataque químico.

Investigaciones como las de Saeidi et al. (2015), Hsieh et al. (2008) han encontrado precipitados en aceros inoxidables tanto ferríticos como austeníticos, mediante tratamientos con calentamiento convencional y laser a temperaturas de 1100 °C y 1400 °C. Estos precipitados consisten en la formación de hierro delta a partir de los constituyentes de los aceros inoxidables, por un efecto señalado como principalmente térmico. Hsieh et al. (2008) han expuesto que los precipitados se desarrollan más fácilmente en un acero inoxidable ferrítico que en uno austenítico. La ocurrencia de la aparición de estos precipitados en las investigaciones mencionadas es argumentada como una activación térmica, sin embargo es considerable su aparición a temperatura menor dado que existe una activación

sinérgica a la térmica, que es la presencia de la fracción UV contenida en la irradiación solar sobre la superficie terrestre; por este motivo se reconoce como pertinente realizar una segunda inspección micrográfica revelador de la presencia de ferrita- δ .

Con base en identificar si es que se trata de una precipitación de ferrita- δ a partir de la matriz austenítica del acero inoxidable AISI 316 denominada hierro γ , se utilizó un agente de ataque químico para todo el conjunto de probetas, usando técnica de inmersión. Esta inmersión se realizó durante 10 s empleando una mezcla de ácido clorhídrico saturado con cloruro férrico (HCl y FeCl_3); pues de acuerdo con Vander Voort (1999), dicho agente químico tiene la capacidad de colorear exclusivamente los precipitados de ferrita- δ . Nuevamente, se empleó el microscopio Olympus® GX51, sobre la superficie de corte perpendicular al eje de la geometría cilíndrica de las mismas. Las figuras 5.9 a 5.13 son correspondientes a la serie de micrografías que emplearon este segundo agente de ataque químico.

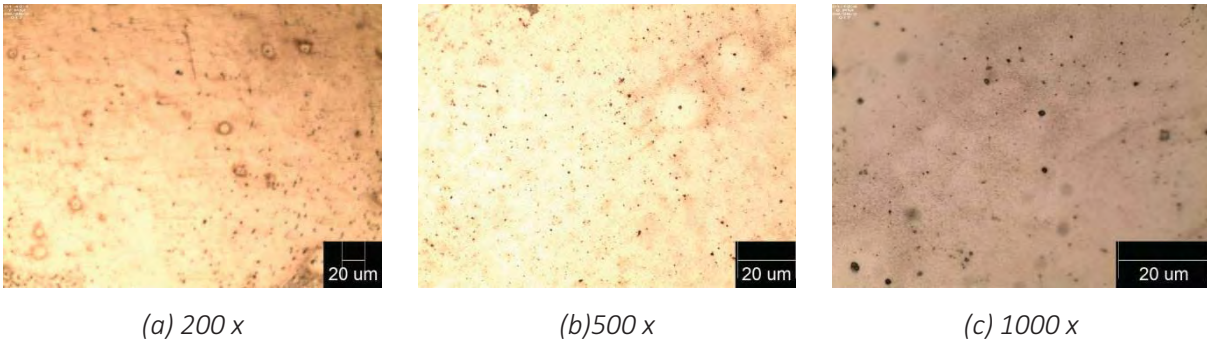


Figura 5.9. Micrografías para la probeta sin tratamiento térmico ni ensayo de tracción

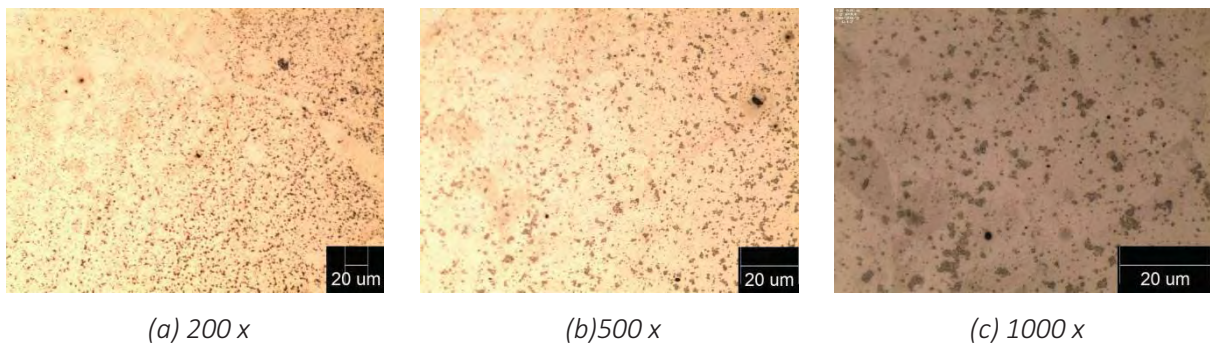
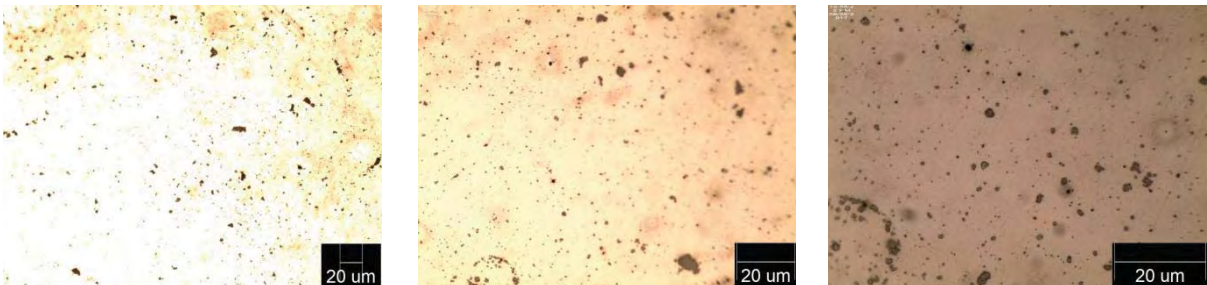


Figura 5.10. Micrografías de la probeta A atacada con HCl y FeCl_3

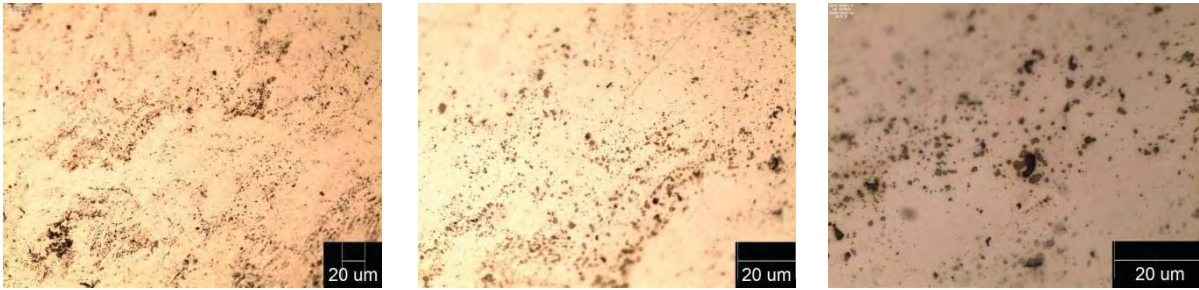


(a) 200 x

(b) 500 x

(c) 1000 x

Figura 5.11. Micrografías de la probeta B atacada con HCl y FeCl₃

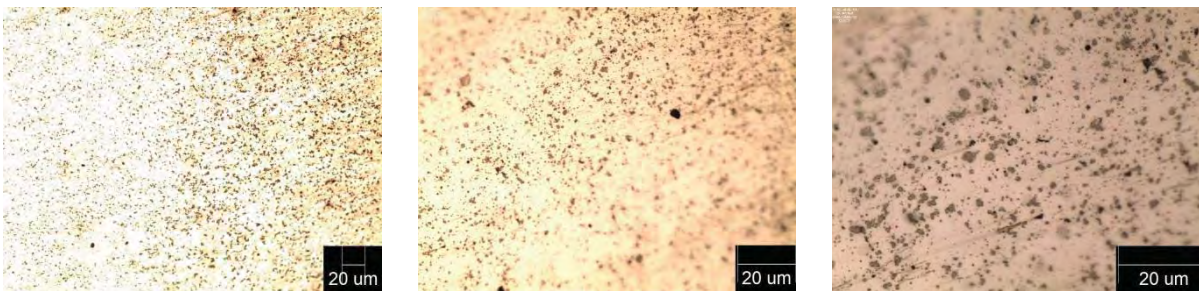


(a) 200 x

(b) 500 x

(c) 1000 x

Figura 5.12. Micrografías de la probeta C atacada con HCl y FeCl₃



(a) 200 x

(b) 500 x

(c) 1000 x

Figura 5.13. Micrografías de la probeta D atacada con HCl y FeCl₃

Existe una notable diferencia al comparar las probetas sometidas al tratamiento con ESC; eso es, la aparición de marcas de color oscuro y la alta densidad superficial de las mismas en estas micrografías. Esto es particularmente visible al comparar las micrografías desarrolladas con aumento 1000x. En virtud de que el agente químico atacante colorea la ferrita delta, es posible denotar una primera evidencia de la precipitación de esta fase en el acero inoxidable austenítico. Al comparar con las investigaciones anteriormente mencionadas, la obtención de este precipitado a la temperatura del ciclado foto-térmico realizado en el HoSIER marca una gran diferencia: la temperatura es significativamente menor. Este aspecto implica la capacidad activadora de la transformación alotrópica del acero sometido a la experimentación. Herranz y Rodríguez (2010) enuncian que este efecto activador reduce los tiempos de tratamiento térmico y que los fenómenos que ocurren en los materiales lo hacen también a temperaturas menores; ya que en un tratamiento térmico convencional están presentes los espectros de luz visible e infrarrojo, el fenómeno conduce a pensar que es la fracción del espectro ultravioleta la que logra tales.

Las micrografías realizadas con el segundo agente de ataque químico se realizaron posteriormente al análisis difractométrico; en virtud de que una hipótesis previa con base en las investigación de Sokolov et al. (2009) llevo a considerar la relevancia de discriminar entre la generación de la fase de ferrita- δ o

una fase cromoferrítica, ya que el análisis de dispersión energética EDS muestra la riqueza en cromo de las fases dispersas. El segundo agente de ataque químico es revelador sobre la presencia de ferrita- δ ; y aunque la fase es rica en cromo, como se sabe este elemento aleante es un estabilizador de la misma en este caso, según lo exponen Hsieh et al. (2008).

5.3. Estudio micrográfico electrónico de las probetas.

Con base en determinar la composición y estructura de las fases dispersas que aparezcan en las probetas tratadas con ciclos de ISC en el HoSIER y para obtener una caracterización integral de las mismas; estas mismas y las probetas de comparación que se han señalado (i.e. probeta sin tratamientos y probeta con tratamiento térmico convencional en mufla), fueron sometidas a un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) y un análisis químico mediante espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS por sus siglas en inglés). Estos análisis fueron realizados empleando un microscopio electrónico de barrido Philips XL 20.

Las figuras 5.14 a 5.19 muestran las micrografías obtenidas, comenzando con la probeta sin tratamientos, posteriormente con la de tratamiento convencional en mufla (en este capítulo y el siguiente denominadas “AR” y “CHT”, respectivamente, debido a su identificación en los software) y finalizando con las probetas sometidas a ciclos de ISC, A, B, C y D (en este capítulo y el siguiente denominadas “SA”, “SB”, “SC” y “SD”, respectivamente, debido a su identificación en los software). Las figuras están denotadas con (a) y (b) para magnificaciones de 100x y 800x respectivamente. En virtud de que se obtuvieron dispersiones fácilmente visibles en estas micrografías (cambios en la homogeneidad de la superficie visible), un análisis EDS puntual se realizó sobre las marcas sobre estas dispersiones visibles en las figuras para conocer sus elementos constituyentes.

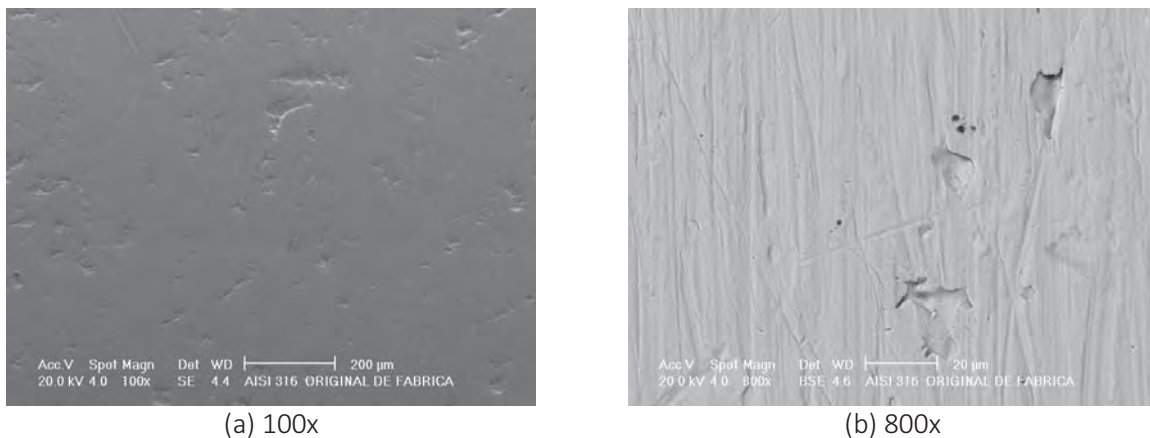
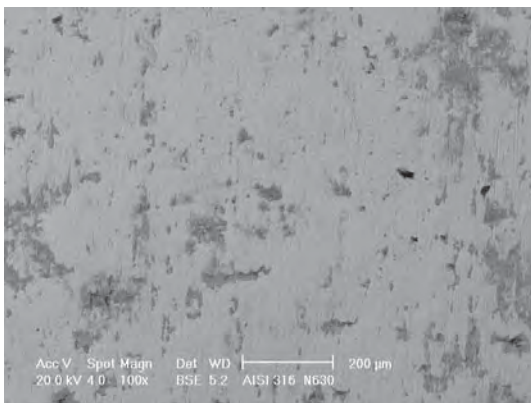
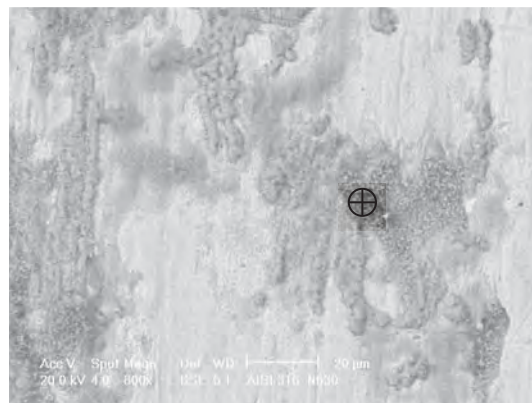


Figura 5.14. Micrografías SEM de la probeta sin tratamiento térmico (SE y BSE)

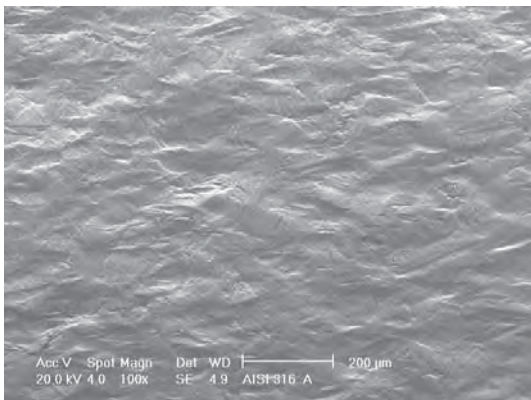


(a) 100x

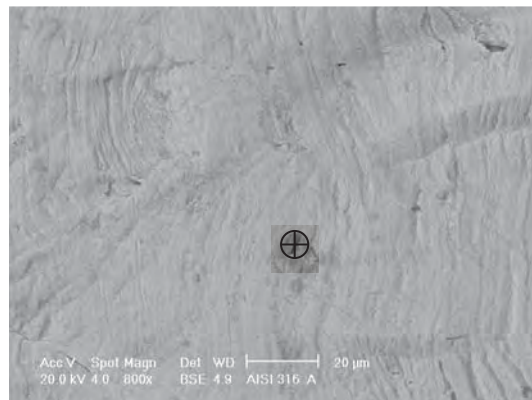


(b) 800x

Figura 5.15. Micrografías SEM de la probeta con tratamiento térmico convencional en mufla (SE y BSE)

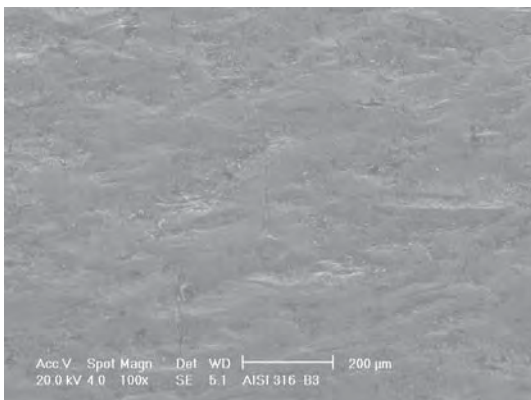


(a) 100x

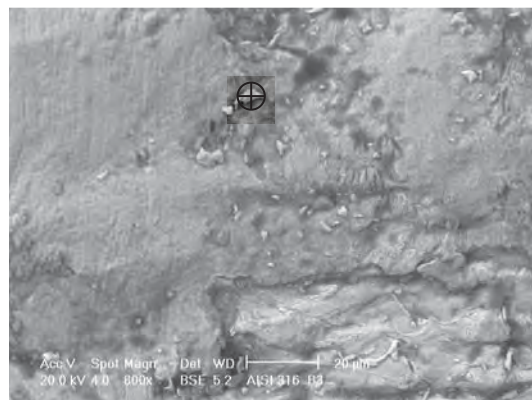


(b) 800x

Figura 5.16. Micrografías SEM de la probeta SA (SE y BSE)

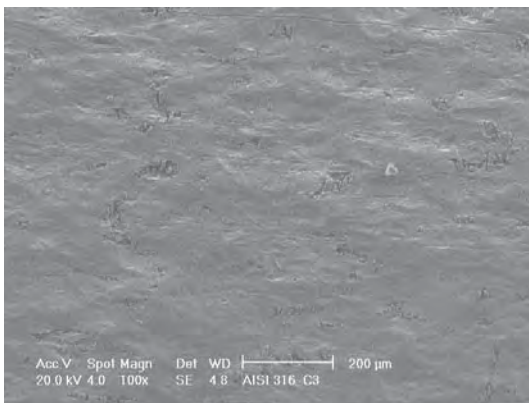


(a) 100x

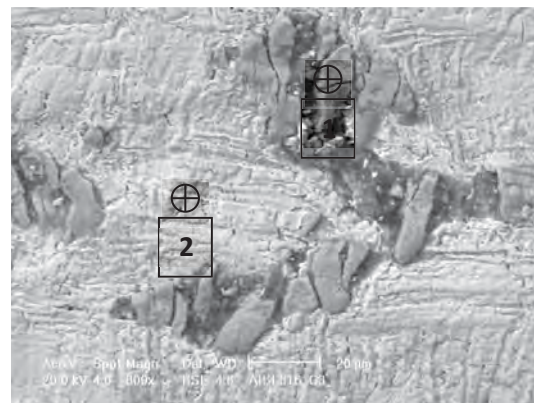


(b) 800x

Figura 5.17. Micrografías SEM de la probeta SB (SE y BSE)

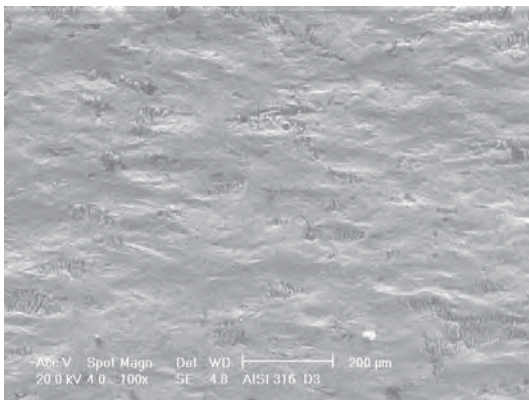


(a) 100x

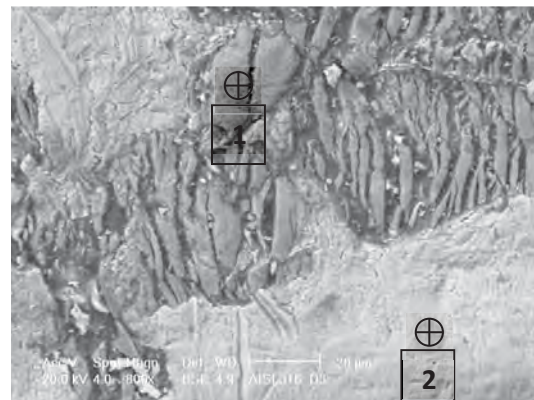


(b) 800x

Figura 5.18. Micrografías SEM de la probeta SC (SE y BSE)



(a) 100x



(b) 800x

Figura 5.19. Micrografías SEM de la probeta SD (SE y BSE)

Es notable en las micrografías que la probeta sin tratamientos en la figura 5.14, presentan una superficie homogénea y es posible observar que se trata de la misma fase. Estas micrografías también son desde luego útiles como marco comparativo, pues para una superficie limpia propia de los aceros inoxidable auténticos (i.e. el caso del AISI 316 empleado), cualquier cambio hará evidente algún fenómeno ocurrido.

Así pues, para la figura 5.15 existe ya una alteración. De manera superficial es notable una especie de “espuma” por la morfología aparente en la superficie, lo cual es indicio de un fenómeno ocurre con carácter somero y que no implica una transformación de fondo en toda la probeta. Es pensable entonces de inmediato en la aparición de un exceso de óxidos; y es que los aceros inoxidable desarrollan capas delgadas impermeables de óxidos de cromo que permiten mantener al material libre de degradaciones por corrosión, sin embargo estos óxidos son excesivos y por sus características se puede suponer a priori que se trata de óxidos de hierro y quizá de otros elementos constituyentes de la matriz del acero austenítico.

Posteriormente, para la figuras 5.16 y 5.17 correspondientes a las probetas A y B de manera respectiva, tienen inclusiones con forma de pequeños granos emergentes que comienzan a ser notables. Estos pequeños granos destacan la aparición de una nueva fase y ya que se encuentran característicamente

“embebidos”, esta aparición sugiere que el material ha tenido ya un fenómeno de alteración y que es posible la aparición de una fase que no estaba originalmente en el material. El caso es tanto más drástico para las figuras 5.18 y 5.19 correspondientes a las probetas SC y SD; en virtud de que formaciones particulares de tamaño considerable componen ya el material, con apariencia de “surgimientos rocosos” en la matriz, se trata para esta última descripción del desarrollo de una fase que surge de los elementos constituyentes propios del AISI 316 SS pero que en el material originalmente no posee en su estado de post-fabricación.

Dadas las características diferentes que recién se han descrito para las probetas, se presenta la conveniencia de realizar un análisis EDS, que permita reconocer los elementos constituyentes en las diferentes formaciones que presentan las probetas y también en el material sin tratamientos ni ensayos mecánicos para establecer nuevamente un criterio de comparación. En las figuras 5.15 a 5.19, se encuentran unas marcas circulares, que han sido los sitios donde se realizó este análisis.

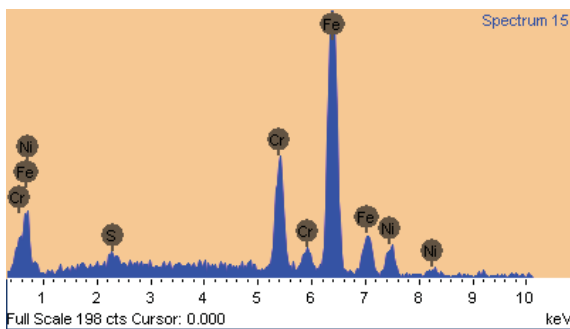


Figura 5.20. Análisis EDS sobre imagen de la figura 5.14(b)

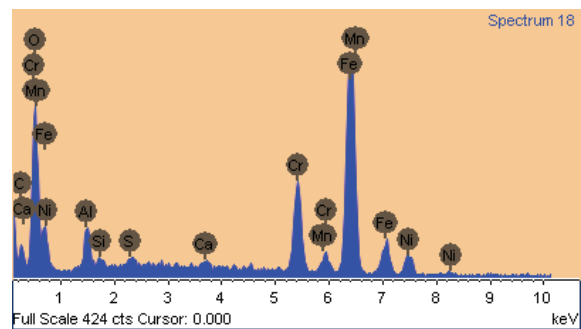


Figura 5.21. Análisis EDS sobre la marca de la figura 5.15(b)

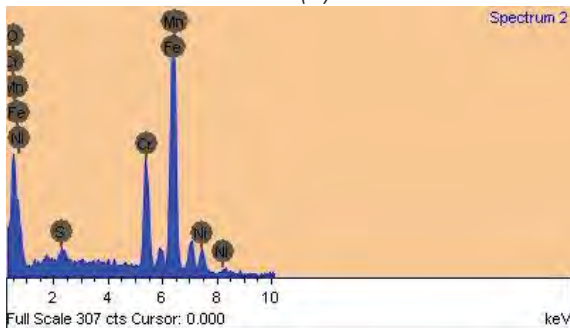


Figura 5.22. Análisis EDS sobre la marca de la figura 5.16(b)

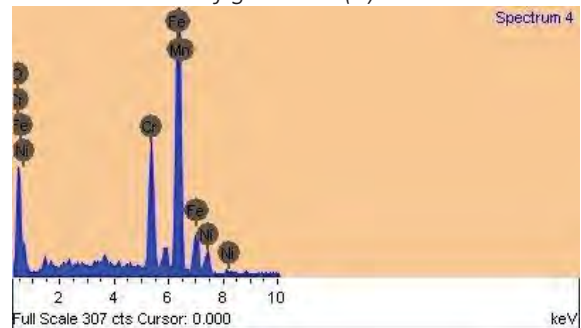


Figura 5.23. Análisis EDS sobre la marca de la figura 5.17(b)

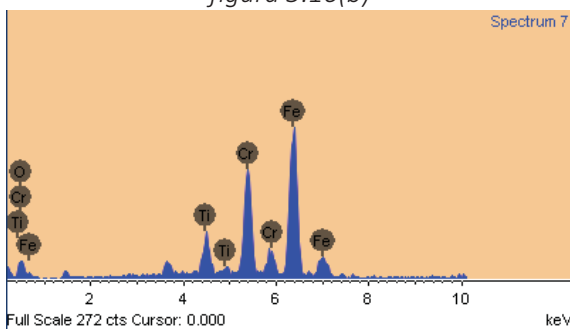


Figura 5.24. Análisis EDS sobre la marca 1 de la figura 5.18(b)

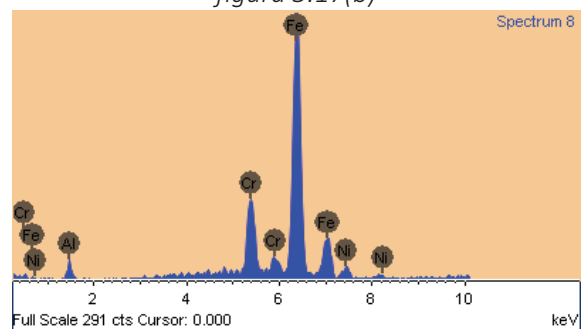


Figura 5.25. Análisis EDS sobre la marca 2 de la figura 5.18(b)

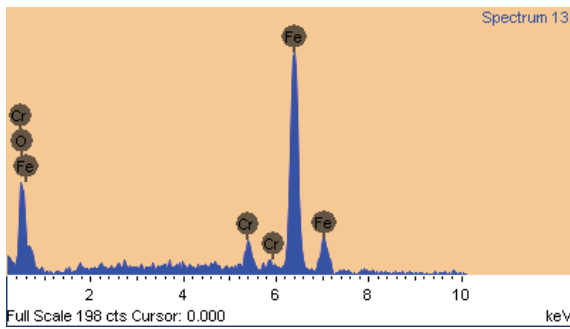


Figura 5.26. Análisis EDS sobre la marca 1 de la figura 5.19(b)

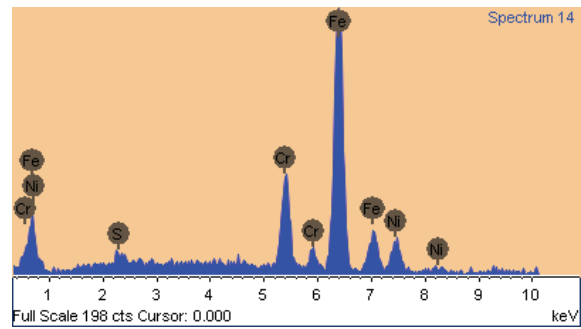


Figura 5.27. Análisis EDS sobre la marca 2 de la figura 5.19(b)

La figura 5.14(b) no posee marca como el resto de las micrografías electrónicas denotadas con la letra (b). La razón es que al observarse una superficie homogénea se consideró impropio realizar algún análisis EDS puntual. A partir de su análisis en la figura 5.20, se obtiene un apreciación general del acero AISI 316 SS, y como se esperaba, son aparentes los elementos Fe, Ni, Cr, y una pequeña cantidad de S; todos estos elementos constituyentes de este acero inoxidable. No es siquiera aparente O, de la capa que tiende a formarse en la superficie de estos aceros y que resulta ser el carácter protector de éstos.

Con respecto a la figura 5.21, es aparente una importante cantidad de oxígeno. Esta situación era esperada, y dado que el resto de los elementos continúan apareciendo en los mismos potenciales (keV), es posible reconocer que no existe dispersión alguna de elementos; esto implica al tiempo que aparentemente no hay otras fases desarrolladas: simplemente se generaron óxidos en la superficie del material.

Las figuras 5.22 y 5.23, no muestran una diferencia sustancial con respecto de la figura 5.20, a pesar de que los análisis EDS fueron puntuales. Es apenas aparente la generación de una fase que no estaba presente en la matriz original del acero inoxidable y por esta razón la imprecisión del apuntador para el realizar el análisis sobre alguno de los pequeños granos “embebidos”, puede estar detectando el resto de los materiales constituyentes alrededor. Se aprecia la aparición de la fase que era inexistente, sin embargo, no es posible detectar con este instrumento elementos con certeza en este par de probetas.

Las figuras 5.24 y 5.25 pertenecen a los análisis realizados sobre las marcas 1 y 2 que aparecen en la figura 5.18; y a su vez, las figuras 5.25 y 5.26 son referentes a los análisis sobre las marcas 1 y 2 de la figura 5.19. En ambos casos de forma respectiva. Es evidente la aparición de un fenómeno de transformación alotrópica en la matriz del AISI 316 SS, y por esta razón se hace un análisis EDS tanto dentro de las superficies homogéneas como en las zonas que aparentan tener “surgimientos rocosos”.

Estos últimos están en ambas micrografías electrónicas marcados con el número 1, y el resto de la superficie con la marca del número 2. La diferencia principal, como una situación que ocurre para ambas probetas de igual manera, es la ausencia de Ni en el análisis dentro de las marcas 1; lo cual indica claramente la migración de este elemento y entonces la imposibilidad de retener la austenita a temperatura ambiente en estas regiones de las probetas, situación de gran interés y que será trascendental para el comportamiento posterior del material, pues la austenita que se requiere por ser la fase de mayor resistencia a la corrosión en los aceros austeníticos ha desaparecido en algunas zonas debido a la transformación alotrópica. Al tiempo de que las regiones están completamente disminuidas en el % de Ni, solo queda hierro con cierto contenido de Cr donde se puede concluir que hay una migración de Cr hacia el interior de la fase aparente, en virtud de que el Cr parece presentarse enriqueciendo esta región en la probeta C y D (aunque aparentemente menor en ésta última). El fenómeno indica migración de estos elementos Ni y Cr, y hasta donde se presenta claro el resultado, imperantemente el Ni se ausenta de la fase. Esto es consistente con los argumentos de Hsieh et al. (2008). A juzgar por las marcas con número dos en ambas micrografías electrónicas de estas probetas, en las figuras 5.25 y 5.27 respectivas a las probetas SC y SD, el resto de la región continúa con los elementos de manera consistente con el material en estado original de post-fabricación y puede pensarse que aun se trata de austenita. Nuevamente, la investigación de Saeidi et al. (2015) sugieren un fenómeno en el que se obtiene ferrita- δ , sin embargo, llama la atención particularmente que esto se ha conseguido a temperaturas alrededor de 630 °C, mucho menor a la temperatura de 1100 °C que reportan los mismos investigadores. Este último aspecto llama la atención al indicar una contribución importante de la fracción UV del espectro de la irradiación solar en cuanto a la ocurrencia del fenómeno alotrópico expuesto.

Otras situaciones muy particulares a los fenómenos ocurridos son los que presentan la figura 5.28, misma que muestra el porcentaje atómico de Cr, Fe, O, Ni frente a la temperatura máxima en ciclo térmico sobre la superficie para cada muestra. Esta figura se elaboró a partir del análisis EDS sobre la superficie general de cada muestra.

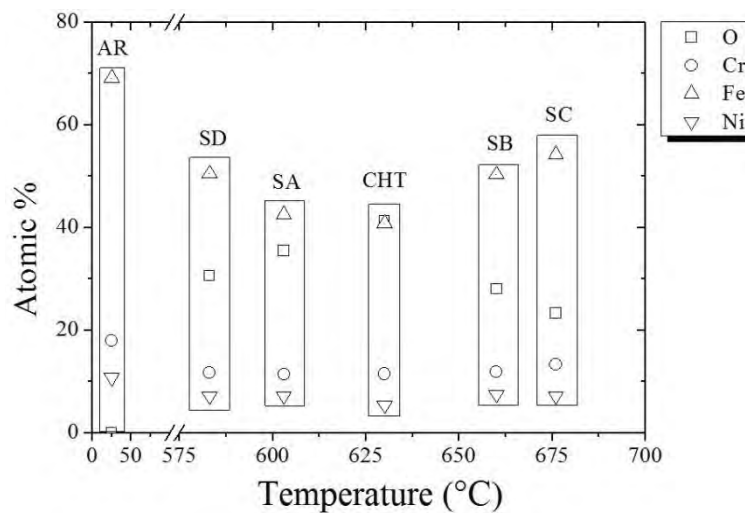


Figura 5.28. Cambio en % atómico de Cr, Fe, O, Ni frente a la temperatura máxima en ciclado térmico en el HoSIER

La figura 5.28 (AR) muestra entonces el porcentaje atómico no afectado de elementos en AISI 316 SS, pues corresponde a la probeta sin tratamiento. Un cambio en la superficie se muestra sobre la probeta con tratamiento térmico por método convencional en mufla en la figura 5.28 (CHT) que revela un contenido de oxígeno en el análisis mediante EDS; es posible concluir que ocurre una oxidación simple con base en lo recientemente expuesto y aquí confirma el mayor porcentaje atómico de oxígeno.

Basándose en la figura 5.28 para todas las probetas expuestas a ISC, se observa un mayor contenido de Fe en la superficie con respecto a la probeta con tratamiento térmico en mufla; al mismo tiempo también se muestra que a temperaturas más altas en la experimentación con ISC, los especímenes no son susceptibles de sufrir oxidación adicional. Este aspecto plantea una investigación más profunda, pues era esperado que a mayor temperatura el material fuese más susceptible de obtener una oxidación superficial más acentuada.

Puesto que el porcentaje atómico superficial de Cr y de Ni no cambia para las probetas tratadas con ISC si se compara con para la probeta con tratamiento térmico convencional, pero el análisis puntual de EDS revela un contenido de Cr más alto y Ni más bajo en las fases visibles dispersas (con forma de “surgimiento rocoso”) para las probetas expuestas a ISC es posible argumentar lo siguiente. Reiterando, el Ni es empleado para retener la austenita en los aceros inoxidable de la serie 300, hay entonces un cambio de fase en las zonas, donde sólo se encuentra Fe, Cr y un bajo contenido de Mn (Yajiang et al. 2002). Por lo tanto, las probetas expuestas a ISC experimentaron una transformación de fase caracterizada por zonas con un enriquecimiento de Cr, y reducción de Ni como se describen Hsieh et al. (2008). Todos estos aspectos proporcionan la posibilidad de δ -ferrita en la fase dispersada.

Análisis mediante la técnica de difracción de rayos X.

Para cada una de las probetas se realizó un análisis por difracción de rayos X, de manera que se pudiera revelar la existencia y aparición de cualquier fase cristalina en el material. Esta parte del análisis de resultados en las probetas tiene la finalidad de investigar las afectaciones que ocurren por efecto de la exposición a la irradiación solar concentrada de las probetas. Esta difracción se realizó con el difractómetro Rikagu® DMAX 2200 X-ray de ánodo de Cu (radiación $\text{Cu } K\alpha$). Para cada muestra, el análisis se realizó con un haz de rayos X ($2\theta/\theta$) penetrante y un haz con un ángulo de 0.5° (incidencia rasante), con una velocidad de 2° por minuto, comenzando en 5° y terminando en 78° . Todos los ángulos de difracción se compararon con la base de datos del Joint Committee for Powder Diffraction Standards (JCPDS) para identificar las fases; JCPDS 330397-316 SS, JCPDS FeCr 340396, JCPDS 330664 - Fe_2O_3 .

Será evidente la aparición de una nueva fase mediante la comparación de los difractogramas de cada una de las probetas expuestas a los ciclos ISC con la probeta que se trató térmicamente a 630°C en una mufla convencional y la que no recibió tratamiento alguno. La comparación visual entre los difractogramas permite concluir al respecto de las consecuencias de los ensayos de ciclos de ISC, ya que en la diversidad de ángulos se encuentran los “picos” debidos a la reflexión que existe de la radiación X, con base en el material cristalino encontrado.

Mediante la realización de la difracción de rayos X, existe una singularidad presente en cada muestra tratada por el ISC: en un ángulo donde se observa el pico de difracción de rayos X para el acero inoxidable AISI 316 convencional (ferrita- γ), está presente una fase (pico contiguo) que originalmente no compone el carácter austenítico, identificada como ferrita- δ (aunque semejante a la cromoferrita con base en la investigación de Sokolv et al. (2009)) con una importante riqueza de cromo, mediante la base de datos de materiales del software del difractómetro de rayos X Rikagu® DMAX 2200, realizando el mejor ajuste manual y automático. Esta fase en la matriz original de AISI 316 SS se obtiene en cada muestra expuesta debido a los ciclos foto-térmicos realizados, y se puede concluir por consiguiente que la fracción UV en el espectro solar es responsable de su formación. Las probetas sin tratamiento térmico y la probeta tratada térmicamente en la exposición en mufla (método convencional (en este capítulo denominadas “AR” y “CHT”, respectivamente, debido a su identificación en los software)), no presentan esta fase. Además, se puede concluir que las anteriores, en comparación con las probetas A, B, C y D, a con un ángulo mayor que 43.64° (es decir, un ángulo de 44.72° aproximadamente), se obtiene la formación de la ferrita- δ debido al experimento del ciclado con ISC.

Los hallazgos de Brooks et al. (1991), Padilha et al. (2013) y Hsieh et al. (2008) han demostrado la formación de δ -ferrita, particularmente en varios procesos de soldadura por arco, soldadura por láser y moldeo por fusión; vinculado a fenómenos de solidificación a velocidades generalmente altas, que causan la formación de dendritas. En esta investigación, aunque no se alcanzan las condiciones de fusión, se considera que la radiación solar puede causar procesos de difusión de suficiente magnitud para lograr la formación de δ -ferrita, como se muestra en los difractogramas de las muestras tratadas, lo que no ocurre con la probeta CHT. Se muestra en los diagramas ternarios de Bechtoldt y Vacher (1957) que en la temperatura de hasta 815.5 °C para el sistema Fe-Ni-Cr-Mo, la ferrita- δ no es un componente de fase notable de la solución sólida para acero inoxidable AISI 316. Por lo tanto, se puede afirmar que una posible explicación para la aparición de ferrita- δ es la acción de la irradiación solar y, en particular, del componente UV, que es el componente que no se presenta en el calentamiento convencional en el horno de mufla eléctrico. Además, Vacher y Bechtoldt (1954) encontraron una tendencia de sus aceros investigados para nuclear δ -ferrita en los sitios δ existentes, y declaran que la formación de δ -ferrita se continúa por difusión; por lo tanto, se sugiere que la nueva ferrita- δ podría iniciarse en la superficie donde la radiación UV tiene incidencia, pero luego continúa por difusión como se encuentra en la siguiente descripción. Otros fenómenos con una mejora característica, pueden asociarse con la investigación de Herranz y Rodríguez (2010), en la que se explica que el uso de la radiación solar ha permitido diversos procesos como la nitruración con sales, la sinterización de polvos metálicos e incluso en la fabricación de componentes cerámicos; tiempos de proceso y temperaturas significativamente reducidas debido a un fenómeno observado denominado *foto-activación*. Esto también se puede explicar por la presencia de este componente de la radiación solar. El Nayal y Beech (1986) argumentan que la δ -ferrita se puede formar a partir de soluciones sólidas de alta o baja relación Cr_{Eq}/Ni_{Eq} , ya que la transformación de esta fase se puede lograr dependiendo de la velocidad de enfriamiento; en el caso de ésta investigación, se obtuvieron diferentes velocidades de enfriamiento y calentamiento en los ciclos de exposición al CSI; sin embargo Padilha et al. (2013) concluye que la aparición de la fase δ está más influenciada por la composición de la solución sólida que por la velocidad de enfriamiento. Según el diagrama de Schaeffler y las expresiones presentadas por El Nayal y Beech (1986), el Cr_{Eq}/Ni_{Eq} calculado es ~ 1.44 , que se considera una relación baja según los mismos autores, además de que existe una cantidad inicial de 5% ferrita- δ .

Para la probeta A, no hay "segundo pico", pero es evidente la formación inicial de un pico en este mismo ángulo. Para los especímenes B y D, es evidente el "segundo pico" de la fase ferrita- δ . Por último, para la muestra C, la formación de la fase ferrita- δ indica una cantidad que está presente en mayores proporciones en comparación con la fases originales y típicas presentes en AISI 316 SS. La

diferencia entre una incidencia de haz rasante y un haz penetrante es que para el haz penetrante, la magnitud de cada pico es menor debido a las propiedades de absorción del material en el espectro de rayos X; para eliminar redundancias solamente se muestran las difractometrías penetrantes $2\theta/\theta$ como figuras de conjuntos de difractometrías. Estas mismas permiten hacer una comparativa evidente con base en los resultados. Comenzando con la figura 5.29, se presentan los difractogramas obtenidos, iniciando con la probeta correspondiente al AISI 316 SS que no recibió tratamiento térmico alguno; así como la probeta con tratamiento térmico convencional en mufla a 630 °C. La figura 5.30 muestra los difractogramas de las probetas A, B, C y D.

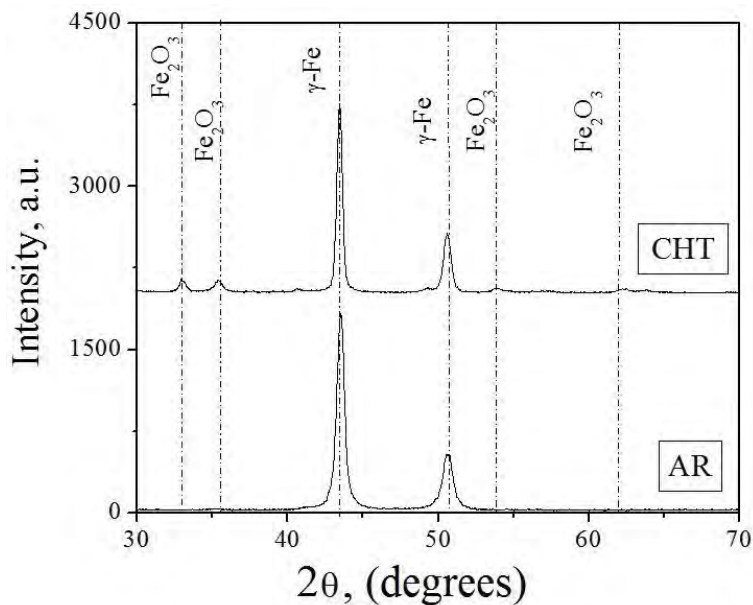


Figure 5.29. Difractograma del acero inoxidable AISI 316 sin tratamiento térmico (AR), y difractograma de la probeta con tratamiento térmico convencional en mufla a 630 °C (CHT), haz penetrante.

En la probeta sin tratamiento térmico presentada en la figura 5.29(AR) existe un pico de punta simple en el ángulo de 43.64° que revela la fase austenítica original del AISI 316, ferrita- γ . El resto de los picos correspondientes que aparecen en la composición son constituyentes originales de la matriz en una proporción menor. En el segundo caso de comparación, la figura 5.29(CHT) corresponde a la probeta con tratamiento térmico por calentamiento uniforme a 630 °C con una duración de 1 200 segundos. Esta probeta fue planteada para obtener un tratamiento térmico convencional en mufla a la temperatura semejante máxima de las temperaturas de los experimentos en el HoSIER, en el caso de un sobrecalentamiento y en la sección frontal de la probeta. Como característica principal se observa un pico de punta simple en la zona del hierro (aproximadamente en 43.64°), en este sentido puede ser

demostrado que la temperatura y la radiación infrarroja no causan una transformación cristalina en el material. Comparando estos difractogramas con los aceros inoxidable austeníticos en estado de post-fabricación y con su AISI 316L precalcinado, presentados por Sokolv et al. (2009); es posible concluir que no existe una diferencia significativa sobre el material en estado original.

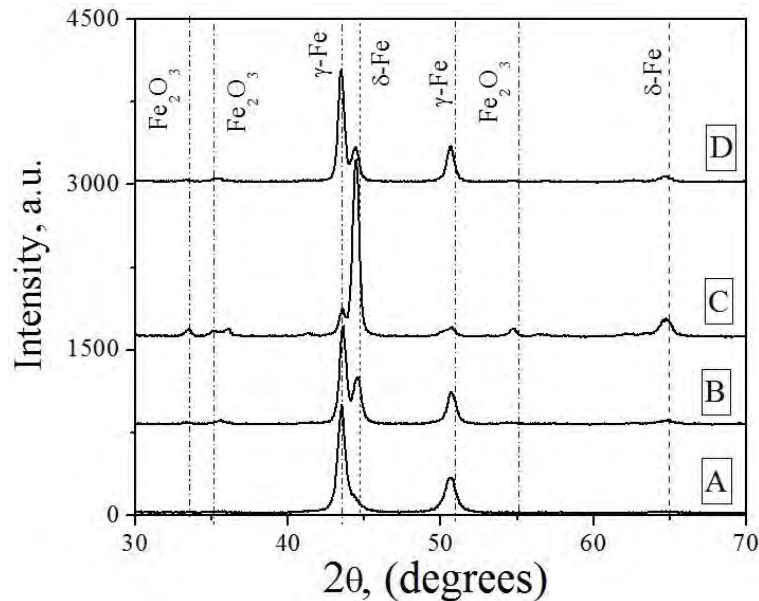


Figura 5.30. Difractogramas de las probetas A, B, C y D respectivamente, en orden ascendente, haz penetrante (JCPDS 330397-316 SS, JCPDS FeCr 340396, JCPDS 330664- Fe₂O₃)

Para la probeta A (figura 5.30 A), existe una notable diferencia; en el lado derecho del pico que se forma cerca de los 44°, se encuentra la formación de un “hombro” lateral derecho. Esta nueva formación que no conforma una segunda punta para este pico pero que indica la formación de uno, es definida como una composición de ferrita-δ. Esta formación inicial de un nuevo pico corresponde a una fase con sus propias características cristalinas pero aparentemente, con base en las pruebas mecánicas realizadas, no afecta la resistencia del material demostrable mediante un ensayo de tracción. Para la probeta B (figuras 5.30 B) es evidente la formación de una segunda punta a la derecha del pico de hierro a los 43.64°. Esta nueva punta corresponde a ferrita-δ, implica que se encuentra la formación de una nueva fase cristalina en la matriz del acero inoxidable AISI 316, cuyo índice de Miller es de (1 1 0). Una notable característica puede ser encontrada comparando a la probeta A con la B; esta nueva fase comienza a formarse y crece. Dado que para la probeta sin tratamiento y la de tratamiento térmico convencional en la figura 5.29 esta segunda punta no está presente, puede ser concluido que el factor

responsable de esta nueva formación es la fracción ultravioleta de la ISC en el espectro solar de la irradiación terrestre.

Para la probeta C (figura 5.30 C) la característica de la formación de la nueva fase cristalina de ferrita- δ cristalina revela una punta en el pico que corresponde incluso a una mayor intensidad que el pico correspondiente a hierro- γ a los 43.64° . Esta característica implica que la fracción ultravioleta tiene la facultad de transformar alotrópicamente el hierro contenido en la matriz original del acero inoxidable AISI 316, generando una nueva fase cristalina con la disminución de níquel y enriquecida en cromo. Se argumenta que esta nueva fase consiste en un material cristalino en la matriz del acero inoxidable, que no tiene la facultad de alterar las propiedades mecánicas del material, pues ya se ha hecho evidente que al estar presente en incluso en mayor proporción que el hierro- δ , no ocasiona cambios sustanciales en el comportamiento mecánico. Finalmente, para la probeta D (figura 5.30 D) se observa nuevamente la formación de la punta secundaria a la derecha del ángulo de 43.64° .

Capítulo 6. Conclusiones.

Se modeló y realizó un experimento de ciclado foto-térmico en probetas de AISI 316 SS usando el HoSIER ubicado en la UNAM en la ciudad de Temixco, Morelos, México. Las probetas propuestas para este estudio tenían las mismas dimensiones que los tubos cilíndricos utilizados como elementos de irradiación solar concentrada en los receptores de los sistemas de torres centrales. Con base en los experimentos realizados y los análisis mecánicos, de OM y SEM y EDXS, y los estudios de difracción de rayos X realizados después de los experimentos, se pueden destacar las siguientes conclusiones:

Conclusiones sobre el desarrollo y solución del modelo numérico (simulación):

- a) Al desarrollar las simulaciones, fue posible establecer las condiciones que se llevarían a cabo en el procedimiento experimental. Con base en esto se determinó que mantener las condiciones de esfuerzo termo-mecánico por debajo del esfuerzo de fractura a una temperatura dada, no se existe incidencia en el inicio de una fractura en la geometría de las probetas; se determinaron entonces condiciones experimentales en el HoSIER “no-destructivas”.
- b) La simulación desarrollada, empleando COMSOL MULTIPHYSICS®, obtuvo el perfil de temperatura debidamente, de acuerdo con los resultados experimentales y justo antes de que apareciesen óxidos superficiales en las probetas distintos a los óxidos de cromo iniciales propios de los aceros inoxidable. En este sentido, las simulaciones son útiles para desarrollar un diseño experimental.
- c) No hay implementaciones del procedimiento experimental para validar los resultados numéricos de las tensiones termo-mecánicas, pero se ha demostrado que cuando se mantenga el rango de temperatura sobre todas las muestras metálicas, no habrá altas tensiones que comprometan la resistencia mecánica y geométrica. Así pues se mantiene la integridad de las muestras y es posible el posterior análisis mecánico, teniendo en cuenta las condiciones de la simulación y que se reproducirán en el experimento.
- d) Justo antes de que ocurran los óxidos superficiales, los campos térmicos modelados basados en las condiciones de termo-radiativas corresponden a los resultados experimentales.

Conclusiones sobre la evaluación mecánica de prueba a la tracción de las probetas:

- a) No hay evidencia de cambios relevantes en las propiedades mecánicas de tracción debido a la cantidad de ciclos foto-térmicos aplicados a las muestras. Por lo tanto, la degradación causada por fatiga fototérmica no ocurre si el número de ciclos es bajo en comparación con la duración

y el número de ciclos en la vida operativa de un receptor de torre central solar. Estas propiedades mecánicas a la tracción no se ven afectadas por la aparición de ferrita- δ , si se realiza un número de ciclos bajo. Para otras condiciones mecánicas de esfuerzo aplicado, será necesario llevar a cabo las pruebas correspondientes.

Conclusiones sobre la evaluaciones metalúrgicas de las probetas:

- a) Una fase desarrollada identificada como ferrita- δ cristalina, se forma en la matriz del AISI 316 SS. Se encontró que la fase estaba presente por análisis de OM y por la técnica de difracción de rayos X y, como elementos constitutivos, se confirmaron Fe y Cr por análisis EDS. El alto contenido de porcentaje atómico de Fe sobre la superficie con respecto a la muestra de CHT proporciona una primera idea de la presencia de la fase ferrita- δ .
- b) La fase cristalina ferrita- δ está presente en las muestras tratadas con CSI -en la que influye la fracción UV del espectro solar- y la temperatura obtenida en ese momento; sin embargo, esta fase no aparece en el mismo material cuando no se realiza ningún tratamiento o cuando se le aplican tratamientos térmicos convencionales a una temperatura media similar. Por lo tanto, el CSI denota la posibilidad de modificar las fases cristalinas de AISI 316 SS a temperaturas cercanas a 630 °C, lo que nos permite sugerir que la fracción UV del espectro solar tiene una influencia como un activador de transformaciones de fase
- c) A las temperaturas más altas para los experimentos llevados a cabo, la oxidación mostró un comportamiento inhibido; dando lugar a una situación particular donde se esperarí una oxidación más factible.
- d) Se sugiere realizar una investigación adicional como una serie de pruebas de corrosión electroquímica para determinar si la nueva fase formada en la matriz original AISI 316 SS tiene un efecto sobre el comportamiento a la corrosión de estos materiales.

6.1. Trabajos a futuro.

Con base en incrementar el conocimiento que se tiene sobre las transformaciones que existen en las probetas con geometría definida de acero inoxidable austenítico denominado AISI 316, se enuncian las siguientes recomendaciones:

1. Debido a que durante la ejecución de los experimentos no se determinó la potencia de UV, y que la magnitud de ésta misma es variable de un día a otro; es recomendable determinar la potencia del UV que logra la transformación de fase en el acero austenítico AISI-316 utilizado.
2. Se recomienda un estudio de corrosión electro-químico de manera que se posible determinar si la nueva fase formada a partir de los elementos presentes en la matriz original de este acero

tiene un comportamiento diferente frente a los agentes corrosivos que tienen lugar en la operación de los receptores de los sistemas de concentración de tipo torre central.

3. El Ni, es utilizado como elemento de retención de la austenita en los aceros inoxidable, por esta razón una cantidad importante de Ni se agrega para lograr ferrita- γ . Al migrar este elemento de ciertas zonas de las probetas, ocurre una transformación a ferrita- δ como ya se ha expuesto, un estudio electroquímico es recomendado para valorar esta resistencia a la corrosión originalmente propia y buscada en los aceros inoxidable, entre los que son los austeníticos los que presentan esta propiedad de manera más acentuada.

Referencias

1. V. Verlotski, M. Schaus, M. Pohl: Solar thermal MgO-powder receiver with working temperatures of more than 1600°C: Model investigation by using a laser as an irradiation source. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 45, 227-239 (1997)
2. N. Boerema, G. Morrison, R. Taylor, G. Rosengarten: Liquid sodium versus Hitec as a heat transfer fluid in solar thermal central receiver systems. *Solar Energy* 86, 2293–2305 (2012)
3. Boubault, B. Claudet, O. Faugeron, G. Olalde: Aging of solar absorber materials under highly concentrated solar fluxes, *Solar Energy Materials y Solar Cells* 123, p 211-219 (2014)
4. G. Augsburg, D. Favrat: Modelling of the receiver transient flux distribution due to cloud passages on a solar tower thermal power plant, *Solar Energy* 87, p 42–52 (2013)
5. W. J. Evans, J. E. Screech, S. J. Williams: Thermo-mechanical fatigue and fracture of INCO718. *International Journal of Fatigue* 30, 257–267 (2008)
6. M. E. Fine, Y. Chung, *Fatigue Failure in Metals*, ASM Handbook Vol. 19 Fatigue and Fracture, 8th ed, ASM International Handbook Committee, The Materials Information Company (United States of America), ASM International, 1996, p 148-149
7. Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright. *Ciencia e Ingeniería de materiales*. Cengage Learning (2012).
8. J. Sjöström, J. Bergström: Thermal fatigue testing of chromium martensitic hot-work tool steel after different austenitizing treatments. *Journal of Materials Processing Technology* 153–154, p 1089–1096 (2004)
9. Y. Han, E. Yu, H. Zhang, D. Huang: Numerical analysis on the medium-frequency induction heat treatment of welded pipe. *Applied Thermal Engineering* 51, p 212 – 217 (2013)
10. J. Xu, S. Reuter, W. Rothkegel: Tensile and bending thermo-mechanical fatigue testing on cylindrical and flat specimens of CMSX-4 for design of turbine blades. *International Journal of Fatigue* 30, 363–371 (2008)
11. K. Prasad, V. Kumar: Temperature gradients in flat thermomechanical fatigue specimens, *Applied Thermal Engineering* 59, p 131-133 (2013)
12. D. Klobčar, J. Tušek, B. Taljat: Thermal fatigue of materials for die-casting tooling, *Materials Science and Engineering* 472, p 198–207 (2008)
13. S. Sinaie, A. Heidarpour, X.L. Zhao: Mechanical properties of cyclically-damaged structural mild steel at elevated temperatures. *Construction and Building Materials* 52, p 465–472 (2014)

14. G. F. Abdelal, A. Atef: Thermal fatigue analysis of solar panel structure for micro-satellite applications, *International Journal of Mechanics and Materials in Design* 4, p 53-62 (2008)
15. G. Herranz, G.P. Rodríguez, *Uses of Concentrated Solar Energy in Materials Science*, Edited by: Radu D. Rugescu. INTECH, 2010, Croatia
16. G. Flamant, A. Ferriere, D. Laplaze, C. Monty: Solar processing materials: opportunities and new frontiers. *Solar Energy* 66, p 117-132 (1999)
17. Ferriere, C. Sanchez Bautista, G.P. Rodriguez, A.J. Vazquez: Corrosion resistance of stainless steel coatings elaborated by solar cladding process. *Solar Energy* 80, p 1338–1343 (2006)
18. Y. Yang, A.A. Torrance, J. Rodriguez: The solar hardening of steels: Experiments and predictions. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 40, p 103-121 (1996)
19. G.P. Rodríguez, J.J. de Damborenea, A.J. Vázquez: Surface hardening of steel in a solar furnace. *Surface and Coatings Technology* 92, p 165-170 (1997)
20. C. Sánchez Bautista, G.P. Rodríguez, A. Ferriere: Numerical modelling of the solar cladding process. *Surface y Coatings Technology* 202, 1594–1605 (2008)
21. G. Herranz, A. Romero, V. de Castro, G.P. Rodríguez: Development of high speed steel sintered using concentrated solar energy. *Journal of Materials Processing Technology* 213, p 2065– 2073 (2013)
22. M. A. Irfan, W. Chapman W: Thermal stresses in radiant tubes due to axial, circumferential and radial temperature distributions. *Applied Thermal Engineering* 29, 1913–1920 (2009)
23. N. Boerema, G. Morrison, R. Taylor, G. Rosengarten: Liquid sodium versus Hitec as a heat transfer fluid in solar thermal central receiver systems. *Solar Energy* 86, 2293–2305 (2012)
24. Çengel Y.A., Cimbala J.M.: *Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones*. 2° Edición. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. (2006)
25. M. Farooq, I. A. Raja: Optimization of metal sputtered and electroplated substrates for solar selective coatings. *Renewable Energy* 33, p 1275–1285 (2008)
26. H. Cui, Y. Xing, Y. Guo, Z. Wang, X. Yuan: Numerical simulation and experiment investigation on unit heat exchange tube for solar heat receiver. *Solar Energy* 82, 1229–1234 (2008)
27. L. Jianfeng, D. Jing, Y. Jianping, Heat transfer performance of an external receiver pipe under unilateral concentrated solar radiation, *Solar Energy* 84, 1879–1887 (2010)
28. V. Verlotski, M. Schaus, M. Pohl: Solar thermal MgO-powder receiver with working temperatures of more than 1600°C: Model investigation by using a laser as an irradiation source. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 45, 227-239 (1997)

29. D. Riveros-Rosas D, J. Herrera-Vázquez, C.A. Pérez-Rábago, C. A. Arancibia-Bulnes, S. Vázquez-Montiel, M. Sánchez-González, F. Granados-Agustín, O.A. Jaramillo, C.A. Estrada: Optical design of a high radiative flux solar furnace for Mexico. *Solar Energy* 84, 792–800 (2010)
30. Q. Zhang, X. Li, C. Chang, Z. Wang, H. Liu, An experimental study: Thermal performance of molten salt cavity Receivers, *Applied Thermal Engineering* 50, p 334-341 (2013)
31. J. Codrington, P. Nguyen, S. Y. Ho , A. Kotousov: Induction heating apparatus for high temperature testing of thermo-mechanical properties. *Applied Thermal Engineering* 29, 2783–2789 (2009)
32. B. Boubault, B. Claudet, O. Faugeroux, G. Olalde, J. Serra: A numerical thermal approach to study the accelerated aging of a solar absorber material, *Solar Energy* 86, p 3153–3167 (2012)
33. A. Rojas-Morin, J. Fernandez-Reche: Estimate of thermal fatigue lifetime for the INCONEL 625LCF plate while exposed to concentrated solar radiation, *Revista de Metalurgia* 47, p 112–125 (2011)
34. M.R. Rodríguez-Sánchez, A. Soria-Verdugo, J. A. Almendros-Ibáñez, A. Acosta-Iborra A., D. Santana D: Thermal design guidelines of solar power towers. *Applied Thermal Engineering* 63, 428-438 (2014)
35. L. Jianfeng, D. Jing: Heat transfer performance of an external receiver pipe under unilateral concentrated solar radiation. *Solar Energy* 84, 1879–1887 (2010)
36. F. Wang, Y. Shuai, Y. Yuan, G. Yang, H. Tan: Thermal stress analysis of eccentric tube receiver using concentrated solar radiation. *Solar Energy* 84, 1809–1815 (2010)
37. F. Wang, Y. Shuai, Y. Yuan, B. Liu: Effects of material selection on the thermal stresses of tube receiver under concentrated solar irradiation. *Materials and Design* 33, 284–291 (2012)
38. G. E. Dieter: Mathematical Expressions for the Flow Curve, *Mechanical Behavior Under Tensile and Compressive Loads*, ASM Handbook Vol. 8 Mechanical Testing and Evaluation, 10th ed, ASM International Handbook Committee, The Materials Information Company (United States of America), ASM International, p 247-248, 2000
39. K.P. Sabin, J. Siju, C.B. Harish: Control of thermal emittance of stainless steel using sputtered tungsten thin films for solar thermal power applications. *Solar Energy Materials y Solar Cells* 133, 1–7 (2015)
40. C. K. Ho, B. D. Iverson: Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, p 835–846 (2014)
41. W.J. Evans, J.E. Screech, S.J. Williams: Thermo-mechanical fatigue and fracture of INCO718. *International Journal of Fatigue* 30, 257–267 (2008)

42. K. Saeidi, X. Gao, F. Lofaj, L. Kvetková, Z.J. Shen: Transformation of austenite to duplex austenite-ferrite assembly in annealed stainless steel 316L consolidated by laser melting, *Journal of Alloys and Compounds* 633, p. 463-469 (2015)
43. Chih-Chun Hsieh, Dong-Yih Lin, Ming-Che Chen, Weite Wu. Precipitation and strengthening behavior of massive δ -ferrite in dissimilar stainless steels during massive phase transformation. *Materials Science and Engineering A* 477, p. 328–333 (2008)
44. Sergey Sokolov, Erik Ortel, Jörg Radnik, Ralph Kraehner. Influence of steel composition and pre-treatment conditions on morphology and microstructure of TiO_2 mesoporous layers produced by dip coating on steel substrates. *Thin Solid Films* 518, p. 27–35 (2009)
45. Vander Voort G.F. "Metallography Principles and Practice". ASM International. The Materials Information Society. 1 Title, pp. 648. United States of America. ISBN-13: 978-0-87170-672-0, ISBN-10: 0-87170-672-5. 1999.
46. Bechtoldt C. J., Vacher H.C. Phase-Diagram Study of Alloys in the Iron-Chromium-Molybdenum-Nickel System. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 58, p. 7-19 (1957)
47. Brooks J.A., Baskes M.I., Greulich F.A. Solidification Modeling and Solid-State Transformations in High-Energy Density Stainless Steel Welds. *Metallurgical Transactions A* 22, p. 915-926 (1991)
48. El Nayal G., Beech J. Relationship between composition, impurity content, cooling rate, and solidification in austenitic stainless steels. *Materials Science and Technology* 2, p. 603-610 (1986)
49. Padilha A.F., Tavares C.F., Marcelo Aquino Martorano M.A. Delta Ferrite Formation in Austenitic Stainless Steel Castings. *Materials Science Forum* p. 730-732 (2013)
50. Vacher, H.C., Bechtoldt, C. J. Delta Ferrite-Austenite Reactions and the Formation of Carbide, Sigma, and Chi Phases in 18 Chromium-8 Nickel-3.5 Molybdenum Steels. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 53, p. 67-76 (1954)
51. Yajiang, L.I., Juan, W., Bing, Z. Tao, F. XRD and TEM analysis of microstructure in the welding zone of 9Cr-1Mo-V-Nb heat-resisting steel. *Bulletin of Materials Science* 25, p. 213-217 (2002)
52. Alvarez, B. O. Modelo numérico de transferencia de calor para fundido de aluminio mediante alta concentración solar (Tesis de maestría). Base de datos Universidad Nacional Autónoma de México (No. 001-01178-A1-2011)
53. Perez-Enciso, R., Riveros-Rosas, D., Sanchez, M., Pérez-Rabago, C. A., Arancibia-Bulnes, C. A., Romero-Paredes, H., & Estrada, C. A. (2014). Three-dimensional analysis of solar radiation distribution at the focal zone of the solar furnace of IER_UNAM. *Energy Procedia*, 57, 3031-3040.

54. Perez Enciso R.A. (2015). Caracterización óptica y térmica del horno solar del IER (Tesis de doctorado). Base de datos Universidad Nacional Autónoma de México (No.)

Apéndice A. Modelo del receptor cilíndrico de superficie externa con diámetro de 12.7 mm, para el software SolTrace® de NREL®

En este apéndice se insertan las imágenes de la programación de un receptor de geometría cilíndrica, de 12.7 mm de diámetro, para la posterior ejecución de la simulación de Perez-Enciso et al. (2014) del HoSIER:

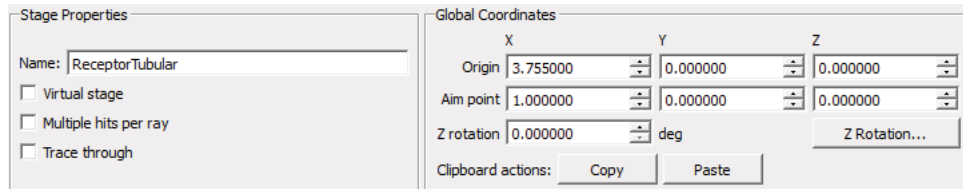


Figura A.1. Propiedades de la etapa del receptor cilíndrico y disposición en el eje coordenado global de la simulación

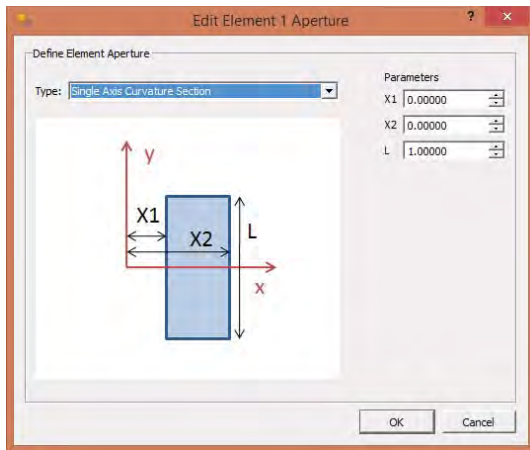


Figura A.2. Definición de la apertura de la etapa del receptor tubular

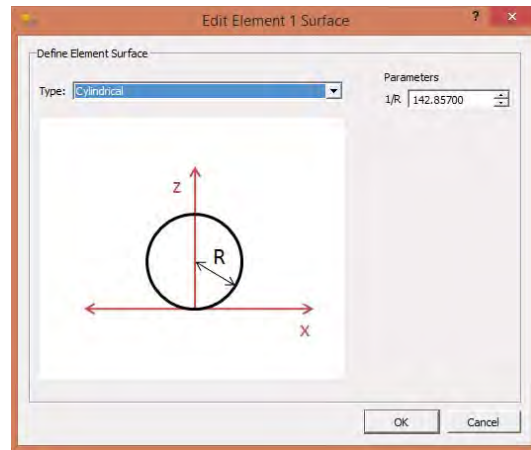


Figura A.3. Definición de la superficie de la etapa del receptor tubular

En.	X-Coord.	Y-Coord.	Z-Coord.	X-AimPt.	Y-AimPt.	Z-AimPt.	Z-Rot.	Aperture	Surface	Interaction	Optics	Comment
1	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	0	0	-1	90	l=0,0,1,0,0,0,0,0	t=142.857,0,0,0,0,0,0,0	Reflection	Tubo	Modelo de receptor de probetas de Omar Alvarez

Figura A.4. Registro completo del modelos de receptor de probetas de superficie cilíndrica, con diámetro de 12.7 mm

Apéndice B. Tablas de flujos radiativos a las distancias de 50 mm y 60 mm detrás del punto focal para un receptor con diámetro de 12.7 mm

Tabla B.1. Modelo de flujo radiativo discreto para un receptor cilíndrico de 12.7 mm de diámetro, a 50 mm atrás del punto focal en el HoSIER [kW m⁻²]

Uno	Dos	Tres	Cuatro	Cinco	Seis	Siete	Ocho	Nueve	Diez
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	1.60E+01	0.00E+00	1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.19E+01	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	3.19E+01	1.60E+01	3.19E+01	4.79E+01	4.79E+01	0.00E+00	1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	3.19E+01	4.79E+01	7.98E+01	6.39E+01	1.44E+02	3.19E+01	7.98E+01	7.98E+01	1.60E+01
1.60E+01	1.28E+02	2.39E+02	3.35E+02	3.03E+02	3.83E+02	1.60E+02	2.55E+02	1.12E+02	4.79E+01
7.98E+01	2.24E+02	2.24E+02	4.47E+02	4.79E+02	4.79E+02	6.71E+02	3.83E+02	1.76E+02	4.79E+01
2.08E+02	4.15E+02	6.86E+02	1.02E+03	1.04E+03	1.31E+03	7.82E+02	8.30E+02	3.51E+02	2.24E+02
3.19E+02	9.58E+02	1.01E+03	1.68E+03	1.85E+03	1.74E+03	1.53E+03	1.25E+03	6.55E+02	2.87E+02
3.67E+02	8.94E+02	1.87E+03	2.44E+03	3.21E+03	2.35E+03	2.63E+03	1.80E+03	8.62E+02	2.24E+02
4.63E+02	1.18E+03	2.01E+03	3.29E+03	3.66E+03	3.32E+03	2.95E+03	1.85E+03	9.26E+02	4.31E+02
3.35E+02	1.20E+03	2.03E+03	3.69E+03	3.70E+03	3.64E+03	2.91E+03	1.92E+03	1.20E+03	4.95E+02
2.24E+02	8.62E+02	1.69E+03	2.73E+03	2.81E+03	3.11E+03	2.73E+03	1.79E+03	9.58E+02	2.55E+02
2.08E+02	7.18E+02	1.37E+03	1.85E+03	1.87E+03	2.25E+03	1.80E+03	1.31E+03	5.27E+02	2.87E+02
2.55E+02	5.27E+02	1.10E+03	1.18E+03	1.33E+03	1.13E+03	1.47E+03	1.09E+03	5.91E+02	2.24E+02
9.58E+01	2.87E+02	5.91E+02	7.66E+02	7.02E+02	6.39E+02	7.18E+02	3.35E+02	3.99E+02	4.79E+01
1.60E+01	1.28E+02	3.67E+02	3.67E+02	3.51E+02	3.35E+02	3.99E+02	1.44E+02	1.28E+02	1.60E+01
0.00E+00	7.98E+01	1.12E+02	4.79E+01	1.28E+02	1.12E+02	6.39E+01	6.39E+01	3.19E+01	4.79E+01
0.00E+00	3.19E+01	3.19E+01	0.00E+00	3.19E+01	3.19E+01	0.00E+00	3.19E+01	1.60E+01	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	1.60E+01	0.00E+00	3.19E+01	0.00E+00	1.60E+01	0.00E+00	1.60E+01	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Once	Doce	Trece	Catorce	Quince	Dieciseis	Diecisiete	Dieciocho	Diecinueve	Veinte
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.60E+01
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
4.79E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.19E+01
3.19E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.98E+01

4.79E+01	1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.39E+01
6.39E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.39E+01
9.58E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.19E+01	7.98E+01
6.39E+01	1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.19E+01	3.19E+01
6.39E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.98E+01
6.39E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.79E+01
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.60E+01
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

Tabla B.2. Modelo de flujo radiativo discreto para un receptor cilíndrico de 12.7 mm de diámetro, a 60 mm atrás del punto focal en el HoSIER [kW m⁻²]

Uno	Dos	Tres	Cuatro	Cinco	Seis	Siete	Ocho	Nueve	Diez
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	1.52E+01	0.00E+00	1.52E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.05E+01	4.57E+01	0.00E+00
0.00E+00	3.05E+01	1.52E+01	6.10E+01	1.07E+02	0.00E+00	4.57E+01	7.62E+01	3.05E+01	1.52E+01
3.05E+01	9.14E+01	7.62E+01	1.52E+02	1.52E+02	1.83E+02	1.83E+02	1.07E+02	7.62E+01	6.10E+01
6.10E+01	2.44E+02	2.74E+02	4.42E+02	4.42E+02	3.51E+02	3.51E+02	3.51E+02	1.52E+02	3.05E+01
1.07E+02	2.13E+02	4.11E+02	5.64E+02	8.38E+02	7.16E+02	6.71E+02	5.64E+02	3.20E+02	7.62E+01
1.22E+02	5.03E+02	7.62E+02	1.05E+03	1.28E+03	1.28E+03	1.22E+03	8.84E+02	4.88E+02	2.90E+02
1.83E+02	5.18E+02	1.04E+03	1.30E+03	1.69E+03	1.62E+03	1.54E+03	1.20E+03	5.94E+02	1.68E+02
1.22E+02	6.10E+02	1.45E+03	1.81E+03	2.32E+03	2.32E+03	2.03E+03	1.26E+03	7.62E+02	2.90E+02
2.29E+02	1.01E+03	1.62E+03	2.04E+03	2.51E+03	2.22E+03	2.07E+03	1.46E+03	9.91E+02	2.74E+02
3.20E+02	8.53E+02	1.75E+03	2.07E+03	2.24E+03	2.33E+03	2.04E+03	1.26E+03	7.01E+02	1.98E+02
1.37E+02	6.86E+02	1.08E+03	2.09E+03	2.33E+03	2.12E+03	1.87E+03	1.26E+03	6.86E+02	1.37E+02
1.98E+02	5.18E+02	1.05E+03	1.34E+03	1.55E+03	1.63E+03	1.33E+03	9.45E+02	5.94E+02	1.22E+02
1.68E+02	3.66E+02	4.42E+02	8.38E+02	8.99E+02	9.45E+02	1.11E+03	6.25E+02	5.18E+02	1.22E+02
7.62E+01	1.98E+02	4.72E+02	6.25E+02	4.88E+02	5.18E+02	5.49E+02	4.88E+02	3.35E+02	3.05E+01
1.52E+01	1.37E+02	1.98E+02	2.13E+02	2.44E+02	2.29E+02	2.29E+02	2.29E+02	9.14E+01	4.57E+01
1.52E+01	6.10E+01	6.10E+01	6.10E+01	1.68E+02	4.57E+01	1.37E+02	1.07E+02	3.05E+01	1.52E+01
0.00E+00	3.05E+01	0.00E+00	6.10E+01	9.14E+01	4.57E+01	4.57E+01	1.52E+01	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	1.52E+01	1.52E+01	0.00E+00	1.52E+01	6.10E+01	0.00E+00	1.52E+01	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.52E+01	1.52E+01	1.52E+01	0.00E+00	0.00E+00

Apéndice C. Publicaciones y ponencias como producto del trabajo de investigación.

C.1. Publicaciones en revistas especializadas con arbitraje en *Journal Citation Reports*

1. Effects of concentrated solar irradiation on allotropic transformations of AISI 316 stainless steel. Revista de Metalurgia, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Revista Científica del CSIC (CENIM-CSIC). ISSN-E: 1988-4222, ISSN-L: 0034-8570

DOI: 10.3989/revmetalm.133

Coautores: Armando Rojas Morín, Arturo Barba Pingarrón, Camilo Alberto Arancibia Bulnés, Jorge Alvarez Díaz, Dulce Viridiana Melo Máximo, Carlos Ernesto Arreola Ramos
España, 2018.

C.2. Publicaciones en revistas especializadas con arbitraje

2. Experiences and Proposals for the Application of Concentrated Solar Energy in the Processing of Materials. Modern Environmental Science and Engineering, Academic Star Publishing Company. ISSN: 2333-2581. Paper No. MESE20180101-1.

DOI: 10.15341/mese(2333-2581)/06.04.2018/008

Coautores: Arturo Barba Pingarrón, Armando Rojas Morín, Alfonso J. Vázquez Vaamonde, Gloria P. Rodríguez Donoso, Raúl Gilberto Valdez Navarro.

New York, Estados Unidos de América, 2018.

C.3. Publicaciones en congresos

3. Experiencias y Propuestas para la Aplicación de la Energía Solar Concentrada en el Procesamiento de Materiales y la Enseñanza. Congreso Internacional de Energía 2017 (CIE 2017) / International Energy Conference 2017 (IEC 2017).

Coautores: Arturo Barba Pingarrón, Armando Rojas Morín, Raúl Gilberto Valdez Navarro, Alfonso J. Vázquez Vaamonde, Gloria P. Rodríguez Donoso.

México, 2017.

4. Algunas posibilidades de aplicación de la energía solar concentrada para el tratamiento de materiales. 2° Coloquio de energía / Uso actual de la energía y energías renovables.

Coautores: Arturo Barba Pingarrón, Armando Rojas Morín, Alfonso J. Vázquez Vaamonde, Gloria P. Rodríguez Donoso.

México, 2013.

C.4. Otras ponencias

5. Algunos efectos de la Energía Solar Concentrada en Materiales Metálicos para Sistemas de Torre Central. Ponencia del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA).

México, Ciudad Universitaria, 2018.

6. Evaluación de los Efectos de la Aplicación de Energía Solar Concentrada en las Transformaciones de Fase y las Propiedades de un Acero Inoxidable Austenítico. Simposio Internacional en Ciencia de Materiales y Equidad de Género 2018.

Coautores: Armando Rojas Morín, Arturo Barba Pingarrón, Raúl Gilberto Valdez Navarro, Jorge Alvarez Díaz, Camilo Alberto Arancibia Bulnes.

México, Instituto de Ciencias Físicas, 2018.