

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN DE POROSIDAD EN SOLDADURA
LONGITUDINAL APLICADA POR EL PROCESO SAWL EN EXTREMOS DE
TUBERÍA API 5L X70 PSL 2**

POR

LUIS GUSTAVO VELASCO HERNÁNDEZ

TESIS

**EN OPCIÓN COMO MAESTRO
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

Saltillo, Coahuila

Octubre 2018

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN DE POROSIDAD EN SOLDADURA
LONGITUDINAL APLICADA POR EL PROCESO SAWL EN EXTREMOS DE
TUBERÍA API 5L X70 PSL 2**

POR

LUIS GUSTAVO VELASCO HERNÁNDEZ

TESIS

**EN OPCIÓN COMO MAESTRO
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

Saltillo, Coahuila

Octubre 2018

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis, **ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN DE POROSIDAD EN SOLDADURA LONGITUDINAL APLICADA POR EL PROCESO SAWL EN EXTREMOS DE TUBERÍA API 5L X70 PSL 2** realizada por el alumno **LUIS GUSTAVO VELASCO HERNÁNDEZ**, con número de matrícula **16-MS060** sea aceptada para su defensa como Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dr. José Jorge Ruíz Mondragón
Tutor Académico

Dra. Rocío Saldaña Garcés
Co-tutora

Dr. Eduardo Hurtado Delgado
Asesor

M. en C. Gabriel García Cerecero
Tutor de planta

Vo. Bo.

Dr. Pedro Pérez Villanueva
Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **LUIS GUSTAVO VELASCO HERNÁNDEZ**, una vez leída y revisada la Tesis titulada **ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN DE POROSIDAD EN SOLDADURA LONGITUDINAL APLICADA POR EL PROCESO SAWL EN EXTREMOS DE TUBERÍA API 5L X70 PSL 2**, aceptamos que la referida Tesis revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 23 días del mes de octubre del año 2018.

Dr. Jesús Emilio Camporredondo Saucedo

Presidente

Dra. Alejandra Hernández Rodríguez

Secretaria

Dr. José Jorge Ruíz Mondragón

Vocal

AGRADECIMIENTOS

Es un honor agradecer a mis padres por todo el apoyo que me han dado desde que me propuse este reto, así como todo aquello que me he decidido a emprender profesionalmente.

El apoyo y cariño de una persona muy especial en mi vida, mi novia, que me ha demostrado que lo que uno sueña se puede lograr y que no existen barreras cuando uno se prepara para enfrentar los retos que la vida te pone para crecer como ser humano.

A CONACYT por el apoyo económico proporcionado, el cual me permitió llevar a cabo adecuadamente mi proyecto de investigación y poderme enfocar 100% al estudio de este posgrado.

A COMIMSA, donde me enseñaron lo importante que es la voluntad de cada quien para salir adelante y que su apoyo nunca faltó para llevar a cabo cada paso de este proyecto y obtener esta meta en mi vida.

A cada uno de los profesores que tuve a lo largo de este camino que me enseñaron lo importante que es querer aprender y tener la facultad de estar en una rama como la soldadura, la cual no será ningún esfuerzo para mí el desempeñarme como maestro en soldadura ya que disfruto esta especialidad.

A mis asesores, que a lo largo de este trabajo estuvieron aportando cada una de sus ideas para poder llevar a cabo por el mejor camino este proyecto.

A mis compañeros, quienes nunca dudamos que saldríamos juntos de esto y que cuando uno decaía siempre estaba el otro para apoyarnos.

Siempre será un honor el decir que egresé de esta institución, la cual me dio tanto conocimiento y experiencia laboral como fue posible.

DEDICATORIA

Este proyecto se hizo con la intención de mejorar la productividad de una empresa, la cual agradezco nos haya apoyado con el material para poder hacer esto un proyecto de calidad. Por lo que dedico este trabajo para aquellas personas, como yo, que confiamos en las instituciones mexicanas para poder aumentar nuestros conocimientos y lograr ese objetivo que con tanta dicha puedo decir que logré, ya que las barreras se las pone uno y uno mismo las rebasa tan alto como desee llegar.

Mis padres y hermana siempre serán un pilar importante en mi vida personal y profesional ya que crecimos juntos con este reto como familia. También dedico este logro a mi novia quien me ha apoyado en mis decisiones a pesar de la distancia.

Solo me resta decir que espero esta institución siempre vea por el bien del estudiante como hasta la fecha y que la decisión de un estudiante foráneo por querer estudiar un posgrado sea siempre bien recompensada y aprovechada al máximo.

ÍNDICE

SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1.....	2
INTRODUCCIÓN	2
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.5 HIPÓTESIS.....	6
1.6 ALCANCE	7
1.7 APORTACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA	7
CAPÍTULO 2.....	8
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	8
2.1 ACEROS EN LA INDUSTRIA PETROLERA	8
2.1.1 ACEROS ALTA RESISTENCIA BAJA ALEACIÓN.....	9
2.1.2 ACEROS API 5L	10
2.1.3 FABRICACIÓN DE TUBERÍAS API 5L X70.....	11
2.1.4 METALURGIA DE LA SOLDADURA DE LOS ACEROS API 5L X70	12
2.2 PROCESOS DE SOLDADURA EN LA INDUSTRIA PETROLERA.....	14
2.2.1 SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO CON METAL Y GAS (GMAW)	14
2.2.2 SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA (ERW).....	15
2.2.2.1 PARÁMETROS DE SOLDADURA.....	15
2.2.3 SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW).....	17
2.3.1.1 PARÁMETROS DE SOLDADURA.....	18

2.3	DISCONTINUIDADES	24
2.3.1	POROSIDAD	24
2.3.1.1	MECANISMO DE FORMACIÓN DE LA POROSIDAD	26
2.3.2	MÉTODOS DE DETECCIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES	32
2.3.2.1	RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL	33
2.4	FLUJO DE CALOR EN SOLDADURA	35
2.4.1	TRANSFERENCIA DE CALOR	36
2.5	DISEÑO DE EXPERIMENTOS	37
2.5.1	DISEÑO FACTORIAL	38
2.3.2.2	DISEÑO FACTORIAL COMPLETO CON PUNTOS CENTRALES	39
	CAPÍTULO 3.....	40
	METODOLOGÍA.....	40
	CAPÍTULO 4.....	45
	DESARROLLO EXPERIMENTAL	45
4.1	PRUEBAS PRELIMINARES	46
4.1.1	MODIFICACIÓN DE LA ABERTURA DE RAÍZ	46
4.1.2	LIMPIEZA DE LA UNIÓN EN PLANTA	47
4.2	DISEÑO DE EXPERIMENTOS	47
4.3	PREPARACIÓN DE PROBETAS	49
4.4	CALIBRACIÓN DE MÁQUINA SAW EN LABORATORIO	51
4.5	RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL	52
4.6	CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA Y MEB.....	53
4.7	SIMULACIÓN TÉRMICA DEL PROCESO SAWL.....	54
	CAPÍTULO 5.....	63
	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
5.1	ANÁLISIS DE LA ABERTURA DE RAÍZ EN LABORATORIO	63
5.2	RESULTADOS DE LIMPIEZA EN EXTREMOS DE TUBERÍA	66
5.3	PRUEBAS A NIVEL LABORATORIO	67
5.4	ANÁLISIS MACRO Y MICROESTRUCTURAL.....	71

5.5	RELACIÓN DE LA MASA DEL CONTAMINANTE VS POROSIDAD....	76
5.6	ANÁLISIS TÉRMICO.....	79
5.7	SIMULACIÓN TÉRMICA.....	83
	CAPÍTULO 6.....	87
	CONCLUSIONES.....	87
	TRABAJOS FUTUROS.....	89
	BIBLIOGRAFÍA.....	90
	LISTA DE FIGURAS.....	98
	LISTA DE TABLAS.....	101
	ANEXO A.....	102
	CURVAS OBTENIDAS DURANTE DOE.....	102
	ANEXO B.....	111
	DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA A NIVEL DE TERMOPARES.....	111

SÍNTESIS

A lo largo de los años, la industria petrolera ha incursionado en la investigación sobre cómo mejorar el transporte de hidrocarburos en ambientes que afecten la integridad mecánica del medio en que se conducen y así obtener una vida útil larga y de provecho de las tuberías.

La manufactura de estas tuberías comienza desde la obtención de la composición química adecuada de acuerdo a estándares internacionales como lo es la American Petroleum Institute; ésta es mundialmente conocida por especificar las características y los medios para tener como resultado una tubería de acero microaleado con alta resistencia mecánica y buenas propiedades contra la corrosión.

La fabricación de tuberías API 5L X70 PSL 2 es un reto que conlleva varias estaciones de trabajo donde la soldadura es una parte fundamental. La calidad de la misma es primordial para obtener los resultados que en servicio demandan dichas tuberías, por lo que defectos como la porosidad son indeseables en una soldadura en servicio.

Este trabajo se enfoca en el mecanismo de formación de la porosidad, el cual debe ser evitado para reducir retrabajos y pérdidas económicas en la manufactura de líneas de conducción de API 5L X70 PSL 2. El apoyo de un diseño de experimentos instrumentado, la metalografía de las probetas soldadas, el análisis por medio de MEB de la porosidad encontrada por medio de radiografía industrial, el análisis de la masa estimada para generar un poro y una simulación térmica, ayudan a entender el mecanismo de formación de la porosidad en una soldadura longitudinal aplicada por el proceso SAWL.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Con el descubrimiento de yacimientos de hidrocarburos en el siglo XIX, el uso del acero, debido a sus buenas propiedades mecánicas [1] fue la base para poder transportar el oro negro. Ya en campo, la soldadura fue de suma importancia para el tendido de líneas, donde por medio de varillas sin recubrimiento, antecedente del proceso SMAW, soldaban dichas tuberías para lograr la unión entre éstas [2].

El avance en los procesos de soldadura dio pauta para tener mayor diversidad de procesos, como la soldadura por arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés) la cual se conoce a partir del año 1935 [3]. Este proceso se inventó con la intención de tener una alta productividad y restar defectos en la unión ya que separa el recubrimiento del núcleo del electrodo del proceso SMAW para mitigar la intervención de impurezas en el charco de la soldadura [4].

En los últimos 50 años, la extracción de hidrocarburos de las profundidades de los océanos ha incrementado su explotación, por lo que los materiales de las tuberías han estado en constante investigación para mejorar y así evitar fallas por el cambio en las condiciones de servicio [5].

Para la década de los 70 se dio a conocer el grado API 5L X70 PSL 2 que permitía trabajar bajo condiciones más severas, como a bajas temperaturas o en costa afuera, sin afectar la degradación del espesor de la tubería por la corrosión externa e interna y los esfuerzos generados a raíz de las presiones de trabajo [6].

Estas condiciones tan adversas, hacen que la soldabilidad de las uniones en las tuberías de diámetros grandes a la hora de la fabricación tenga una gran relevancia, ya que un mal resultado puede ocasionar serios problemas, que en muchos casos han llevado a la pérdida de vidas humanas.

A la fecha se han desarrollado varios programas de simulación de soldadura, los cuales predicen comportamientos termomecánicos y microestructurales en las uniones soldadas a partir de parámetros considerados. Éstos se han venido reconociendo como una herramienta confiable para conocer el comportamiento de cierta pieza después de ser soldado [7].

En la soldadura se pueden encontrar discontinuidades que afectan la efectividad de la misma, como es la porosidad [8], la cual en la industria petrolera puede afectar la integridad de las tuberías por estar propensa a un abombamiento de gases y posterior agrietamiento derivados de distintas reacciones químicas durante la soldadura por elementos de bajo punto de evaporación y los cuales dependerán de la solidificación para quedar o no atrapados [9].

Debido a esto, la industria petrolera continuamente busca la innovación en los materiales que emplea para el transporte de hidrocarburos con la finalidad de evitar este tipo de defectos al momento de transportarlos.

Por tal razón este trabajo profundiza en la disminución de la porosidad en la soldadura longitudinal realizada por el proceso SAWL en la fabricación de tuberías de acero API 5L X70 PSL 2 con la aplicación de un diseño de experimentos instrumentado, caracterización metalográfica y simulación térmica del proceso de soldadura por el software ANSYS para la asociación indirecta del fenómeno térmico en una soldadura donde se pueda presentar la porosidad.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Cuantificar y profundizar en el mecanismo de formación de la porosidad presentada en un proceso industrial de acuerdo al análisis del efecto térmico a nivel laboratorio y simulado en una soldadura por SAWL en tuberías de acero API 5L X70 PSL 2 empleada para el transporte de hidrocarburos a presiones elevadas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una búsqueda en la literatura acerca de los parámetros que influyen en el proceso de soldadura por SAWL para la fabricación de tuberías de acero API 5L X70 PSL 2.
- Desarrollar y evaluar un diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) con los parámetros encontrados, teniendo como base de partida los empleados en la empresa con la que se realiza el proyecto.
- Estimar la relación de masa del contaminante con respecto a la porosidad generada en la soldadura.
- Llevar a cabo una simulación por medio de ANSYS FLUENT considerando la geometría validada con experimentos instrumentados anteriormente, con la intención de registrar la evolución térmica que la tubería presenta a lo largo del proceso de soldadura en un solo paso.
- Determinar la relación indirecta que existe entre la evolución térmica y la existencia de porosidad en la unión soldada.

1.3 Justificación

El transporte de hidrocarburos es una actividad de alto impacto en la industria petrolera, ya que el descubrimiento de nuevos yacimientos y la necesidad de obtener mayores volúmenes de este mineral hace que la fabricación de tuberías no sea tarea fácil.

TUBACERO S. de R.L. de C.V. es una de las empresas que destacan por su calidad en la fabricación de tuberías de gran medida para su aplicación en el transporte de hidrocarburos, sin embargo, existe la problemática de tener pérdidas económicas por retrabajos y corte de material al encontrarse defectos en los extremos de las tuberías.

A pesar de que ellos cuentan con gran experiencia en la fabricación de líneas de conducción, los problemas por la aparición de defectos, como es la porosidad, no se ha podido solucionar, por lo que es necesario profundizar en el conocimiento de su formación con el fin de eliminar o mitigar su aparición.

La alta productividad que esta empresa demanda, limita la modificación de los parámetros para tratar este problema, por lo que la simulación y ensayos a nivel laboratorio son herramientas viables para evitar pérdida de material y tiempo en realizar pruebas.

Esta tesis propone el análisis comparativo indirecto entre el comportamiento térmico y el fenómeno de aparición de porosidad en la unión soldada apoyado de una simulación para proporcionar el procedimiento más viable para la eliminación o mitigación de la porosidad en la tubería.

1.4 Planteamiento del problema

El proceso SAWL es uno de los más empleados en la fabricación de tuberías de grandes diámetros, con espesores por encima de los 13 mm y con costura longitudinal para unir ambos extremos de las placas previamente dobladas por el procedimiento UOE (doblado “U”, formado “O”, expansión “E”) para después unirlo con soldadura por resistencia eléctrica (ERW, por sus siglas en inglés).

Debido a que la fusión completa de la soldadura longitudinal del tubo no se logra por el proceso ERW, se utiliza el proceso GMAW para rellenar los extremos no soldados de la tubería, para después aplicar el proceso SAWL para obtener la soldadura final. Este proceso (SAWL) tiene la característica de producir una penetración profunda por un alto potencial eléctrico suministrado, pero en la soldadura de los extremos de las tuberías se pueden presentar discontinuidades tales como la porosidad (debido a procesos anteriores que generan residuos contaminantes y una discrepancia en la abertura de raíz en los extremos), lo cual es indeseable ya que pueden generar problemas en las tuberías en servicio, gastos en tiempo y dinero por retrabajos y pérdida de material.

Una herramienta que ayuda en la predicción del comportamiento de la tubería al ser sometida al proceso de soldadura es la simulación, ya que se consideran variaciones en los parámetros del proceso y de esta manera se conoce el efecto térmico para analizar el fenómeno de la aparición de porosidad en la soldadura.

De acuerdo a lo anterior este trabajo de investigación proporciona un análisis comparativo indirecto del efecto térmico que se presenta, a partir de una simulación para conocer y dar una respuesta efectiva a la eliminación o mitigación de porosidad en la unión soldada.

1.5 Hipótesis

La aparición de porosidad en la soldadura de los extremos de las tuberías de acero API 5L X70 PSL 2 es debido a la presencia de residuos contaminantes en la unión, la velocidad de avance de soldadura y la abertura de raíz resultado del proceso previo a la soldadura SAWL.

1.6 Alcance

En este trabajo se consideraron los parámetros eléctricos constantes en el proceso SAWL, ya que están restringidos por un WPS de la empresa y la mayoría de la unión soldada no presenta este problema, por lo que la abertura de raíz, velocidad de avance y aplicación de calor previa a la unión serán los factores en consideración; además se limita a un acero API 5L X70 PSL 2 de diámetros hasta de 1220 mm y espesores de hasta 18 mm.

La simulación sólo considerará el análisis del comportamiento térmico. La porosidad no será simulada, sin embargo, se plantea una relación indirecta existente entre los perfiles térmicos y la misma porosidad.

1.7 Aportación Científica y Tecnológica

Esta tesis muestra un análisis sobre la aparición de la porosidad por medio de un diseño de experimentos, mostrando ensayos destructivos y no destructivos que ayudan en la caracterización de la porosidad encontrada.

La investigación contribuirá con una metodología que permitirá correlacionar las curvas de temperatura contra tiempo tomadas mediante instrumentación y las obtenidas por medio de la simulación para explicar el mecanismo de formación de la porosidad de forma indirecta.

Para la industria el conocimiento obtenido ayudará a mejorar la productividad de sus operaciones, derivado de un análisis de distintas técnicas para mitigar la aparición de porosidad.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 *Aceros en la Industria Petrolera*

El acero en la industria petrolera se ha utilizado desde el siglo XIX [1], lo que ha hecho que las investigaciones en la mejora de sus propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión sean cada vez más específicas para las condiciones de trabajo.

Este material cuenta con diferentes clasificaciones, una de ellas es de acuerdo al contenido de carbono, por lo que se categorizan en bajo, medio y alto carbono. Para el transporte de hidrocarburos, los aceros de bajo carbono se utilizan en su mayoría por su alta resistencia y gran soldabilidad.

2.1.1 Aceros Alta Resistencia Baja Aleación

Los aceros HSLA, por sus siglas en inglés, tienen este nombre por su adición de elementos como vanadio, niobio y titanio, los cuales en pequeñas cantidades logran una mejora considerable en las propiedades mecánicas del material al generar un endurecimiento por precipitación y refinamiento del grano austenítico durante el rolado en caliente [10]. El carbono se presenta no mayor a 0.2 % e.p. mientras que la adición de aleaciones se presentan en proporciones menores a 2 % e.p. [8].

Estos aceros no solo reducen los costos de fabricación, sino que promueven grandes capacidades termomecánicas, destacando una buena soldabilidad, alta resistencia y ductilidad. El uso de este tipo de acero no solo se reduce a la industria petrolera, de igual manera se ocupa en campos como la construcción, la industria naval y tanques de almacenamiento [11].

La composición química de los aceros HSLA es la responsable de otorgar al material ferroso avanzadas propiedades mecánicas, tales como la resistencia, ductilidad, tenacidad, resistencia a la fatiga, soldabilidad, entre otras. Estas propiedades se logran a partir de un buen tratamiento bajo trabajo mecánico controlado (TMCP) a la placa, sin embargo, por los ciclos de calor y esfuerzos que recibe el material durante la soldadura, se pueden perder las propiedades mecánicas del material base [12].

D. Belato Rosado y colaboradores [13] se encargaron de generar una recopilación de los procesos de manufactura actuales para generar acero API en sus diferentes grados, concluyendo que los avances tecnológicos han hecho que los procesos de manufactura, su metalurgia, así como las propiedades deseadas de este tipo de aceros sean características que van en aumento para las especificaciones requeridas.

Las especificaciones actuales son rigurosas al dar valores máximos de composición química en estos aceros para evitar defectos que puedan afectar la integridad de la tubería. Elementos microaleantes como el Vanadio, Titanio, Molibdeno, Boro y Niobio, y sustitucionales como el Silicio, Cobre, Níquel y

Cromo [14] hacen que estos aceros logren las características mecánicas y químicas necesarias para dar un buen servicio.

2.1.2 Aceros API 5L

El acero API 5L es una aleación utilizada en el transporte de hidrocarburos clasificada por sus grados de resistencia mecánica y tipo de fluido a manejar. Por ser un acero HSLA, se denota que tiene excelentes propiedades mecánicas, así como una buena soldabilidad y es apto para servicio en temperaturas por debajo de -30°C . Su combinación de microaleantes los hace un producto más rentable al soportar grandes esfuerzos con un menor espesor de pared.

De acuerdo a la norma API 5L, su composición debe de estar en los rangos que se muestran en la Tabla 2.1 [15]:

Tabla 2.1. Composición química de un acero API 5L X70 PSL 2 (% e.p.) [15].

Grado	C	Si	Mn	P	S
	Máy.	Máy.	Máy.	Máy.	Máy.
X70	0.12	0.45	1.65	0.025	0.015
La suma de Nb, V y Ti no debe rebasar el 0.15%					

La adición de elementos diferentes a los mostrados anteriormente se debe de acordar entre el usuario y el fabricante, como la adición de elementos como el cobre, níquel, cromo y molibdeno [15].

Manikam recomienda tener en cuenta en la composición química al silicio, ya que en este rango opera como un excelente desoxidante mitigador de la porosidad [16]. Kou menciona que el silicio no debe exceder los 0.7% e.p. [17].

Desde su invención en los años 70 [6][18], este acero fue bastante recomendable para las tuberías de transporte, al ser la manera más económica de transportar hidrocarburos por largas distancias. La intención de introducir estos materiales a la industria petrolera fue el ahorro y la reducción de energía consumida. Hablando de sus propiedades, las tuberías deben tener la capacidad

de resistir altas cargas para evitar problemas con la urbanización y afectaciones, ya que estos ductos son enterrados cerca de 2 metros en el derecho de vía o sumergidos en el lecho marino. [16]

2.1.3 Fabricación de tuberías API 5L X70

La fabricación de tuberías con costura de grandes diámetros se manufactura a partir de una serie de estaciones donde se comienza por rolar una placa hasta alcanzar la forma de una “O” de manera transversal por medio de rodillos. Una vez teniendo los extremos alineados se procede a unir por medio de soldadura por resistencia eléctrica, ERW por sus siglas en inglés. Después, se prepara la unión para una soldadura doble por SAWL, la cual se recomienda por tener una excelente penetración y mínimas exposiciones al ambiente por el uso de una capa de fundente. Posteriormente se aplica una expansión a la tubería para alcanzar la mejor redondez posible. Finalmente se hacen las pruebas de calidad por medio de ensayos no destructivos como ultrasonido y radiografía industrial para validar la soldadura (ver Figura 2.1). [19][20]



Figura 2.1. Proceso de fabricación de tubería en planta TUBACERO S. de R.L. de C.V.

Las pruebas de calidad están en función de la especificación API 5L [15], en la cual se hace mención de cada prueba como sus criterios de aceptación en la manufactura de tuberías ya sea con costura longitudinal o sin costura.

2.1.4 Metalurgia de la soldadura de los aceros API 5L X70

A grandes rasgos, una soldadura por arco eléctrico consiste en la unión de dos piezas de similares características por medio de calor generado entre el metal de aporte y el material base [17], este proceso incluye cinco regiones microestructuralmente distintas descritas a continuación [21], igualmente mostradas en la Figura 2.2:

- La zona de fusión (ZF) es el resultado de la fundición del metal base con el metal de aporte para producir una composición distinta a la del primero.
- Dentro de esta misma zona se forma una región no mezclada, la cual es parte de la fundición del metal base pero que solidifica rápidamente dejando sus propiedades similares al metal base.
- La zona parcialmente fundida es aquella que se encuentra ligeramente por encima de la ZAC. En esta zona se encuentra la característica de la licuefacción de los bordes de los granos donde se puede llegar a producir agrietamiento.
- La zona afectada por el calor (ZAC) es la zona donde se experimentan altos gradientes de temperatura, los cuales provocan cambios en la microestructura, pero no logran crear una fusión. Aquí es donde se presenta una interacción propia entre la máxima temperatura alcanzada y la velocidad de enfriamiento.
- Por último, la zona no afectada del metal base.

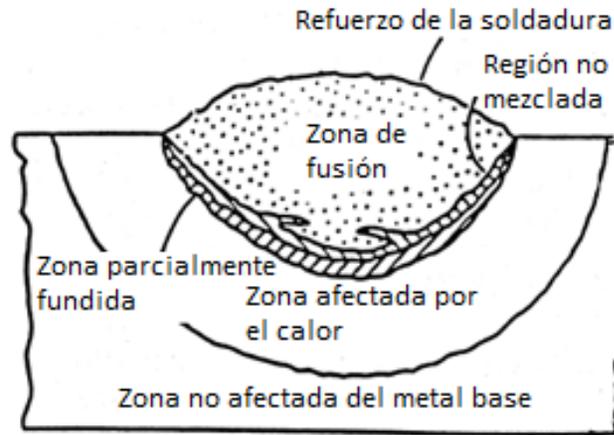


Figura 2.2. Esquema de las regiones en una soldadura [21].

Para los aceros API, por tener un contenido bajo de carbono, mantienen una buena soldabilidad con ciertas condiciones. Esto se relaciona con el valor de carbono equivalente, tal como lo indica el código API 5L [15] para aceros PSL2 con contenido de carbono menor o igual a 0.12% e.p., el cual se determina mediante la Ecuación 1

$$CE = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (1)$$

Existen ciclos de calentamiento y enfriamiento durante la soldadura que afectan la microestructura, la resistencia a la corrosión y la composición superficial de la soldadura y el metal base. Estos factores pueden ser [21]:

- Microsegregación
- Precipitación de fases secundarias
- Formación de zonas heterogéneas
- Recristalización y crecimiento de grano en la zona afectada por el calor (ZAC)
- Volatilidad de elementos aleados del charco de la soldadura fundido
- Contaminación del charco de la soldadura solidificado

Como estudio de la soldadura, se puede encontrar el término gradiente microestructural, el cual aparece en la ZAC en los ciclos de temperatura contra el tiempo experimentado por cada elemento del material.

2.2 **Procesos de Soldadura en la Industria Petrolera**

Para la fabricación de tuberías para conducción de hidrocarburos se utilizan diferentes procesos de soldadura, entre ellos el proceso de soldadura por resistencia, el de arco eléctrico con metal y gas y el de arco sumergido [10].

Estos procesos tienen como principio el uso de un arco eléctrico, de acuerdo a un voltaje y una corriente eléctrica para producir calor en el área de la unión soldada. Se conoce un grado de eficiencia para cada proceso de soldadura, el cual se describe en la Tabla 2.2.

Para producir esta energía, en la industria se ocupan máquinas generadoras o transformadores. De acuerdo a esto, se tienen las máquinas de corriente constante donde la carga de voltaje es la responsable del buen trabajo a distintas extensiones del electrodo, por lo que se recomienda para trabajos manuales por minimizar las variaciones de la longitud de arco. Otro tipo son las máquinas de voltaje constante donde la carga de corriente es responsable del rango de consumo del electrodo en la soldadura, al igual que estabiliza la longitud de arco [22].

Tabla 2.2. Eficiencia del arco eléctrico en un proceso de soldadura [22].

SAW	GMAW (CO_2)	GMAW (Argón)	SMAW
0.95	0.85	0.70	0.80

2.2.1 **Soldadura por arco eléctrico con metal y gas (GMAW)**

Un arco eléctrico genera el calor para producir la soldadura. Este arco es protegido por un gas inerte, como argón, CO_2 o helio. Como metal de aporte ocupa un electrodo recubierto por cobre alimentado continuamente. El gas ocupado para proteger la soldadura es inyectado por un tubo en la misma pistola de soldadura. El electrodo en forma de alambre es aplicado al mismo tiempo que el gas inerte (Ver Figura 2.3). Este es usado para soldaduras en metales y aleaciones que son susceptibles a la contaminación y a la porosidad.

Gracias a que ya no se ocupa de un fundente, ya no se presenta escoria en lo alto de la soldadura.

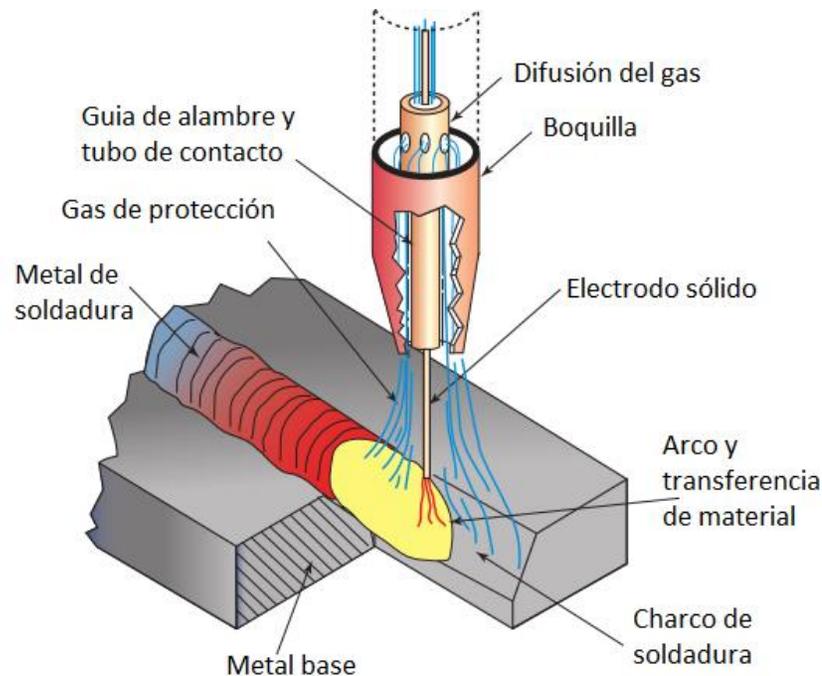


Figura 2.3 Proceso de soldadura GMAW [3].

2.2.2 Soldadura por Resistencia Eléctrica (ERW)

La soldadura por resistencia eléctrica para tuberías es generada a partir de la aplicación de una fuerza mecánica y el calor generado por el paso de un voltaje y una corriente a una frecuencia específica a través del material de trabajo [22].

2.2.2.1 Parámetros de soldadura

El paso de una corriente a través del material genera calor a partir de la resistencia eléctrica, esto debido a que el material puede tener una geometría muy grande y es necesaria una mayor energía para lograr la unión entre las dos caras empalmadas de la tubería [23].

La unión que se forma en la pieza y los contactores debe estar en una posición específica para poder tener la mejor eficiencia de resistencia y así obtener una soldadura de buena calidad (ver Figura 2.4).

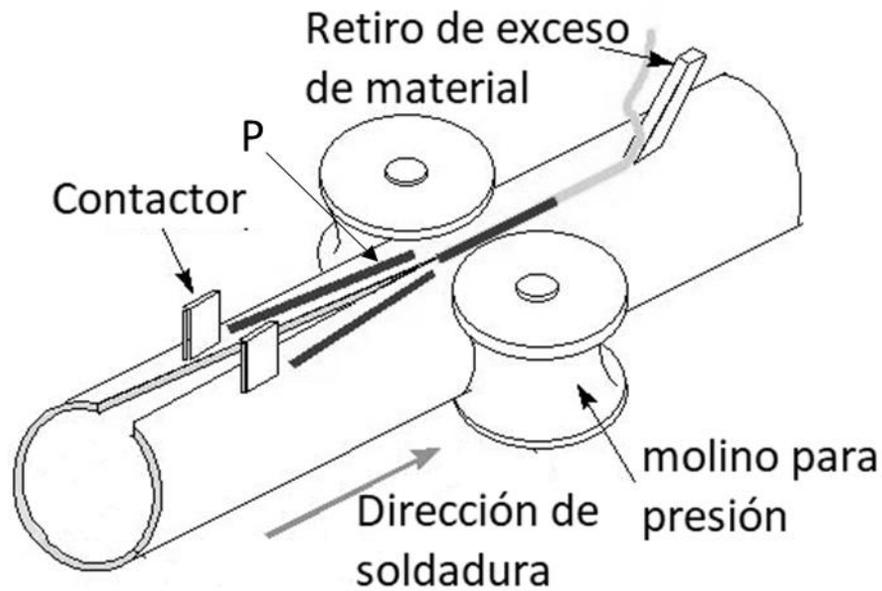


Figura 2.4 Proceso de soldadura ERW para tuberías. [24]

La velocidad de la soldadura es una variable que se considera una ventaja en este proceso, ya que por su principio de funcionamiento la velocidad es muy alta yendo de 30 hasta 100 m/min [23].

Por ser un proceso que necesita el uso de una alta entrada de calor, en la industria no se logra el 100% de soldaduras sanas, debido a defectos presentados como la soldadura fría o el exceso de penetración que genera una abertura hacia el final de la unión [25].

Los defectos antes mencionados se relacionan con dos efectos importantes, el primero de ellos es llamado efecto superficial, el cual se define como el fenómeno que se produce para concentrar la corriente en la superficie de un conductor [25], en este caso las paredes de la tubería. El segundo se conoce como el efecto de proximidad [23][26], el cual hace referencia a la concentración de energía en las paredes de la tubería más cercanas entre ellas derivado de la aplicación de una fuerza por los rodillos, indicado con P en la Figura 2.4. Para este segundo efecto existe una característica llamada la V de convergencia, la cual es señalada a partir de los contactores hasta el primer punto de contacto entre las caras empalmadas.

Haga y colaboradores [27] concluyen en un estudio del proceso ERW que existen 3 tipos de fenómenos en base en (1) la distancia y la forma entre el punto de soldadura y el punto V de convergencia, y (2) la impedancia del proceso.

2.2.3 Soldadura por Arco Sumergido (SAW)

En la soldadura por arco sumergido, el calor es generado por un arco eléctrico y un electrodo no recubierto como metal de aporte. Además, un fundente granular reciclable con elementos aleantes es depositado en la unión soldada para mejorar las propiedades mecánicas y evitar el contacto con contaminantes que puedan producir defectos. El arco derrite los elementos por encima de los 1500 °C y es sumergido en el metal de soldadura que es producto de esa fundición [4]. El electrodo se presenta en forma de alambre que es alimentado continuamente hacia la unión soldada. Se emplean corrientes elevadas, lo que permite que se tenga mayor penetración en la soldadura por debajo de la superficie del material de trabajo que otros procesos.

La separación del recubrimiento y el núcleo del electrodo es el principal fundamento de este proceso que lo hace muy productivo [28]. Con esto se logra mitigar las salpicaduras, eliminar los destellos de luz del arco eléctrico y suprimir la presencia de gases. En la Figura 2.5 se muestran los componentes básicos de este proceso.

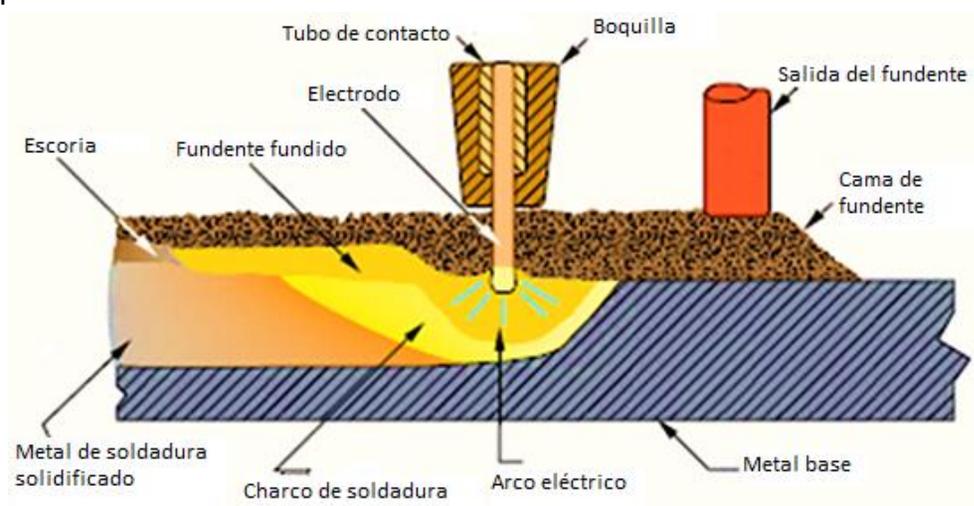


Figura 2.5 Esquema del proceso de soldadura por arco sumergido, SAW [29].

2.3.1.1 Parámetros de soldadura

- **Electrodo**

El electrodo para SAW maneja espesores que van de 1.6 mm hasta 6 mm, destacando los alambres de 2.4 a 4 mm. Los elementos aleantes más utilizados en estos alambres son el carbono, manganeso, silicio, azufre, fósforo, molibdeno, titanio, entre otros. El cobre se ocupa para recubrir el alambre, y así, mejorar su conductividad eléctrica y evitar la corrosión atmosférica [4].

Al ser un proceso mecanizado, tiene la alternativa de incluir en el proceso más de un alambre fundiendo simultáneamente para mejorar la deposición de soldadura, como por ejemplo el proceso Twin, el cual se trata de dos alambres alimentados por la misma fuente de poder.

En el proceso Tándem, múltiples alambres alimentan la soldadura con la característica que cada alambre es alimentado con fuentes de poder independientes para mejorar la soldadura al aumentar la velocidad de avance y dar un mejor acabado al cordón [30].

En la industria, este proceso se utiliza para reducir tiempos. El uso de una fuente DCEP en el frente de la soldadura y una fuente AC hace que se reduzca el problema de la desviación del arco [31]. Por poder tener más de un alambre en el proceso la tasa de deposición de material es excelente, como lo muestra la Figura 2.6, donde la relación proporcional entre la corriente suministrada y el número de alambres aplicados, genera una mayor tasa de deposición.

Algunas aplicaciones para estos son en aceros al carbono, HSLA, aceros inoxidables y aceros base níquel. [8]

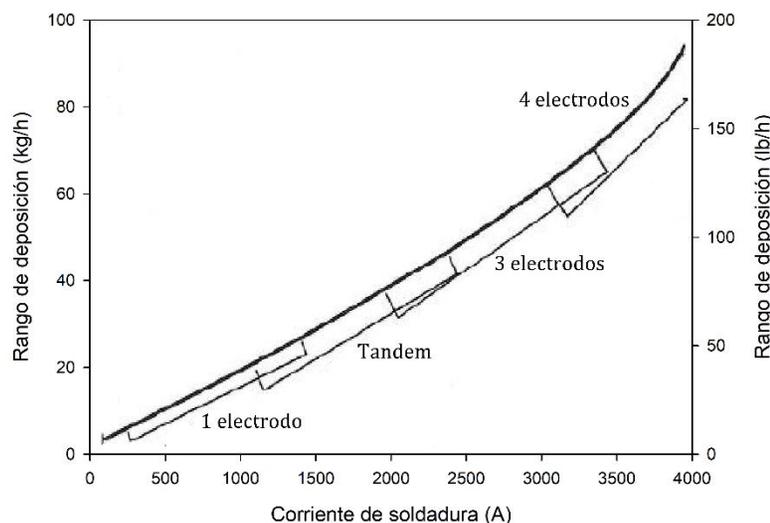


Figura 2.6 Variación de la deposición de soldadura vs el amperaje suministrado con diferentes números de alambres [4].

- **Fundente**

La finalidad del fundente es evitar que la soldadura en estado líquido se contamine. De igual manera, la adición de aleantes en el fundente es oportuna para mejorar las propiedades de la soldadura y evitar la generación de defectos, como la porosidad.

Estos se pueden dividir de acuerdo a su método de manufactura en fusionados, aglomerados y mezclados mecánicamente [3][8][31]. En el primero, los elementos aleantes se secan y luego se depositan en un horno hasta alcanzar la homogeneización, seguido se solidifica, se pulveriza y se empaqueta.

Por su método de fabricación, regularmente, no contiene elementos ferrosos ni desoxidantes. Los aglomerados se mezclan para secarse, seguido se combinan con un aglutinante. Se empaqueta y se pone a deshumidificar. Por sus temperaturas bajas de fabricación se pueden mezclar con elementos ferrosos y desoxidantes.

Otra manera de clasificarlos es de acuerdo a su efecto en la soldadura, como activos, que su mayor elemento puede ser silicio y manganeso; neutrales, donde los elementos aleantes no tienen efecto; y aleantes, donde figuran más elementos como el cromo [4].

Existe una clasificación de acuerdo a la basicidad de los fundentes [8][32]. Rowe y colaboradores definieron que las escorias tipo ácidas pueden producir más porosidad y gases del metal de soldadura que las escorias tipo neutras. Esto puede estar relacionado al grado de solubilidad de vapor de agua en las escorias [33].

Para este proyecto se tiene un fundente aglomerado con los elementos presentados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Composición química del fundente BF 6.30 [34]

$SiO_2 + TiO_2$	$Al_2O_3 + MnO$	$CaO + MgO$	CaF_2
20%	35%	20%	20%

- **Voltaje de arco**

El voltaje es la diferencia de potencial entre dos puntos para hacer fluir una corriente. Para este proceso, los rangos van de 13 a poco más de 40 V [4] [28][31]. Los resultados de aumentar el voltaje producen un ensanchamiento del cordón sin afectar significativamente la penetración. Un problema del uso de un alto voltaje es la dificultad para remover la escoria fundida de la soldadura [23], como se ilustra en la Figura 2.7.

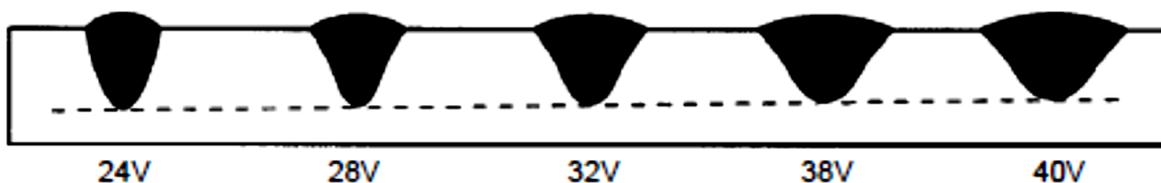


Figura 2.7 Efecto del voltaje en una soldadura [23].

- **Polaridad**

La polaridad de este proceso modifica los resultados de la profundidad y el ancho del cordón. En la industria se conocen la polaridad del electrodo directa positiva, directa negativa y alterna.

En la Figura 2.8 se muestran los efectos de estas, como en la polaridad directa positiva se muestra una mejor penetración, pero un cordón angosto, mientras que en la negativa no existe tal penetración, pero si un cordón más ancho. La polaridad alterna es una media, por lo que algunas manufactureras la ocupan para relleno en una soldadura por el proceso tándem. [35]

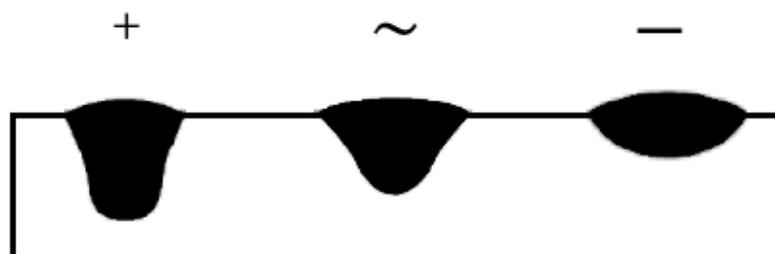


Figura 2.8 Efecto de la polaridad en una soldadura [23].

- **Corriente**

La corriente puede ocuparse de 100 hasta por encima de los 2000 A [4] [22] [28] [31]. Al aumentar la corriente, la penetración se vuelve más profunda pero puede ocasionar socavados en soldaduras de raíz [23]. La Figura 2.9 muestra los efectos que ocasiona el aumento de amperaje en una soldadura, como es una penetración más profunda y un ensanchamiento de la soldadura en el material base.

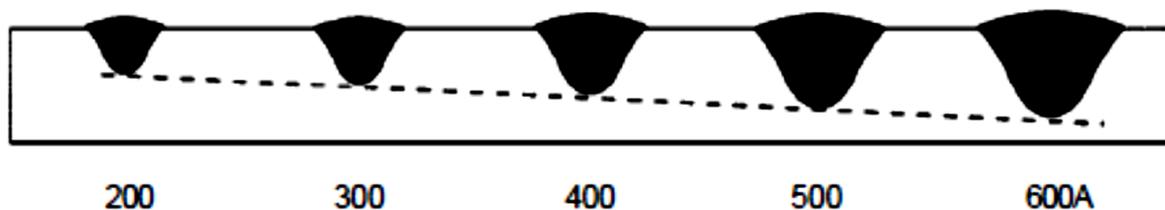


Figura 2.9 Efecto de la corriente en una soldadura [23].

- **Velocidad de avance**

La productividad que el proceso SAW da a la industria se transmite en una rápida velocidad de avance permitida, en relación a los otros procesos, lo que mejora los tiempos de ciclo para una empresa.

El uso de altas velocidades produce disminución en la cantidad de calor aportado e incremento en la velocidad de solidificación, lo que puede producir discontinuidades en la soldadura como la porosidad, inclusión de escoria y reducción en ancho y penetración del cordón como lo demostrado por Dhollander y colaboradores [36] y Alipooramirabad y colaboradores [11]. En la Figura 2.10 se muestra el efecto al disminuir la velocidad de avance en una soldadura, el cordón muestra una mayor afectación al material de trabajo, lo que provoca efectos en las propiedades mecánicas de la soldadura.

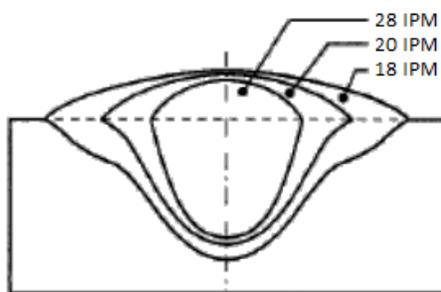


Figura 2.10 Representación esquemática del efecto de la velocidad de avance con respecto a la geometría del cordón [23]

Los parámetros de soldadura en este proceso deben ser estudiados para la comprensión de comportamiento del cordón ya que la interacción entre cada una de las variables mencionadas anteriormente puede tener una relación significativa en el comportamiento del enfriamiento de la soldadura. Costa y colaboradores [37] optimizaron parámetros eléctricos de la aplicación de una soldadura por medio de SAW en acero API 5L X70 de 13 mm. Sailender y colaboradores [38] obtuvieron parámetros de soldadura adecuados para soldar por SAW un acero ASTM A517 Gr. B de 8 mm. Podder y colaboradores [39] determinaron parámetros para generar un modelo de fuente de calor de doble elipse para SAW en aceros estructurales con espesores de 6 a 16 mm. Singh y colaboradores [40] soldaron un acero estructural de 12 mm obteniendo que la velocidad de alimentación de alambre al proceso es la variable más significativa. Murugan y Gunaraj [41] soldaron por SAW un acero 2062 con un espesor de 6 mm e identificaron que la velocidad de alimentación de alambre aumenta la

penetración, mientras que la velocidad de avance tiene un efecto negativo en la soldadura. Scutelnicu y colaboradores [42] simularon por medio del modelo de doble elipse una soldadura aplicando dos alambres en un acero API 5L X70 con espesor de 19.1 mm, donde indican que la distancia entre ambos alambres modifica la temperatura pico alcanzada en la unión. Alam y Khan [43] mencionan que el ancho del cordón aumenta con el voltaje y disminuye considerablemente al aumentar la velocidad de avance.

- **Transferencia de metal en el proceso de arco sumergido**

Estudios recientes [44] sugieren que existen 3 modos de transferencia del metal de aporte al charco de soldadura, los cuales dependen del valor de la corriente eléctrica. El primero es a una corriente baja el cual se denomina transferencia globular sin corto circuito, a una corriente mediana ocurrirá transferencia guiada por el fundente sin corto circuito y la última a una corriente alta será una transferencia guiada por el fundente con corto circuito. Este último sugiere que la gota del metal de aporte es lanzada hacia el fundente agresivamente para después caer al charco de soldadura.

Cuando la gota se genera por una alta corriente, ésta puede incidir con el material de aporte y generar el corto circuito lo que puede modificar el tamaño de la gota y el ancho del cortocircuito, provocando variaciones en el voltaje como en la corriente y desestabilizando el charco de soldadura.

- **Ventajas del proceso**

- Elimina las salpicaduras, flashes y humos
- Penetraciones muy profundas sin necesidad de preparar las orillas
- Se pueden lograr velocidades de avance y deposiciones altas
- El fundente protege al charco de soldadura de contaminantes externos
- Se pueden producir soldaduras con baja deposición de hidrógeno
- No se necesita de mucha técnica para manejar el proceso
- Se puede reutilizar el fundente, por lo que los consumibles se reducen

- **Desventajas del proceso**
 - Su uso se reduce a superficies planas u horizontales
 - La visión en el arco es imposible debido al fundente
 - Entre cada paso se debe limpiar perfectamente la zona del cordón
 - Su uso se promueve más para espesores mayores a 6.4mm.

2.3 Discontinuidades

De acuerdo a la literatura [8], el proceso SAW por la capacidad que tiene en manejar altas velocidades de avance y corrientes, le permiten tener una mejor penetración, pero esto ocasiona que se presenten defectos tales como falta de fusión, atrapamiento de escoria, agrietamiento en solidificación o por hidrógeno y porosidad.

2.3.1 Porosidad

Se define como la discontinuidad en forma de cavidad formada por el atrapamiento de gases durante la solidificación [45]. Muchas veces, esta discontinuidad es considerada poco peligrosa, pero los poros están compuestos por bordes tersos, redondeados o alargados que al solidificar pueden formarse colas agudas, lo que puede dar origen a una grieta.

Las causas de la existencia de porosidad son la humedad, la contaminación del área de la soldadura, la combinación inapropiada de elementos químicos en el charco de la soldadura, la corrosión presente en la pieza de trabajo, así como algunas técnicas del mismo proceso [3][8][46]. Su clasificación va en función a su forma y localización. Dentro de los contaminantes durante el proceso de fabricación de tuberías existen agentes externos que se ocupan previo a la soldadura, lo que ocasiona se introduzca entre la unión y aumente la probabilidad de generar porosidad.

En la Tabla 2.4 se muestran las temperaturas de evaporación de algunos agentes que promueven los elementos volátiles durante la soldadura.

Tabla 2.4 Temperaturas de evaporación de agentes contaminantes.

Producto	Temperatura de evaporación (°C)
Agua	100
Lubricante (Tribos semi 18M)	100-150
Aceite	120-200
Fundente (BF 6.30)	2500-3500 (1)
Nota (1): en base a las temperaturas de evaporación de sus componentes	

La literatura marca cuatro posibles formas de porosidad, cada una de ellas con diferente posición en la soldadura, mencionados a continuación [3] y mostradas en la Figura 2.11.

- Porosidad dispersa, generada por uso erróneo de los parámetros de soldadura o material defectuoso, formando gases atrapados durante la solidificación. Los parámetros que más afectan son la corriente y la velocidad de avance.
- Porosidad agrupada, causada por el inicio o paro de la soldadura inadecuada. El hecho de que permanezca en un punto el equipo hace que los parámetros afecten esa área y generen defectos como el mostrado en la Figura 2.11.
- Porosidad lineal, originada por la falta de limpieza entre cordones. Comúnmente en espesores gruesos donde se necesita más de un pase y la falta de limpieza se hace presente.
- Porosidad tubular o “huecos de gusano”, ocasionada por impurezas en la raíz. Esta es la única que tiene una relación entre la solidificación y el escape de gases como lo expuesto por Rybakov y colaboradores [47]

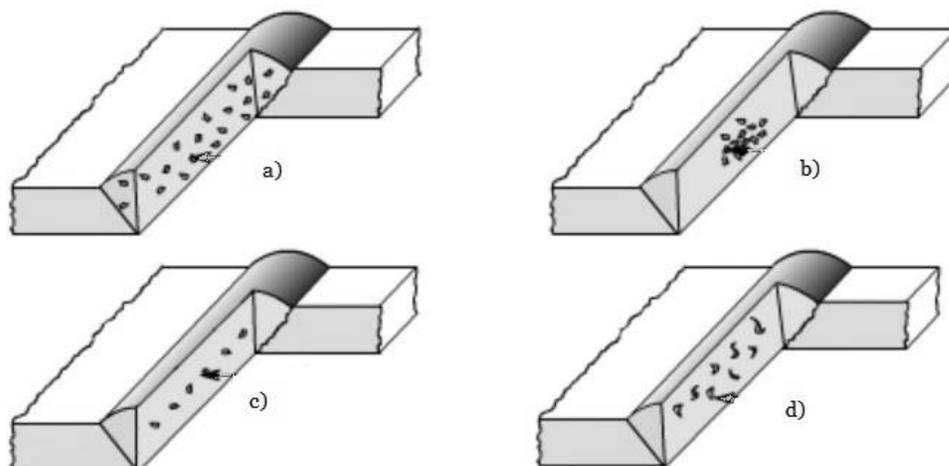


Figura 2.11 Tipos de porosidades que pueden presentarse en soldadura
a) dispersa, b) agrupada, c) lineal, d) tubular o wormholes [48].

Autores como Huang [49], Courtouis [50], Bunazir [51], Xu [52] y sus colaboradores han realizado estudios en el proceso laser, afirmando que la inestabilidad del charco de soldadura es una causa importante del atrapamiento de gases. Enfocando esto al proyecto, se toma en cuenta que el proceso SAW involucra un fundente que desciende por gravedad a la abertura que va en aumento acercándose a la orilla de las tuberías, incorporándose al charco líquido promoviendo la turbulencia y su inestabilidad; se sugiere tomar en consideración este fenómeno reportado por los autores antes citados.

2.3.1.1 Mecanismo de formación de la porosidad

La porosidad es una discontinuidad generalizada por el atrapamiento de burbujas de gas durante la solidificación de un material. Estas burbujas, se desplazan dentro del material mientras éste está por encima de su temperatura de fusión, involucrando variables como la presión del ambiente, la presión hidrostática del metal fundido y la presión de las burbujas de gas [53].

En soldadura, las variables que promueven la aparición de porosidad son la corriente eléctrica y la velocidad de avance de soldadura [54]. La primera, al aumentar, incrementa la temperatura del charco de soldadura haciendo que elementos químicos lleguen a volatilizarse y generen burbujas de gas.

La segunda, al ser mayor disminuye el calor de entrada lo que provoca un menor tiempo de solidificación del charco líquido e impide que los gases formados lleguen a salir a la superficie.

Otros factores pueden ser una mala limpieza en la unión a soldar, la corrosión y agentes externos que se introduzcan durante la soldadura al charco líquido, como es el caso del fundente en el proceso SAW [8].

El mecanismo de formación de porosidad involucra la descomposición de elementos químicos durante la soldadura, quienes deben su formación a la saturación de solubilidad de los mismos en el material o por reacción química [55][56].

Durante el calentamiento de la zona, líquidos como el agua, grasas, lubricantes, entre otros pueden descomponerse al sobrepasar la temperatura de evaporación del fluido, generando gases que de acuerdo a la cinética de evaporación y el tiempo de solidificación podrían quedar atrapados en la soldadura [53].

La cinética de evaporación involucra la velocidad con la que un compuesto puede volatilizarse en el sistema [57], así como el cambio de masa durante un tiempo determinado [58] y también se puede estudiar el tiempo de elevación dentro del sistema [53].

Al aumentar la temperatura en un sistema provoca que los compuestos del mismo tiendan a cambiar de estado, pudiendo pasar de un estado sólido inicial hasta llegar a un estado gaseoso, el cual generará gases que puedan quedar atrapados en el charco de soldadura. Este fenómeno lo han estudiado distintos autores, a partir de la formulación de Hertz-Knudsen [58], el cual por medio de la siguiente fórmula se puede obtener la cantidad de masa evaporada de un compuesto:

$$\dot{n}_{evap} = \frac{p^o - p}{\sqrt{2\pi MRT}} \quad (2)$$

Donde la \dot{n}_{evap} es el flujo molar del cambio de estado líquido a gaseoso, p es la presión por encima de la fase líquida, M es el peso molecular, R es la constante

de los gases ideales, T es la temperatura absoluta en la superficie de evaporación, p^o es una presión estándar de vapor calculada a partir de

$$\log p^o = A/T + B \log T + CT + D \quad (3)$$

Donde A, B, C y D son valores constantes que dependen de la sustancia. Autores citan que pueden obtenerse la evaporación de cierta cantidad de masa por medio experimental en base en la temperatura [59].

Smith [60] estudió la evaporación del acero al vacío por medio de la medición de la masa inicial y final del compuesto durante un lapso de tiempo determinado, obteniendo la masa perdida a temperaturas conocidas de calentamiento y enfriamiento del material. Xu [52] estudió la formación de porosidad en un acero inoxidable 316L, donde comentó que la formación de porosidad puede deberse a un diferencial entre la presión del metal líquido y la presión del vapor generado en la soldadura, en donde esta última es afectada por la inestabilidad del charco líquido. Zhu [61] concluye en su trabajo sobre el análisis de aberturas de raíz en aluminio que la porosidad puede deberse a un patrón de movimiento de flujo no adecuado y que el amperaje es un factor que afecta dicho patrón.

Eagar y colaboradores [62] investigaron la cinética de evaporación del aluminio en el acero inoxidable e indican que es difícil obtener todo el contenido de masa debido a la condensación de alguna parte de ese gas durante el enfriamiento del material. Ogasawara [63] comentó en un experimento de aleaciones Ni-Ti que, si la velocidad de evaporación (V) es constante durante un experimento, se considera que

$$V = \alpha \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} P = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} \quad (4)$$

Donde P es la presión de vapor, $\Delta m / A \cdot \Delta t$ es el cambio de masa con respecto al tiempo a través de un área experimental y α es el coeficiente de evaporación

que oscila entre $0 < \alpha \leq 1$ dependiendo de la limpieza del sistema y de la volatilidad de los compuestos [64].

Si se quisiera conocer la velocidad de desplazamiento (v) de una burbuja de gas con un radio conocido (r) en forma ascendente por el charco líquido se necesitaría conocer la densidad (ρ) y la viscosidad (η) a cierta temperatura del charco líquido para poder estimar dicha velocidad, sin tomar en cuenta si el flujo es laminar o turbulento [65], formulado de la siguiente manera:

$$v = \frac{4 \cdot \rho \cdot g \cdot r^2}{27 \cdot \eta} \quad (5)$$

Donde g es la gravedad, 9.81 m/s^2 . Observando que a mayor radio de burbuja se obtendrá una mayor velocidad de ascenso, por lo que será menor el tiempo necesario para atravesar un espesor conocido, como se muestra en la Figura 2.12.

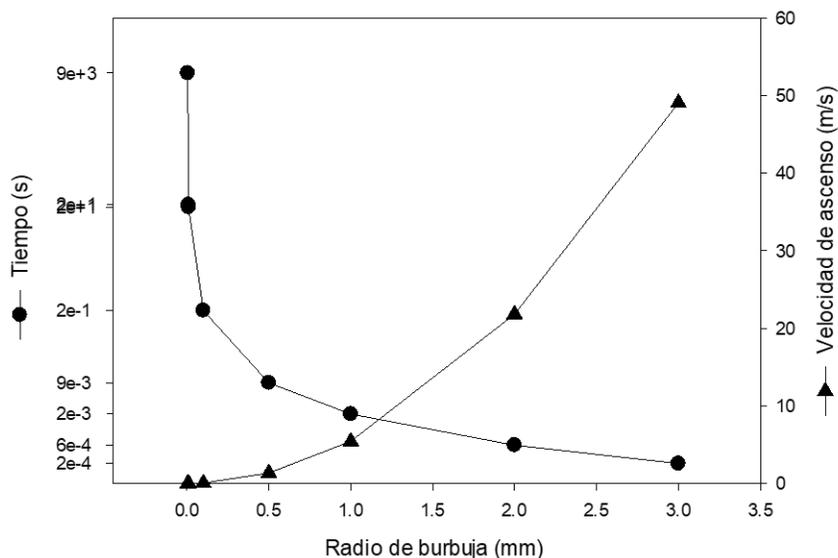


Figura 2.12 Relación entre el radio de burbuja con respecto a la velocidad de ascenso y el tiempo [65].

El mecanismo de formación es generado a partir de la aparición de burbujas de gas, las cuales tienen una nucleación, un crecimiento y un movimiento dentro

del charco de soldadura que puede llegar a salir del líquido o quedar atrapado en forma de porosidad [53].

La nucleación de una burbuja se produce cuando la suma de las presiones parciales de gases solubles (P_g), sobrepasan las presiones involucradas en el proceso, entendido esto de la siguiente manera:

$$P_g > P_a + P_h + P_b \quad (6)$$

Donde P_a es la presión atmosférica, P_h es la presión hidrostática, que solo para soldadura submarina se considera, y P_b es la presión debido al radio del poro y la tensión superficial. Ésta última se da a partir de la siguiente ecuación:

$$P_b = \frac{2\gamma}{r} \quad (7)$$

Donde γ es la tensión superficial entre el metal líquido y el gas en el poro, y r es el radio del poro.

Una vez obtenida una presión estimada mayor que la sumatoria de las presiones mencionadas en la ecuación 6, en base en la ecuación de los gases ideales se puede estimar la masa necesaria de ese gas para generar cierto radio de burbuja

$$m = \frac{P \cdot V \cdot M}{R \cdot T} \quad (8)$$

Donde V es el volumen de la burbuja estimada.

Legait [9] expone que los gases generados pueden tener cierta solubilidad en el charco líquido, sin embargo, una vez saturado el líquido, el vapor generado necesitará de una superficie para poder generar el poro.

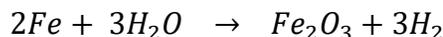
Para el crecimiento del poro se necesitan cumplir ciertos factores como lo son una presión considerable y tensión superficial en el poro, el gas contenido dentro del charco líquido, la presión que ejerce el charco líquido durante la soldadura y la presión del arco de soldadura. $\frac{dr}{dt}$ es la variación del desplazamiento en las paredes de la cavidad que se está expandiendo de r_0 a r_1 , formulado de la siguiente manera:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{2}{3} \cdot \frac{(P_g - P_a - P_{arc} - P_h - P_b)(r_1 - r_0) - 2\gamma}{\eta} \quad (9)$$

Donde η es el coeficiente de viscosidad, P_{arc} es la presión que ejerce el arco eléctrico sobre el charco líquido, r_0 es el radio inicial, r_1 es el radio final del poro. De acuerdo a las variables del calor de entrada en una soldadura el radio del poro será controlado en base en el tiempo donde el metal se encuentre en estado líquido.

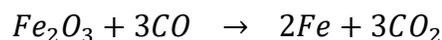
La descomposición de elementos químicos derivados de los fluidos a partir de llegar a su temperatura de evaporación, pueden formar moléculas de gas que lleguen a generar porosidad en una soldadura. De acuerdo a su estequiometría se muestran los casos siguientes:

Del hierro al combinarse con el agua, después de un ciclo térmico a altas temperaturas produce:



Donde el H_2 es la molécula de hidrógeno, elemento que puede producir agrietamiento en un metal [17] y el Fe_2O_3 es el óxido que aparece en el acero tras su exposición al aire durante tiempo.

Para cuando se está soldando, existen altas temperaturas donde elementos como el óxido férrico y monóxido de carbono se presentan y se pueden descomponer de la siguiente manera:



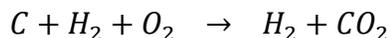
Donde Fe es el hierro y CO_2 es dióxido de carbono, gas que puede quedar atrapado en una soldadura.

Cuando exista humedad, el agua al elevar la temperatura durante la soldadura se descompondrá de la siguiente manera:



Encontrando hidrógeno (H_2), mencionado anteriormente, y oxígeno (O_2), otro gas que puede quedar atrapado en forma de porosidad.

Dentro de los contaminantes se encuentran los lubricantes que se conforman en su mayoría por aceites que están compuestos mayormente por cadenas de carbono (C) e hidrógeno (H_2) que al llegar a una temperatura de evaporación, estos se separan produciendo lo siguiente al entrar en contacto con el oxígeno (O_2)



Los demás compuestos que se presentan en los lubricantes [66] después de una temperatura de 400 °C se evaporan y pueden encontrarse atrapados en forma de gas dentro de la soldadura.

El azufre (S) es un elemento que se encuentra en el ambiente, en los fundentes y en los aceros, el cual volatiliza al estar el acero en estado líquido [8]. El fundente del proceso SAWL puede contener elementos que promueven el atrapamiento de este elemento para evitar la formación de gases en la soldadura [67].

Naumov [68] menciona que la interacción entre CaS con el CaF_2 y el O_2 forman una escoria de CaO y SF_6 en forma gaseosa por encima de 1600 °C. Obteniendo durante la solidificación, atrapamiento de gases en la escoria debido a que en la interacción entre el CaS y el O_2 , el CaO es formado y el gas SO_2 es absorbido por la misma.

2.3.2 Métodos de detección de las discontinuidades

Los métodos para la detección de una discontinuidad en las tuberías hoy en día son efectivos por mínimo que sea ésta. El tamaño mínimo de defecto que debe o puede ser detectado depende de los siguientes factores:

- El tipo de fluido que se transporta, como en la industria petrolera en donde es muy común el ácido sulfhídrico el cuál es una causante de corrosión interna.
- La precisión del sistema de medición empleado, así como de la exactitud de los transductores de temperatura y presión.

- Diámetro, espesor y longitud de la tubería ya que los sistemas de detección de discontinuidades se limitan a ciertas características del producto a ser inspeccionado.
- La condición de fluido, permanente o intermitente.

2.3.2.1 Radiografía industrial

La radiografía es una técnica de inspección no destructiva la cual lleva su principio en la radiación de energía capaz de penetrar una pieza y así observar en una película o papel fotosensible la densidad con que ésta pasa en un determinado tiempo [69], este ensayo se puede practicar con rayos X o gamma, donde los primeros transforman la energía cinética de electrones libres en radiación electromagnética y los segundos se crean a partir de la emisión de partículas que genera la radiación electromagnética.

Los rayos gamma pueden ser irradiados por isotopos como Cesio 137, Cobalto 60 e Iridio-192 para así observar las discontinuidades presentes en una soldadura [69], pero esta irradiación va en decremento con el paso del tiempo de manera logarítmica ya que por ejemplo el Iridio-192 tiene una vida media de 75 días.

Las discontinuidades que se detectan con esta técnica pueden ser grietas, inclusiones de tungsteno, faltas de fusión, faltas de relleno, exceso de raíz, concavidad de cara de la soldadura, socavados, falta de penetración, concavidad de raíz, inclusiones de escoria y porosidad [3]. Esta última también se le conocen como indicaciones redondeadas, y es que estas se pueden confundir con las inclusiones de escoria. Se sabe que la porosidad puede presentarse principalmente de cuatro maneras anteriormente mencionadas. Algunas de ellas se ilustran en la Figura 2.13.

La radiografía es la técnica donde más precauciones se deben tomar ya que la constante exposición a los rayos gamma o X pueden causar desde lesiones en el cuerpo hasta la muerte. Se mencionan algunas ventajas y desventajas de esta técnica en la Tabla 2.5.

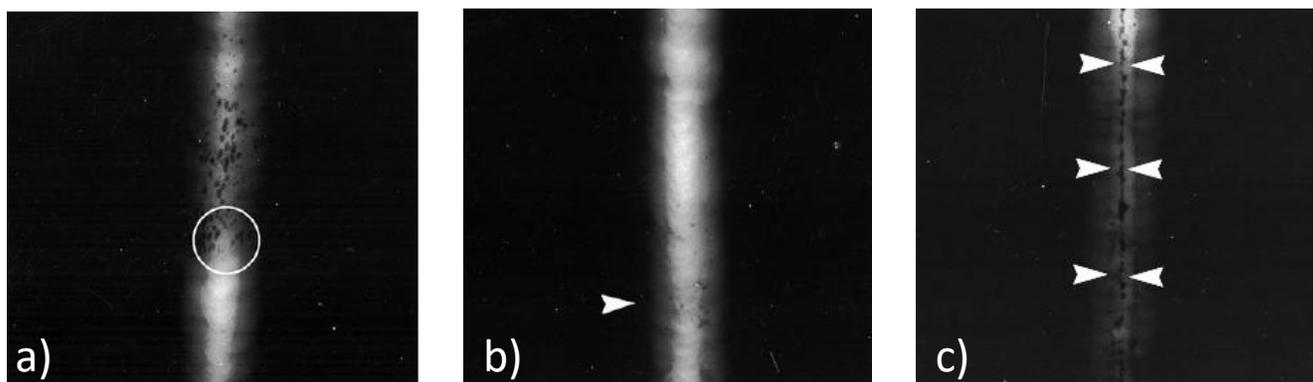


Figura 2.13 Imágenes radiográficas de tipos de porosidad en cordones de soldadura a) agrupada b) dispersa c) lineal [3].

El procedimiento de esta técnica va en función de lo siguiente:

- El espesor y densidad del material
- Características de absorción del material
- Tiempo disponible para inspección
- Localización de la junta soldada.

Tabla 2.5 Ventajas y desventajas de la técnica de radiografía industrial.

Ventajas de la técnica	Desventajas de la técnica
<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser utilizada de en tiempo real por medio de pantallas fluorescentes • La capacidad de penetración es mayor a los métodos convencionales de END • Detección de discontinuidades superficiales e interna • Puede ser usado para cualquier material 	<ul style="list-style-type: none"> • Es relativamente caro • Largos tiempos de trabajo en campo • Puede causar desde lesiones menores hasta la muerte al personal • Personal debe ser capacitado detalladamente • Las laminaciones no se pueden observar

2.4 Flujo de calor en soldadura

Los procesos de soldadura están basados en la focalización de energía en un punto, el cual hace incidir calor a través del material a ser soldado, ya sea con aporte o sin aporte de material, generando transformaciones de estados de la materia y así modificar las propiedades metalúrgicas y mecánicas de los materiales.

En soldadura, estas transformaciones se realizan en un periodo corto de tiempo, como lo menciona Grong [70] que en aceros existen características como:

- Altos picos de temperatura, °C
- Altos gradientes de temperatura, localmente hasta $10^3 \text{ }^\circ\text{C mm}^{-1}$
- Altas fluctuaciones de temperatura, localmente hasta $10^3 \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$

El flujo de calor generado durante la soldadura es responsable de cambios físicos y mecánicos en el material base; la eficiencia de cada proceso debe ser tomada en cuenta y es definida en la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Q}{Q_{nominal}} \quad (10)$$

Donde η es la eficiencia de la fuente de calor aplicada sobre el material base, ésta se conoce debido a diferentes estudios y la literatura los marca como se muestra en la Tabla 2.2. La Q es el calor transferido de la fuente de calor a la pieza de trabajo y el $Q_{nominal}$ para un proceso por arco eléctrico se conoce como:

$$Q_{nominal} = V \times I \quad (11)$$

Donde la V es el voltaje suministrado por la máquina de soldar así como la I es la corriente eléctrica. Con esto se llega a la ecuación de calor de entrada en un proceso de soldadura por arco eléctrico como se muestra a continuación:

$$Q = \eta \frac{V I}{v} \quad (12)$$

Para la cual la Q será expresada en (J/mm) y la v será la velocidad de avance en (mm/s) en un proceso de soldadura.

2.4.1 Transferencia de calor

Fourier definió la ecuación básica para el análisis de la transferencia de calor por medio de conducción, donde se considera la densidad de flujo de calor, la cual depende del gradiente de temperatura, fenómeno que ocurre durante la conducción de calor. A continuación, se muestra la ecuación que gobierna dicho fenómeno:

$$q = -\lambda \frac{\delta T}{\delta n} \quad (13)$$

Donde q es la densidad del flujo de calor expresada en $(\frac{J}{m^2s})$, λ es el coeficiente de conductividad térmica expresada en $(\frac{W}{mK})$, el cual es definido más adelante, y $\frac{\delta T}{\delta n}$ es el gradiente de temperatura expresado en $(\frac{K}{m})$.

En soldadura, un factor importante es la velocidad de avance, como se muestra en la ecuación 14, el cual entre mayor es, el calor de entrada disminuye, por lo que el tiempo en las ecuaciones de transferencia de calor es indispensable para poder obtener resultados esperados. Grong [70] define esto de la siguiente manera para un solo eje:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (14)$$

En la cual T es la temperatura expresada en (K), t es el tiempo en (s), x es la dirección de la soldadura en (mm) y α es la difusividad térmica expresada en $(\frac{m^2}{s})$, la cual depende de la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \rho} \quad (15)$$

Donde c es el calor específico expresado en $(\frac{J}{mK})$ y ρ es la densidad del material en $(\frac{kg}{m^3})$.

Pero, donde la transferencia de calor se modela en estado transitorio, es decir, en los tres ejes (x, y, z), se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \left[\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right] \quad (16)$$

2.5 *Diseño de experimentos*

En soldadura, los diseños de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) son una herramienta que permite conocer el fenómeno que se está presentando a partir del cambio en las variables de entrada al proceso estudiado. Cada resultado analizado mediante métodos estadísticos depende directamente del diseño empleado.

Para un diseño de experimentos se deben tomar en cuenta características como la aleatorización y la repetitividad. La primera, según Montgomery [71], la más importante, ya que ésta da certidumbre a los resultados obtenidos debido a resultados más válidos.

Para la aplicación de un diseño de experimentos se deben seguir los siguientes pasos [71]:

- Reconocimiento y definición del problema
- Selección de la(s) variable(s) de respuesta(s)
- Determinar los factores y niveles para el DOE
- Realizar la experimentación
- Realizar el análisis estadístico de la información
- Hacer conclusiones y recomendaciones

El análisis de la información que arroja un DOE sirve para determinar un modelo que incluye parámetros que resultan de este análisis. De igual manera, este análisis es fundamental para observar la significancia de cada factor sobre el experimento.

El valor P es un estimado que se compara con el nivel de significancia (α) necesario de acuerdo a lo establecido por el usuario. Típicamente el valor de " α " debe ser menor a 0.05 o 0.01; es claro que entre más pequeño es este valor, será más cerrado el experimento [72]. En otras palabras, esta comparación funciona para descartar o aceptar la hipótesis nula de una prueba.

Los estudios relacionados con soldadura siempre buscan obtener modelos que generen mejores propiedades para el cordón de soldadura. Sharma y colaboradores [73] realizaron un modelo matemático el cual se validó con distintos experimentos, encontrando que la corriente eléctrica y la velocidad de avance son las variables más significativas en su modelo. Por medio del diseño factorial autores como Gunaraj [74], Narang [75], Kiran [76] y Om [77] llegaron a la conclusión de que la corriente es la variable que mayor afecta el proceso SAW. Autores como Tarnng [78] y Sharma [79] por medio del método de Taguchi optimizaron los parámetros de soldadura. Kanjilal [80] y Kumar [81] abordaron la optimización de los elementos en el fundente para mejorar la calidad de la soldadura y, Raja [82] y Ghosh [83] utilizaron técnicas analíticas no convencionales para obtener parámetros óptimos para el proceso SAW.

2.5.1 Diseño factorial

En un diseño factorial se llevan a cabo cada una de las interacciones posibles entre los niveles de cada factor a estudiar, esto mostrado en una matriz de diseño. El efecto de cada factor en la variable de respuesta es llamado efecto principal debido a la modificación directa que tiene el primero con el segundo [71]. Además de los efectos principales, el diseño factorial muestra el cambio en la variable de respuesta que puede resultar de la interacción entre los factores. Cada uno de estos valores generan un modelo de regresión, el cual se describe generalmente de la siguiente manera:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \cdots + \beta_nx_n + \epsilon \quad (17)$$

Donde y es la respuesta, β 's son parámetros que deben ser determinados a partir del DOE, cada x representa cada uno de los factores y ϵ es el término del error aleatorio.

Una ventaja del diseño factorial completo es el reconocimiento del proceso al realizar todas las posibles interacciones entre los factores [71]. Pero tiene como desventaja el tiempo de estudio ya que esto genera un mayor número de pruebas en comparación con otros diseños. Este diseño tiene la capacidad para incluir puntos centrales a partir de los niveles de cada factor, mejorando la linealidad del modelo.

2.3.2.2 Diseño factorial completo con puntos centrales

Un diseño factorial completo es aquel que no discrimina ninguna interacción entre los niveles de cada factor. Como se menciona arriba, los puntos centrales ayudan a mejorar la linealidad de los resultados. La adición de estos puntos en la fórmula del modelo se muestra a continuación:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (18)$$

Donde la primer sumatoria es cada uno de los parámetros y los efectos principales, la segunda representa la suma de cada interacción entre los niveles de cada factor y su parámetro y ϵ que representa el error aleatorio.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

La metodología propuesta para la realización de la investigación sobre el análisis de la aparición de porosidad en los extremos de tubería de acero API 5L X70 PSL 2 se dividió en cuatro etapas principales con la intención de representar el fenómeno a estudiar y poder analizar su formación, etapas que se describen gráficamente en la Figura 3.1.

➤ **Primera Etapa: Definición de variables**

Tuvo como objetivo principal conocer el fenómeno a estudiar, lo que se ha investigado acerca de su formación y qué ha realizado la planta, con quien se trabaja en conjunto, para poder mitigar su aparición en los extremos de la tubería. Teniendo estas consideraciones, se desarrollaron distintas pruebas en planta para poder encontrar el procedimiento que mitigara la aparición de porosidad en los extremos de las tuberías soldadas sin afectar el ciclo del proceso productivo.

➤ Segunda Etapa: Diseño de experimentos

Una vez definida la primera etapa, se prosiguió con establecer las variables del diseño de experimentos (DOE) que se realizó a nivel laboratorio, las cuales se muestran en la Tabla 3.1.

Para poder realizar dicho DOE, se inició con la calibración de la máquina Lincoln NA-5 a fin de establecer los parámetros eléctricos que se ocupan de acuerdo a la especificación del procedimiento de soldadura (WPS, por sus siglas en inglés) de la planta. Seguido de esto se ejecutó el DOE realizando las uniones soldadas con placas de 18 mm de espesor, así como con medidas de 355 mm de largo por 177.5 mm de ancho para obtener un cupón de 355 x 355 mm de acero API 5L X70 PSL 2, donde en las probetas 1,2,3,6,7,8,11,12 y 13, se colocaron termopares para obtener el comportamiento térmico del material durante la soldadura, cabe mencionar que las probetas faltantes tienen los mismos parámetros que la probeta 2 por lo que no se instrumentaron.

Obtenidas las probetas soldadas, se evaluaron por medio de Radiografía industrial por rayos X con equipo de la planta TUBACERO S. de R.L. de C.V. para obtener el porcentaje de discontinuidades en una longitud central de 150 mm seccionada cada 5 mm.

Por último, se analizaron los resultados por medio del software Minitab para determinar la influencia de cada variable de entrada en el porcentaje de aparición de porosidad usando como variables de entrada la abertura de raíz, la quema de residuos en la unión y la velocidad de avance, y de salida fue el porcentaje de aparición de porosidad en el análisis.

Tabla 3.1 Datos para elaboración de matriz de diseño de experimentos.

Factorial completo (2^3) con 6 puntos centrales Total: 14 corridas		
A=quema de residuos (25 y 200 °C)	B= abertura de raíz (0 y 4 mm)	C=velocidad de avance (760 y 1140 mm/min)

➤ Tercer Etapa: Caracterización

En esta etapa, se realizaron distintas técnicas de caracterización para poder analizar los cordones soldados de acuerdo a lo obtenido en el DOE. Inicialmente se obtuvieron macrografías de los cupones seleccionados en base en las placas radiográficas para observar su geometría y así tomar las medidas del ancho del cordón para introducir en el CAD que se necesita para la simulación térmica. Seguido de esto, en base en las placas radiográficas se tomaron 2 muestras donde existía porosidad para poder analizar dicha aparición, utilizando el microscopio óptico y el microscopio electrónico de barrido.

➤ Cuarta Etapa: Estimación de la masa necesaria para generar una burbuja de gas

A través de la búsqueda bibliográfica se encontraron fórmulas de distintos autores, las cuales se utilizaron para explicar el mecanismo de formación de una burbuja de gas y relacionar la masa necesaria para generarlo. Una vez obtenido esto, se buscó el espesor necesario de mancha en el sistema para generar dicha burbuja en base en las fórmulas.

➤ Quinta Etapa: Simulación térmica

Por medio de GAMBIT se inició con el CAD de las geometrías seleccionadas de los cordones donde no se encontró porosidad, prueba 3, y donde se encontró el mayor porcentaje de la misma, prueba 1. En estas se construyó lo siguiente:

- las dimensiones específicas del volumen del cordón de soldadura
- el material base
- cada fuente de calor que transmitió el calor hacia el volumen del cordón de soldadura

Seguido de esto se trabajó en la densidad de malla adecuada para la simulación. Malla que se exportó a Fluent, del software ANSYS, para poder iniciar la simulación.

La simulación se realizó con las propiedades del material dependientes de la temperatura para fines de estudio térmico. Hecha la simulación, se obtuvieron perfiles térmicos en los puntos similares a las distancias entre el cordón de soldadura y cada corrida experimental con termopares para observar la distribución térmica a lo largo de la soldadura.

Una vez hecho todo lo anterior, se realizó la discusión de los resultados para dar a conocer los efectos mejor relacionados al análisis de la aparición de la porosidad, así como el comportamiento térmico de la soldadura a través del simulador.

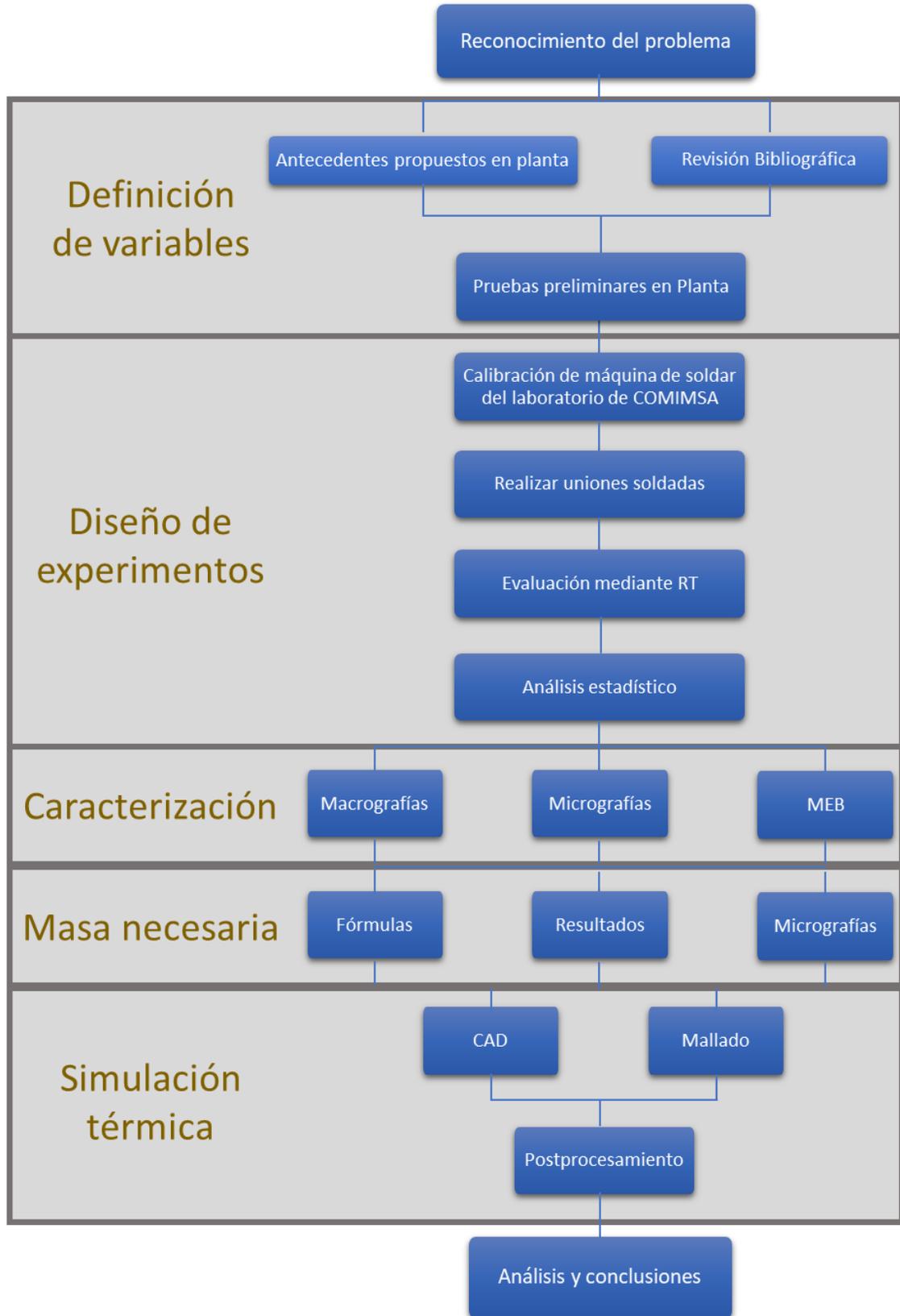


Figura 3.1 Diagrama de metodología.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

A continuación, se detalla lo realizado para poder llevar a cabo la parte experimental con el objetivo de analizar los fenómenos presentes en la unión soldada y poder minimizar la porosidad presentada en los extremos de las tuberías fabricadas para el transporte de hidrocarburos.

Por medio de la instrumentación de los cupones soldados utilizados para hacer un análisis por medio de un DOE, se obtuvieron curvas del comportamiento térmico a lo largo del tiempo. Dichas curvas se usaron en la validación de la simulación propuesta con FLUENT.

Un análisis previo determinó que la abertura de raíz y la limpieza de la unión influían sobre la calidad de la unión, realizando lo siguiente:

4.1 Pruebas preliminares

La revisión bibliográfica indica que la porosidad es promovida por la inestabilidad en el charco de soldadura [50][52][84], efecto similar que pudiera suceder al modificar la abertura de raíz en los extremos de las tuberías. Otro problema es la suciedad en la junta a soldar debido a procesos anteriores de manufactura [3][8] y la velocidad de avance [36][47][54]. A fin de corroborarlo, se consideraron estas variables en este proyecto.

4.1.1 Modificación de la abertura de raíz

Para este análisis a nivel laboratorio se partió de una placa de 13 mm de espesor la cual fue soldada a diferentes aberturas de raíz manteniendo constantes los parámetros presentados en la Tabla 4.1. Estos parámetros fueron obtenidos de corridas preliminares que se realizaron en laboratorio hasta llegar a los especificados por el WPS de la planta. La abertura se modificó de estar a tope hasta 4 mm a una velocidad constante de 760 mm/min.

La manera en que se obtuvieron las muestras para su análisis macrográfico fue mediante corte con sierracinta, desbaste con lijas desde grado 60 hasta 1200 y pulido con pasta de diamante de 1 μm . En la Figura 4.1 se muestran las medidas del ancho (1), zona afectada por el calor (2) y la dilución (3) del cordón superior e inferior aplicados.

Tabla 4.1 Valores de los parámetros utilizados en la prueba.

Voltaje	Corriente eléctrica	Velocidad de alambre	Separación de alambre con pieza
40 V	900 A	3,175 mm/min	22 mm

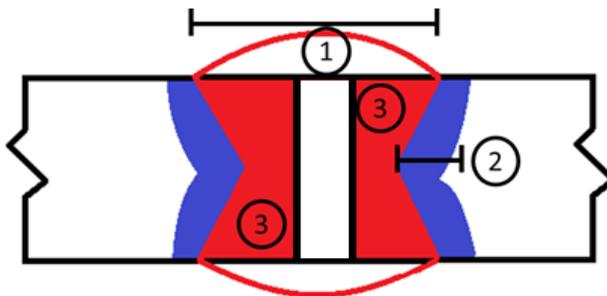


Figura 4.1 Representación esquemática de las mediciones realizadas a las muestras de la prueba de la abertura de raíz.

4.1.2 Limpieza de la unión en planta

Se experimentó con técnicas que ayudaron a eliminar la suciedad acumulada de procesos anteriores en los extremos de las tuberías ya que esto promueve la porosidad.

Se evaluaron las siguientes acciones correctivas:

- Aplicar en la junta una flama por un minuto para evaporar residuos.
- Verter un solvente en la unión para disolver los residuos.
- Realizar de forma manual un corte con un disco de 1.6 mm.
- Fundir el material del extremo por medio de plasma

Posteriormente fueron muestreados los tubos y se analizaron mediante radiografía industrial por rayos X como se describe en la sección 4.5. Cabe indicar que estas pruebas se llevaron a cabo en campo y se obtuvo información de frecuencia de defectos.

4.2 *Diseño de experimentos*

Determinados los parámetros con las pruebas preliminares se planteó un diseño de experimentos, el cual consiste en un diseño factorial de 2^3 con 6 puntos centrales. El diseño se realizó a través del software Minitab. En las Tablas 4.2 y 4.3 se muestran los factores y sus niveles para este DOE, con un total de 14 corridas.

Tabla 4.2 Matriz de diseño para corridas experimentales.

Parámetro de entrada	Unidades	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
Quema de residuos (A)	°C	25	112.5	200
Velocidad de Avance (B)	mm/min	760	950	1140
Abertura de raíz (C)	mm	0	2	4

Tabla 4.3 Corridas experimentales.

Aleatorización	Puntos centrales	Valores reales			Valores codificados		
		Quema	Velocidad	Abertura	Quema	Velocidad	Abertura
8		200	1140	4	1	1	1
12	x	112.5	950	2	0	0	0
2		200	760	0	1	-1	-1
9	x	112.5	950	2	0	0	0
11	x	112.5	950	2	0	0	0
4		200	1140	0	1	1	-1
1		25	760	0	-1	-1	-1
7		25	1140	4	-1	1	1
10	x	112.5	950	2	0	0	0
14	x	112.5	950	2	0	0	0
6		200	760	4	1	-1	1
3		25	1140	0	-1	1	-1
5		25	760	4	-1	-1	1
13	X	112.5	950	2	0	0	0

4.3 Preparación de probetas

TUBACERO S. de R.L. de C.V. proporcionó el material suficiente para realizar las pruebas de soldadura en base al DOE, obteniendo 30 piezas de 355 x 177.5 mm cortadas con oxiacetileno. Inicialmente se cortaron los extremos más largos de las placas por medio de sierracinta para obtener material recto y limpio. Posteriormente se esmerilaron las caras previamente cortadas para eliminar las líneas de corte, ya que estas pueden generar discontinuidades.

En base en las corridas preliminares, apartado 5.1, se decidió colocar los barrenos a una distancia mínima de 0.67 pulgadas. En la Figura 4.2 se muestran las posiciones en las cuales se colocaron estos, así como la numeración de cómo se trabajaron para la adquisición de datos.

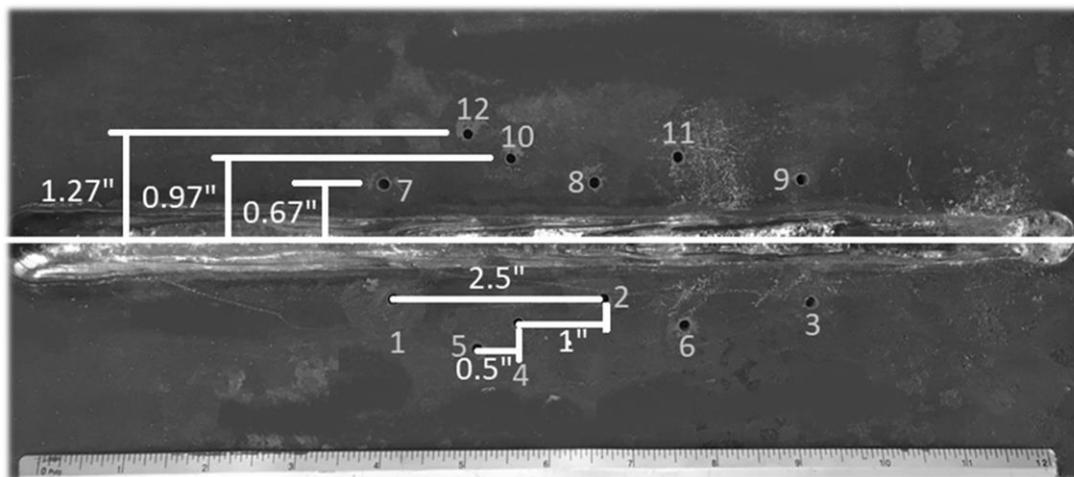


Figura 4.2 Colocación y numeración de termopares.

Una vez obtenidas las placas barrenadas se soldaron por medio de GMAW con una máquina Miller de acuerdo a los parámetros mostrados en la Tabla 4.4, para dejar el respaldo previo a la soldadura por SAW. Se aplicó lubricante sobre la zona de unión, el cual se dejó por un lapso de 24 horas y después se aplicó flama para eliminar la mayor cantidad de contaminantes en la unión, en base en el DOE.

Tabla 4.4 Parámetros de soldadura por GMAW para respaldo.

Parámetros de entrada	Unidades	GMAW
Amperaje	A	150-190
Voltaje	V	17-21
Velocidad de soldadura	mm/s	6.35-7.65
Gas de protección		CO_2
Velocidad de alimentación	mm/s	3988
Stick out	Mm	9.9
Flujo de gas	L/min	14.2

Para la instrumentación se ocuparon 12 termopares tipo K calibre 30 AWG, los cuales manejan un rango de temperatura de -200 a 1250 °C [85]. Se colocaron en los barrenos de cada placa dentro de un tubo cerámico para evitar lastimarlos, como se observa en la Figura 4.3, aplicando silicato de sodio para fijarlos y dejando fraguar por un día.

La velocidad de adquisición de datos fue de 50 datos por segundo por medio de la tarjeta electrónica de 16 canales marca National Instruments modelo 23GF de 16 bits de resolución. Se realizó un promedio de los datos usando el software Matlab para obtener un dato por segundo por cuestiones de velocidad en el manejo de los datos.

Con estas curvas se realizó la comparación entre las variables más significativas en base en el DOE, así como también se indagó en la posible relación entre los puntos de inflexión y la aparición de porosidad dentro del metal de soldadura. Por último, se realizó el análisis entre las curvas obtenidas mediante la instrumentación, con el objetivo de explicar la formación de la porosidad de forma indirecta.

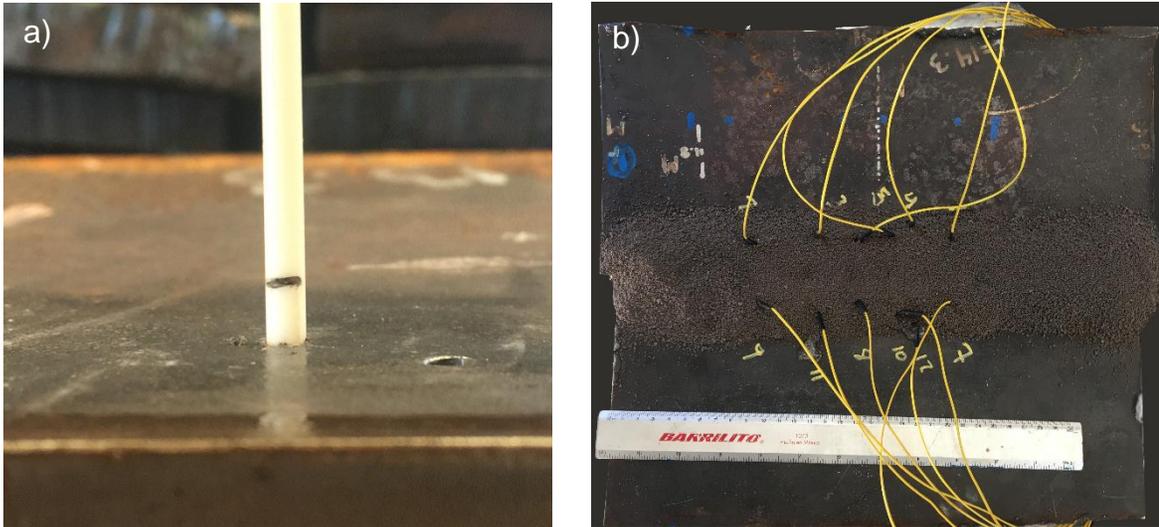


Figura 4.3 Instrumentación con termopares a) tubo cerámico para protección de cables y b) placa instrumentada.

4.4 Calibración de máquina SAW en laboratorio

El desarrollo experimental del DOE se realizó en COMIMSA usando el proceso SAWL. Los parámetros que permanecieron constantes para las pruebas del DOE fueron calibrados sobre placas con características similares a las de la experimentación para minimizar las variables inherentes al proceso que pudieran afectar los resultados.

Por medio de una máquina IDEALARC DC 1000 se soldaron varias pruebas hasta llegar a los parámetros eléctricos necesarios para obtener los parámetros ocupados en planta y así poder realizar dichas pruebas. Los parámetros en máquina se enlistan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Parámetros en máquina para realizar las pruebas de soldadura.

Parámetros de entrada	Unidades	SAWL
Voltaje	V	40 V
Amperaje	A	1000-1080 V
Velocidad de alambre	in/min	150-155
Velocidad de avance	in/min	30-45
Distancia entre electrodo y metal base	in	22 mm
Fundente		BF 6.30 [34]

4.5 Radiografía industrial

Las probetas soldadas en base en el DOE, se examinaron por medio de radiografía por rayos X. Se usaron para ello placas de bromuro de plata de 405 mm con una exposición a 192 kV y 4.5 mA por 4 minutos. En la Figura 4.4 se muestra la máquina con la que se realizaron dichas pruebas.



Figura 4.4 Equipo para radiografía industrial. (Cortesía de TUBACERO)

Para cuestiones de calidad de la imagen se utilizó un alambre del set B, entre 6 y 8, de acuerdo a la Sección V del código ASME “Examinación no destructiva” [86]. Por medio del densitómetro se comprobó que existió una densidad entre 1.5 y 2.5 la cual es aceptable. Las placas obtenidas fueron evaluadas a fin de cuantificar las discontinuidades por área mediante el negatoscopio. Ambos aparatos se pueden observar en la Figura 4.5.

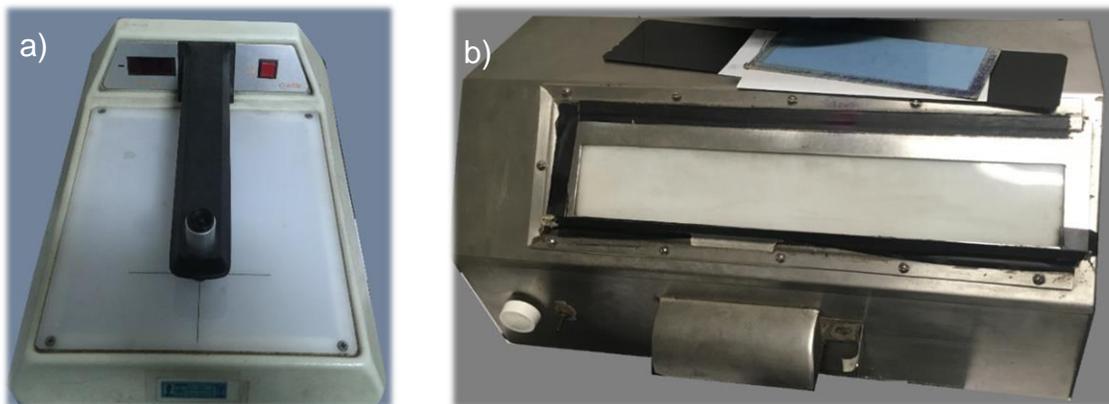


Figura 4.5 Equipos utilizados a) densitómetro y b) negatoscopio.

4.6 Caracterización metalográfica y MEB

En base en las radiografías, se determinó hacer cortes transversales al cordón de soldadura para observar metalográficamente la presencia de la porosidad en la unión.

Se tomaron 2 muestras, las cuales se cortaron por medio de sierracinta para después hacer un corte fino por medio de una cortadora con disco de SiC. Se desbastó la zona a examinar con lija desde grado 80 hasta 1200 y se pulió en paño con pasta de diamante de 1 μm .

Una vez preparadas, se atacaron químicamente con el reactivo Berahas (30 ml H_2O + 60 ml HCl + 1 gr $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) por 10 segundos para proseguir a observar las probetas en el microscopio como en el estereoscopio. En la Figura 4.6 se muestran los instrumentos utilizados para visualizar las muestras.

Las discontinuidades encontradas por medio de la radiografía, fueron analizadas por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB), con un equipo Tescan Mira 3 del laboratorio de COMIMSA.

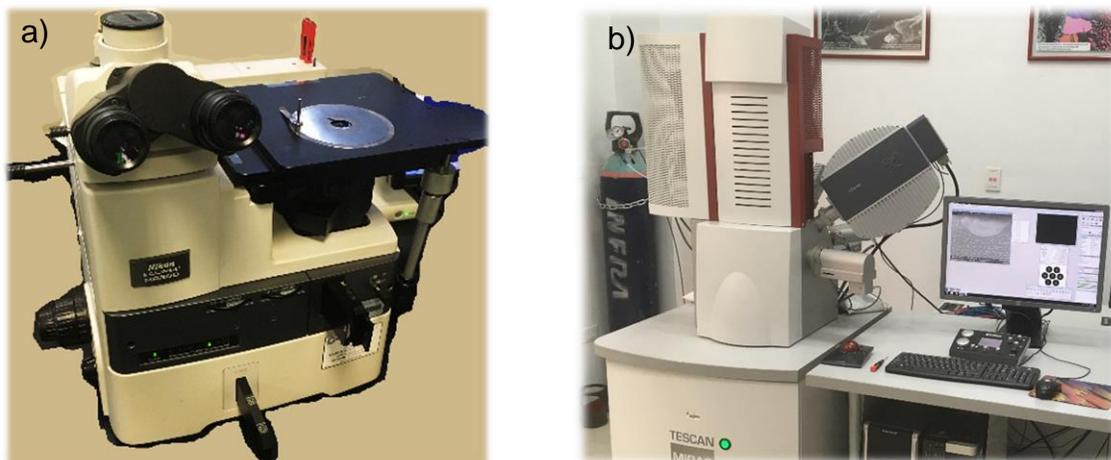


Figura 4.6 Equipos utilizados a) microscopio óptico y b) microscopio electrónico de barrido.

4.7 Simulación térmica del proceso SAWL

En la Figura 4.7 se muestra el esquema de trabajo realizado donde se dio inicio con la investigación en la literatura de las propiedades térmicas del acero API 5L X70, con la finalidad de determinar los datos térmicos a ocupar para este material en la simulación.

Para la construcción de los volúmenes y el mallado se ocupó el software GAMBIT, en el cual se consideraron 2 placas de 203 x 127 x 17 mm cada una, unidas por el centro, como se muestra en la Figura 4.8.

En la simulación, la fuente de calor se consideró con una geometría semi elíptica por lo que sobre las placas se consideraron 15 superficies, indicadas por la letra A en la Figura 4.8, las cuales se construyeron en base en el ancho del cordón, el avance de soldadura y la dirección de avance de la misma para establecer que estas serían quienes emitieran el flujo de calor hacia la placa por cierto tiempo determinado.

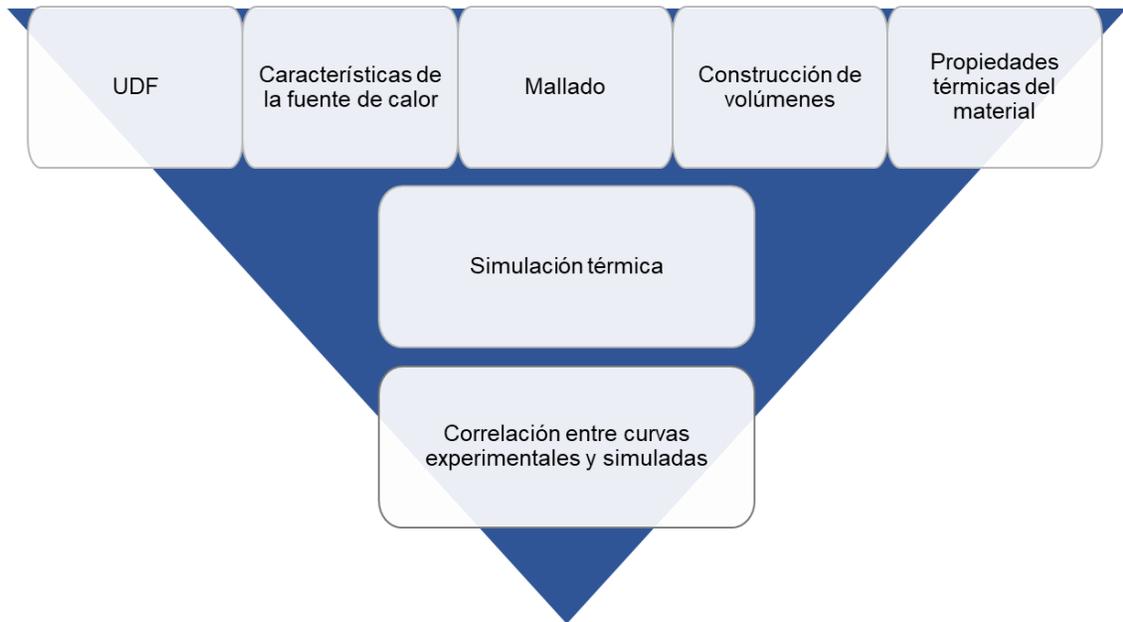


Figura 4.7 Esquema de trabajo utilizado en el proceso de simulación.

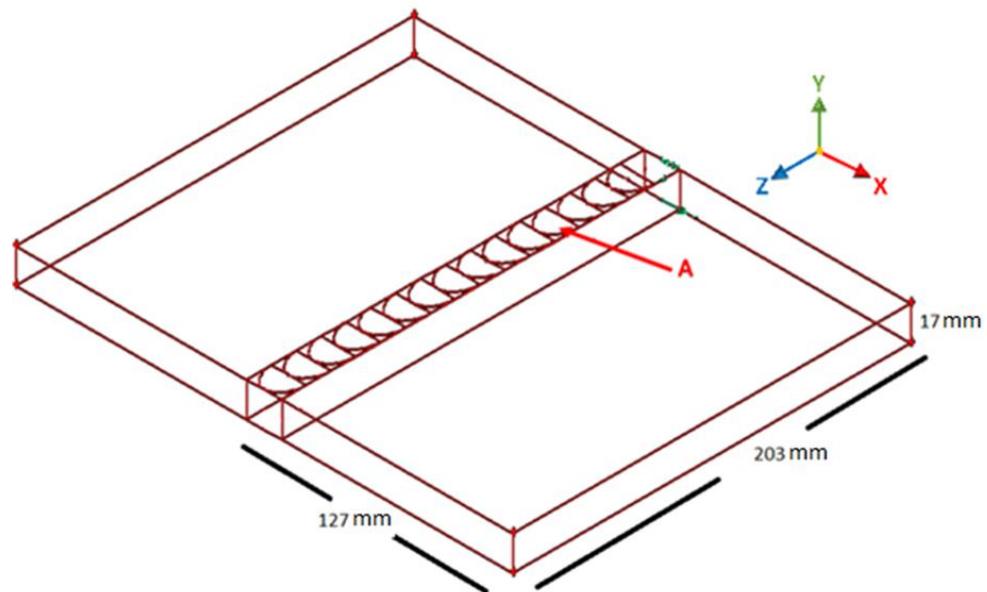


Figura 4.8 Dimensiones de las placas para simulación y superficies semi elípticas para entrada de flujo de calor (A).

En la Figura 4.9 se muestra la malla formada a partir de los volúmenes y las superficies previamente construidas. Para la formación de estas mallas se utilizó el principio de densidad variable, utilizado por varios autores[55][87][88][89], para

reducir el número de elementos y con ello reducir el tiempo de cálculo del software.

Primeramente, se malló el volumen central del sólido que está formado dentro de:

$$x_1 < x < x_2 \quad , \quad y_0 < y < y_1 \quad , \quad z_0 < z < z_1$$

El cual interactúa directamente con las superficies semi elípticas que introducen el flujo de calor al sistema. Este se malló con un intervalo de 0.05 con elementos hexaédricos y tetragonales. Después se prosiguió con los volúmenes de las placas de material base que están formados dentro de:

Para el primer sólido

$$x_0 < x < x_1 \quad , \quad y_0 < y < y_1 \quad , \quad z_0 < z < z_1$$

Para el segundo sólido

$$x_2 < x < x_3 \quad , \quad y_0 < y < y_1 \quad , \quad z_0 < z < z_1$$

Donde en las caras

$$x_0 < x < x_1 \quad , \quad y_0 < y < y_1 \quad , \quad z = z_1$$

$$x_2 < x < x_3 \quad , \quad y_0 < y < y_1 \quad , \quad z = z_1$$

$$x_0 < x < x_1 \quad , \quad y_0 < y < y_1 \quad , \quad z = z_0$$

$$x_2 < x < x_3 \quad , \quad y_0 < y < y_1 \quad , \quad z = z_0$$

Se aplicó una técnica para llevar de menor a mayor espacio entre nodos para reducir la densidad de la malla. Estos volúmenes se mallaron por medio de elementos hexaédricos lineales yendo en distancias entre nodos desde 0.01 hasta 0.465 en el eje X, para después hacer el mallado sobre el eje Z en una distancia de 0.05 unidades entre nodos.

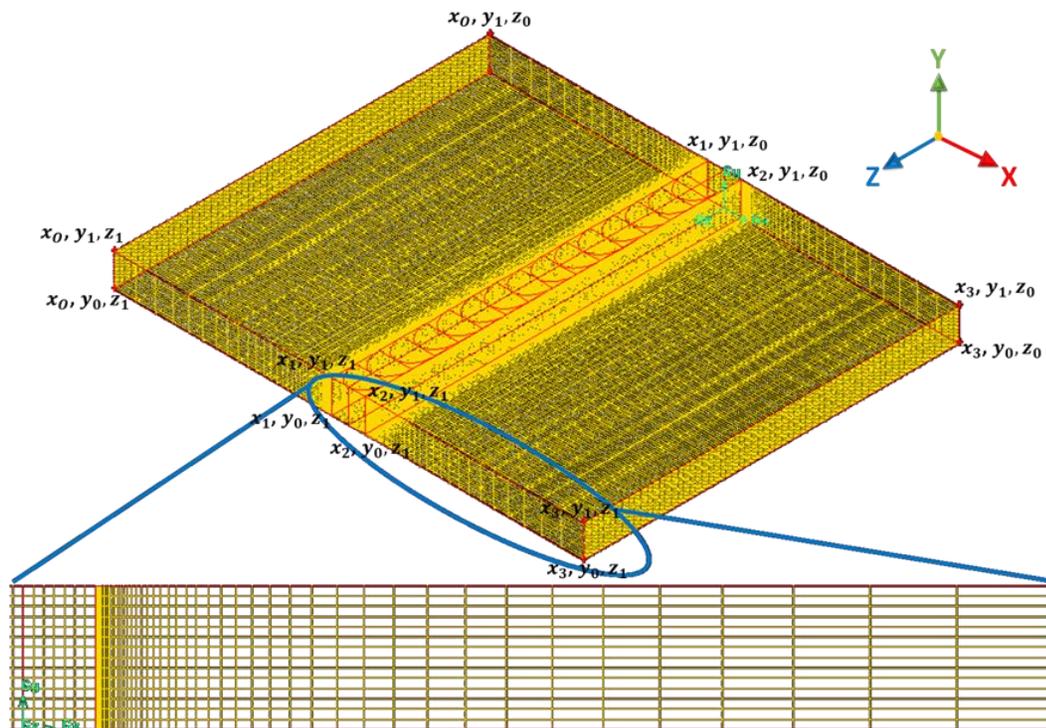


Figura 4.9 Malla utilizada para simulación del proceso SAWL.

La simulación tuvo lugar en el software ANSYS con su librería Fluent. Aquí convergen la búsqueda y realización de los pasos anteriores para poder ejecutar la simulación térmica deseada.

Como parte del procesamiento de cómputo de la información en el software, éste transforma el sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales a un sistema de ecuaciones algebraicas por el método de volumen finito.

Para generar la resolución de estas ecuaciones algebraicas, se debieron considerar ciertas condiciones de frontera para esta simulación. A partir de valores conocidos, se definieron en los límites del sistema, fenómenos como la densidad de flujo de calor que tendría cada superficie, la convección que estaría trabajando a lo largo de las superficies aledañas al cordón, como lo son las paredes laterales, las paredes de la base de la unión y cada superficie de las placas.

Para esto se tuvieron ciertas consideraciones:

- Siempre el volumen sería un sólido
- No se consideró el calor latente por algún cambio de estado
- No se consideró energía generada por cambio microestructural
- La densidad se consideró constante en todo momento.
- La composición química en la región simulada fue constante.
- La energía suministrada al sistema solo es a partir del arco eléctrico generado

Teniendo estas consideraciones, por medio de la fórmula de energía que el software utiliza, se detallan las formulaciones que se utilizan en base en el manual:

$$\frac{\delta(\rho E)}{\delta t} + \nabla \cdot (\vec{V}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\overline{\tau_{eff}} \cdot \vec{V})) + S_h \quad (19)$$

Donde k_{eff} es la conductividad efectiva ($k + k_t$, donde k_t es la conductividad térmica turbulenta la cual es despreciable) y la \vec{J}_j es el flujo difusional entre elementos, la cual igualmente es despreciable debido a que no se tomaron en cuenta algún cambio microestructural en el sistema. \vec{V} representa la velocidad en el sistema, que se tomó como flujo laminar. El término $(\overline{\tau_{eff}} \cdot \vec{V})$ es despreciable debido a que por ser una región sólida no se encuentra viscosidad en el sistema. S_h puede incluir el calor generado por la reacción química en el sistema, fenómeno que no se considera para esta simulación, pero también puede describir la fuente volumétrica de calor hacia el sólido.

Entonces de la ecuación 19 el término E es:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (20)$$

Pero al ser un sistema donde el cociente que involucra a la presión es despreciable entonces,

$$E = h = \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (21)$$

Por lo que para un sistema con regiones sólidas se considera la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}\rho h) = \nabla \cdot (k\nabla T) \quad (22)$$

Donde el segundo término de lado izquierdo de la ecuación representa la convección generada en el sistema. ρ representa la densidad del sólido en el sistema (kg/m^3) y ∇T son las temperaturas dentro del sistema las cuales se van iterando en base al flujo de calor de entrada que se colocó en cada una de las superficies del sistema. La siguiente ecuación representa la temperatura que alcanza en la superficie de flujo de calor:

$$T_w = \frac{q\Delta n}{k} + T_s \quad (23)$$

Donde:

T_w representa la temperatura en la superficie de pared

q representa la densidad de potencia suministrada

Δn representa la distancia entre la pared y el sólido adyacente

k es la conductividad térmica del material

T_s es la temperatura de referencia

La densidad de energía suministrada a las placas se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$q = \frac{V*I}{A} \quad (24)$$

Donde la q se expresa en W/m^2 , la V es el voltaje aplicado en Volts, la I es la corriente eléctrica en Ampere y la A es el área donde se está aplicando esta potencia, en m^2 .

Los parámetros utilizados en la simulación se resumen en las Tablas 4.6 y 4.7 para la probeta 3 y 1 respectivamente ya que la primera no presentó porosidad mientras que la segunda presentó el mayor porcentaje de porosidad. Los valores del C_p y de la λ están estimados en base en [90] y [91] y se modificaron de manera que las curvas simuladas se correlacionarán a las curvas experimentales, siempre y cuando los valores estuvieran dentro de lo publicado por los autores mencionados.

Tabla 4.6 Valores para la simulación de la probeta 3 del proceso SAWL.

Variable	Unidad	Valor
Densidad* (ρ) [90][91]	Kg/m^3	7770
* Es constante debido a que el software no permite agregar polinomio para este dato	T (°C)	$y(x)$
Calor específico (C_p) [90][91]	$J/Kg \cdot K$	$\begin{cases} 291 - 873 & 367.68 - 0.2044x + 0.0006x^2 \\ 873 - 1273 & - 29653 + 58.705x - 0.0275x^2 \\ 1273 - \infty & 400 \end{cases}$
Conductividad térmica (λ) [90][91]	$W/m \cdot K$	$\begin{cases} 291 - 1073 & 30 + 0.0163x - 0.00003x^2 \\ 1073 - 1274 & 25 \\ 1274 - \infty & 12.741 + 0.0113x \end{cases}$
Temperatura inicial	K	300
Eficiencia considerada (η)		0.95
Convección (h)	W/m^2K	5
Densidad de potencia suministrada (q)	W/m^2	132,857,408
Tiempo de permanencia por fuente	s	1
Paso de tiempo para simulación	s	0.1
Máx. de iteraciones		50
Temperatura tope	K	10,000

Tabla 4.7 Valores para la simulación de la probeta 1 del proceso SAWL.

Variable	Unidad	Valor	
Densidad* (ρ) [90][91]	Kg/m^3	7770	
* Es constante debido a que el software no permite agregar polinomio para este dato		T(°C)	y(x)
Calor específico (C_p) [90][91]	$J/Kg \cdot K$	$\begin{cases} 291 - 873 \\ 873 - 1273 \\ 1273 - \infty \end{cases}$	$\begin{cases} 650 - 710 \\ 1500 \\ 750 \end{cases}$
Conductividad térmica (λ) [90][91]	$W/m \cdot K$	$\begin{cases} 291 - \infty \end{cases}$	60
Temperatura inicial	K	300	
Eficiencia considerada (η)		0.95	
Convección (h)	W/m^2K	5	
Densidad de potencia suministrada (q)	W/m^2	321,482,124	
Tiempo de permanencia por fuente	s	0.8	
Paso de tiempo para simulación	s	0.1	
Máx. de iteraciones		50	
Temperatura tope	K	10,000	

En la Figura 4.10 se muestra un esquema de la manera en que se consideraron estas condiciones de frontera.

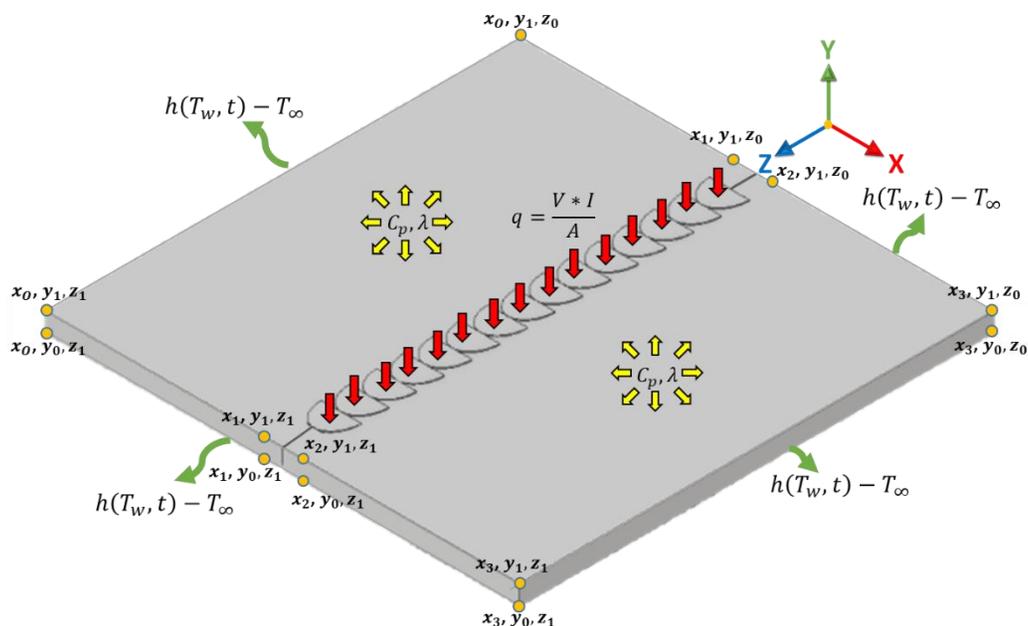


Figura 4.10 Condiciones de frontera en el sistema.

Debido a que la fuente de calor es transitoria, se tuvo que recurrir a la programación de una función definida por el usuario (UDF, por sus siglas en inglés) en la cual se hace encender una fuente de calor por determinado tiempo, para después apagarla y encender la siguiente el mismo tiempo, y así sucesivamente hasta llegar a la última fuente de calor. El tiempo de activación de cada fuente de calor se calculó en base en la zona semi elíptica y en el desplazamiento del arco de soldadura.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 *Análisis de la abertura de raíz en laboratorio*

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos del dimensionamiento del cordón de soldadura al tener como variable principal la abertura de raíz tanto en el cordón interior como en el exterior, como se muestra en la Figura 5.1.

El inciso (a) muestra el comportamiento de la zona afectada por el calor, ZAC, la cual se ve reducida al incrementar la abertura de raíz. Considerando que el volumen de material de aporte es constante para las dos condiciones, esto sugiere que, al incrementar la abertura de raíz, el charco líquido de soldadura tiende a fluir por la abertura afectando menos el material base, caso contrario al estar a tope donde el charco de soldadura realiza su recorrido sobre éste.

En la Figura 5.1 (b) se presenta la variación de la abertura de raíz con respecto al ancho del cordón, se observa una ligera reducción al aumentar la abertura, sin embargo, no se considera significativo.

La Figura 5.1 (c) muestra la variación de la abertura de raíz y la dilución, se observa que conforme incrementa la abertura de raíz, la dilución disminuye; dicho comportamiento es debido a que, al aumentar la abertura de raíz, el charco líquido fluye más por la abertura que lo que afecta al material base.

Tabla 5.1 Resultados de experimentación al modificar la abertura de raíz.

Abertura de raíz	Cordón interior (mm)			Cordón exterior (mm)		
	0	2	4	0	2	4
ZAC	6.36	5.65	4.16	6.36	5.65	4.16
Ancho de cordón	17.07	19.01	18.06	20.27	19.98	19.73
Dilución total (mm^2)	181.6	170.5	161.9	181.6	170.5	161.9

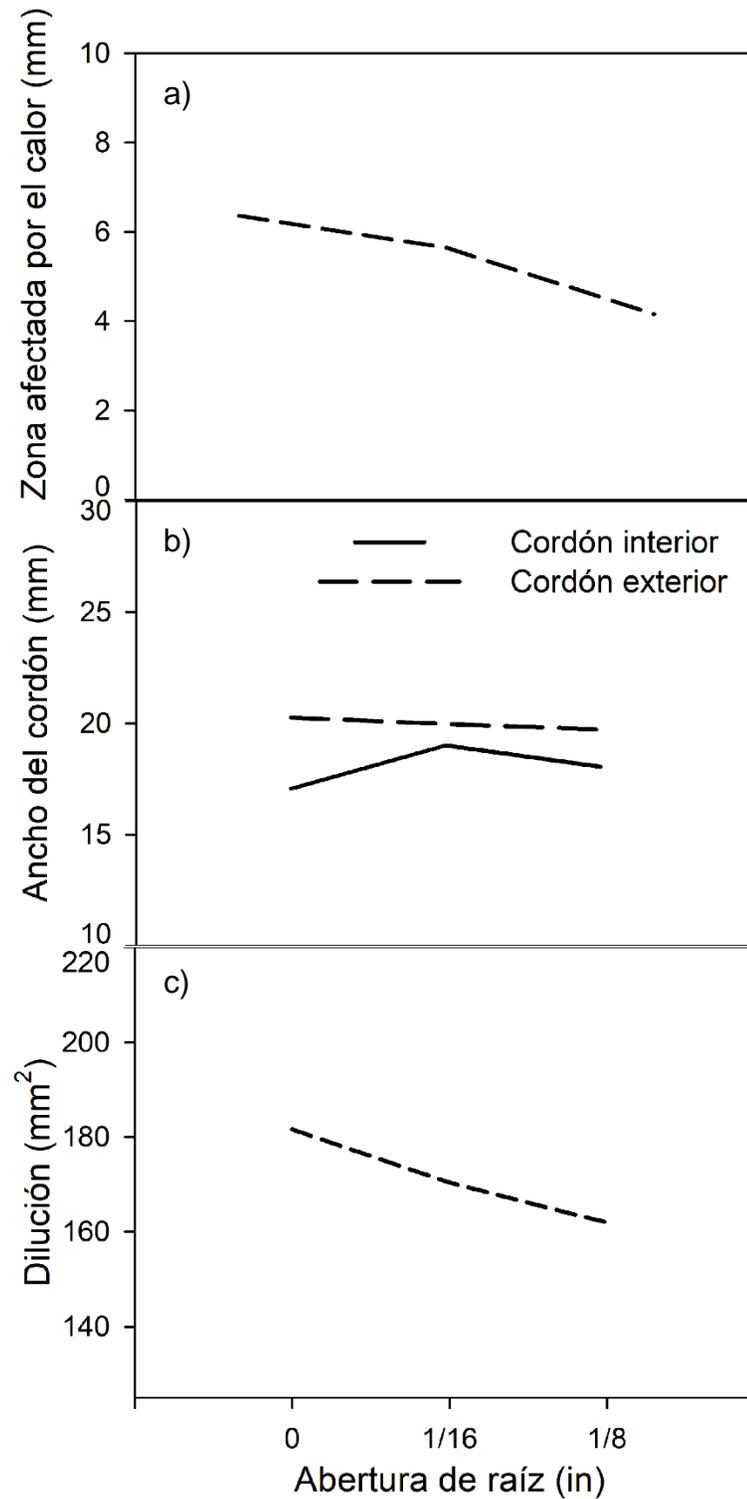


Figura 5.1 Gráficos obtenidos de la variación de la abertura de raíz con respecto
a) a) zona afectada por el calor, b) ancho del cordón y
c) dilución para las pruebas en planta.

5.2 Resultados de limpieza en extremos de tubería

En la Figura 5.2 se ilustra las diversas actividades implementadas de forma operacional para la limpieza de la zona donde el material fue unido por soldadura de forma manual. Se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 5.2, donde el valor de salida considerado fue el porcentaje de porosidad. De las operaciones propuestas, la limpieza con flama es la que propició los mejores resultados ya que al aplicarla, la aparición de porosidad disminuyó considerablemente, mientras que al limpiar la abertura con algún solvente aumentaba la aparición de la misma.



Figura 5.2 Actividades realizadas en planta a) Aplicación de flama, b) corte manual con disco y c) Fundición de metal con plasma.

Tabla 5.2 Resultados de actividades desarrolladas en planta para mejorar la limpieza de la abertura de raíz.

Actividad	Número de pruebas	Porcentaje de aparición de porosidad (%)
Aplicación de Flama directa	1400	4.01
Solvente para disolución de residuos	20	27.5
Corte manual con disco 1.6 mm	10	20
Fundición de material por medio de plasma	5	40

Este ejercicio ayudó a determinar que la aplicación de flama directa ayuda a eliminar los residuos que se encuentran en la zona abierta en los extremos de las tuberías por lo que se incluyó en el diseño de experimentos como una variable a estudiar.

5.3 Pruebas a nivel laboratorio

El diseño de experimentos propuesto se corrió con las variables eléctricas de proceso constantes con la intención de no modificar variables esenciales del WPS de la planta; solo se varió la velocidad de avance, así como la abertura de raíz y la limpieza de la unión, teniendo como variable dependiente el porcentaje de porosidad.

La presencia de porosidad en los cupones soldados se cuantificó en base en el mallado realizado en cada una de las placas radiográficas, solo dentro del recuadro rojo que se muestra en la Figura 5.3.

En las radiografías se pudieron observar otras discontinuidades como se muestra en la Figura 5.4, destacando que en el inciso (f) se observa porosidad al final de la soldadura. Ésta última se mostró en más de un cupón, atribuyendo esto al decremento de energía suministrada debido a la suspensión del arco eléctrico, lo cual promueve la disminución del tiempo de solidificación, forzando el atrapamiento de material de fundente o gases producto de la evaporación generada durante la soldadura [92][17]. Cabe indicar que, por ello, en la cuantificación del porcentaje de porosidad esta zona se descartó.



Figura 5.3 Área analizada para cuantificación de discontinuidades en las placas radiográficas.

En la Tabla 5.3 se muestran los resultados obtenidos, se observa que para la combinación de niveles altos de los factores A, B y C se presenta el mayor porcentaje de porosidad, mientras que en los niveles bajos esta no se presenta.

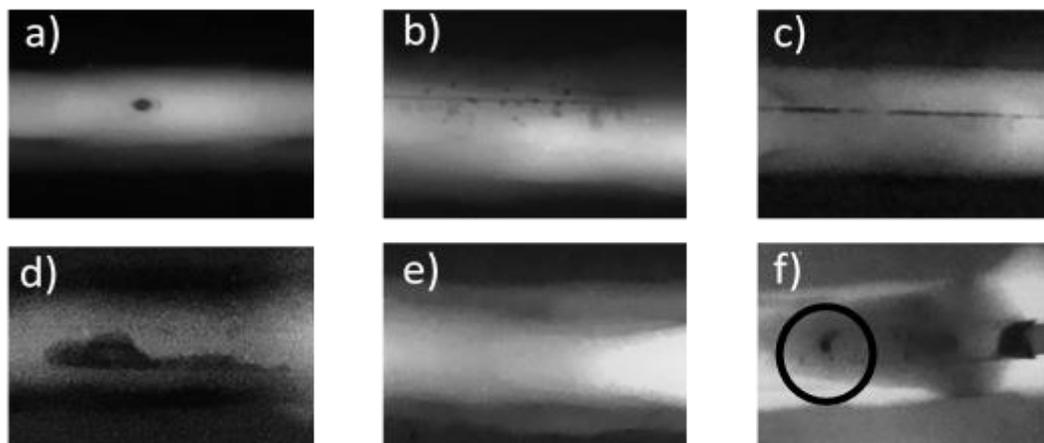


Figura 5.4 Defectos observados por radiografía, a) porosidad aislada, b) porosidad agrupada, c) falta de fusión, d) escoria, e) socavado, f) porosidad al final del cordón.

Tabla 5.3. Valores obtenidos de respuesta de la experimentación realizada.

N	Quema de residuos (°C) (A)	Velocidad de avance (mm/min) (B)	Abertura de raíz (mm) (C)	% Aparición de porosidad
1	200	1140	4	50
2	112.5	950	2	0
3	200	760	0	0
4	112.5	950	2	13.333
5	112.5	950	2	6.667
6	200	1140	0	0
7	25	760	0	0
8	25	1140	4	26.667
9	112.5	950	2	3.333
10	112.5	950	2	3.333
11	200	760	4	30
12	25	1140	0	6.667
13	25	760	4	36.667
14	112.5	950	2	6.667

La varianza de los resultados obtenidos en la Tabla 5.3 se analizó con el software MINITAB, para poder determinar la significancia de cada variable, así como sus interacciones, tomando en cuenta que el valor P debería ser menor a 0.05 para ser significativa. En la Tabla 5.4 se muestran los valores del valor P destacando la abertura de raíz como variable más significativa, seguida de la interacción entre las 3 variables.

Tabla 5.4 Análisis de varianza para porcentaje de porosidad.

Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	Valor P
Constante		18.75	1.61	11.64	0.000
A	2.5	1.25	1.61	0.78	0.473
B	4.17	2.08	1.61	1.29	0.252
C	34.17	17.08	1.61	10.61	<u>0.000</u>
A*B	5.83	2.92	1.61	1.81	0.130
A*C	5.83	2.92	1.61	1.81	0.130
B*C	0.83	0.42	1.61	0.26	0.806
A*B*C	9.17	4.58	1.61	2.85	<u>0.036</u>
Punto Central		-13.19	2.46	-5.36	0.003

En el análisis de efecto principal de cada variable sobre el diseño se consideró la media de cada nivel. En la Figura 5.5, se observa la relación de cada nivel con respecto al porcentaje de porosidad presentado en los experimentos; en todos los casos se observa un incremento en el nivel alto, sin embargo, este cambio solo es significativo para la abertura de raíz.

En la Figura 5.6 se muestra una gráfica de cubo donde las respuestas de cada corrida se expresan en cada extremo y al centro se toma el valor medio de los resultados de los puntos centrales, exponiendo que las mejores respuestas se encuentran de lado derecho del cubo, donde a un nivel bajo en la abertura de raíz sin importar el movimiento de las otras dos variables involucradas no debería existir porosidad en el proceso.

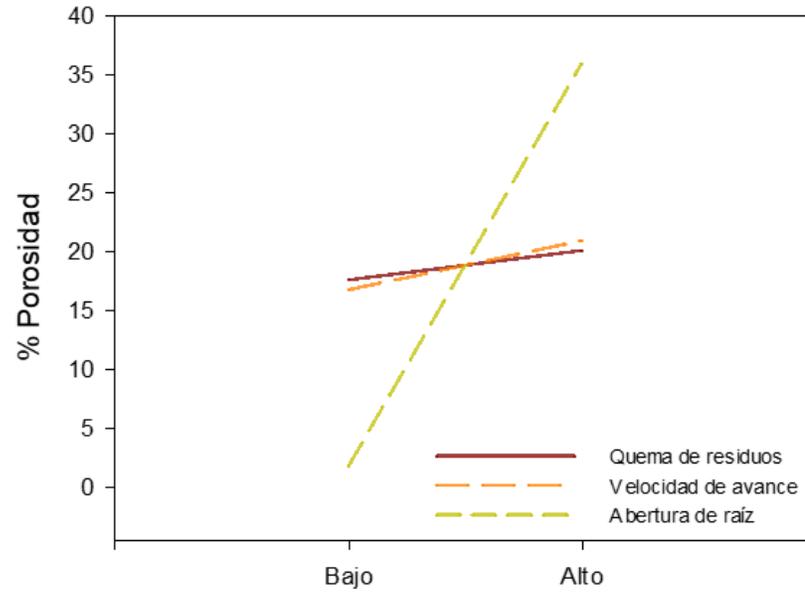


Figura 5.5 Efecto de los niveles del DOE contra el porcentaje de porosidad.

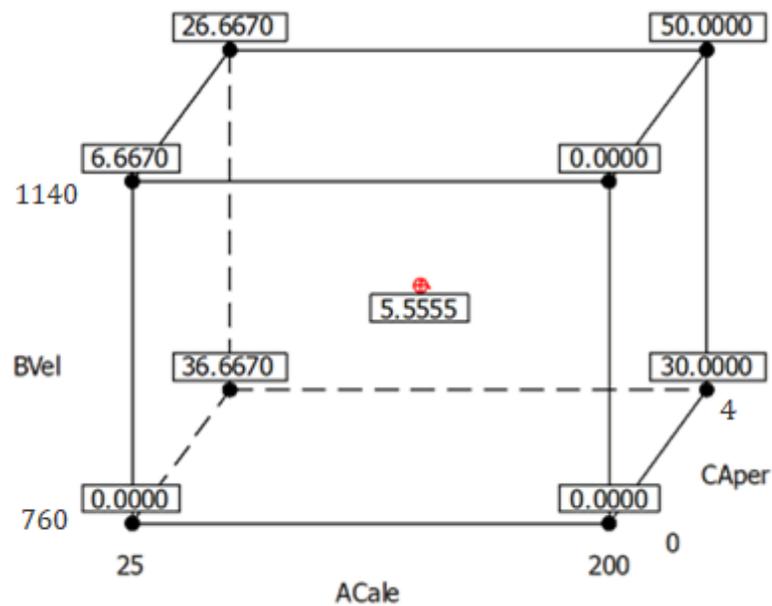


Figura 5.6 Gráfica de cubo de resultados del DOE factorial 2^3 con punto central.

5.4 *Análisis macro y microestructural*

Se tiene conocimiento de que la porosidad está asociada a un atrapamiento de gas, lo que ocasiona una discontinuidad en la formación del charco de soldadura. Típicamente, en la zona de fusión de una soldadura de acero API 5L X70 se presentan fases como bainita (B), ferrita poligonal (FP), ferrita Widmanstätten (FW), ferrita acicular (FA) y ferrita alotriomórfica (FAL) [67] evitando la presencia de fases frágiles generadoras de grietas que disminuyen las propiedades mecánicas del material [93][94].

En la Figura 5.7 se muestran fotografías tomadas a una muestra con porosidad, donde la Figura 5.7 (a) es una zona de fusión sana, mientras que en la Figura 5.7 (b) es una zona con porosidad aislada. Cabe hacer mención que no se observa algún cambio significativo en la microestructura aleada al poro.

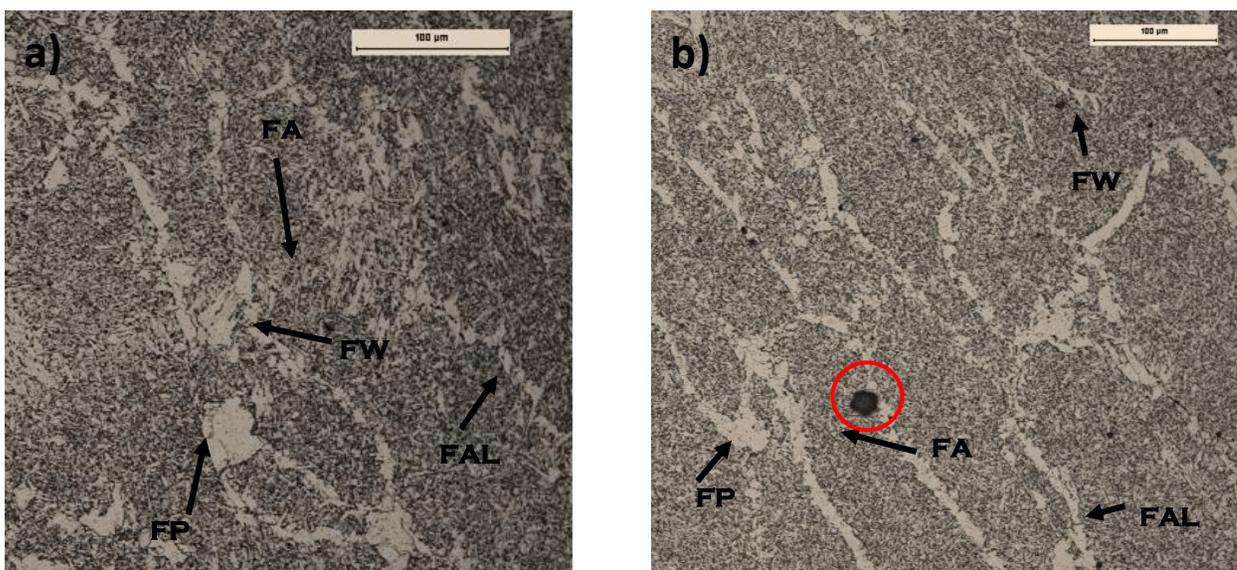


Figura 5.7 Micrografía óptica del charco de soldadura de cupones soldados de acero API 5L X70 PSL 2 con zona de fusión a) sana y b) con porosidad.

La necesidad de observar la presencia de porosidad más a detalle hizo que de la probeta 1 del DOE, se tomara una muestra para poder analizarla. En la Figura 5.8 (a y b) se muestra un corte transversal al cordón, el cual se observó

mediante MEB, realizando acercamientos de 4 y 997X respectivamente para observar la forma y tamaño de las partículas contenidas dentro de la cavidad.

En la Figura 5.8 (c y d), se muestra el análisis EDS, el cual reveló la composición química en la zona de la partícula seleccionada, encontrando como mayor elemento el oxígeno (O) el cual interactúa con elementos como aluminio (Al), calcio (Ca), magnesio (Mg) y silicio (Si), también encontrados en el estudio, pero en menor proporción, para formar óxidos. El resultado sugiere que estos pudieran estar asociados al fundente (ver Tabla 2.3). Adicional a ello se encontraron elementos como el sodio (Na) y el cloro (Cl), estos pudieron ser incorporados por el lubricante debido a que no se haya quemado adecuadamente. Autores como [66][95][96] mencionan que los lubricantes tienen elementos como el sodio y el cloro en su composición química. Éste último puede estar involucrado en lubricantes contaminados, lo cual hace aún más probable la aparición de porosidad por la generación de gases.

Se tomó otra muestra de soldadura, ésta de la probeta 5 del DOE, para analizar si se encontraban los elementos detectados en la primera muestra. En la Figura 5.9 (a) se muestra la pieza cortada transversalmente al cordón. En la Figura 5.9 (c) se muestra los resultados de un EDS sobre el punto mostrado en la Figura 5.9 (b), donde se observa la presencia de elementos como oxígeno (O), calcio (Ca), magnesio (Mg), silicio (Si), los cuales pudieran estar asociados a la composición del fundente, y sodio (Na), el cual pudiera estar presente derivado del lubricante.

Para el área analizada en la Figura 5.9 (b), se muestra su espectro EDS de la Figura 5.9 (d) en donde se tiene la presencia de elementos como manganeso (Mn) y silicio (Si), sin encontrar presencia de elementos provenientes del fundente.

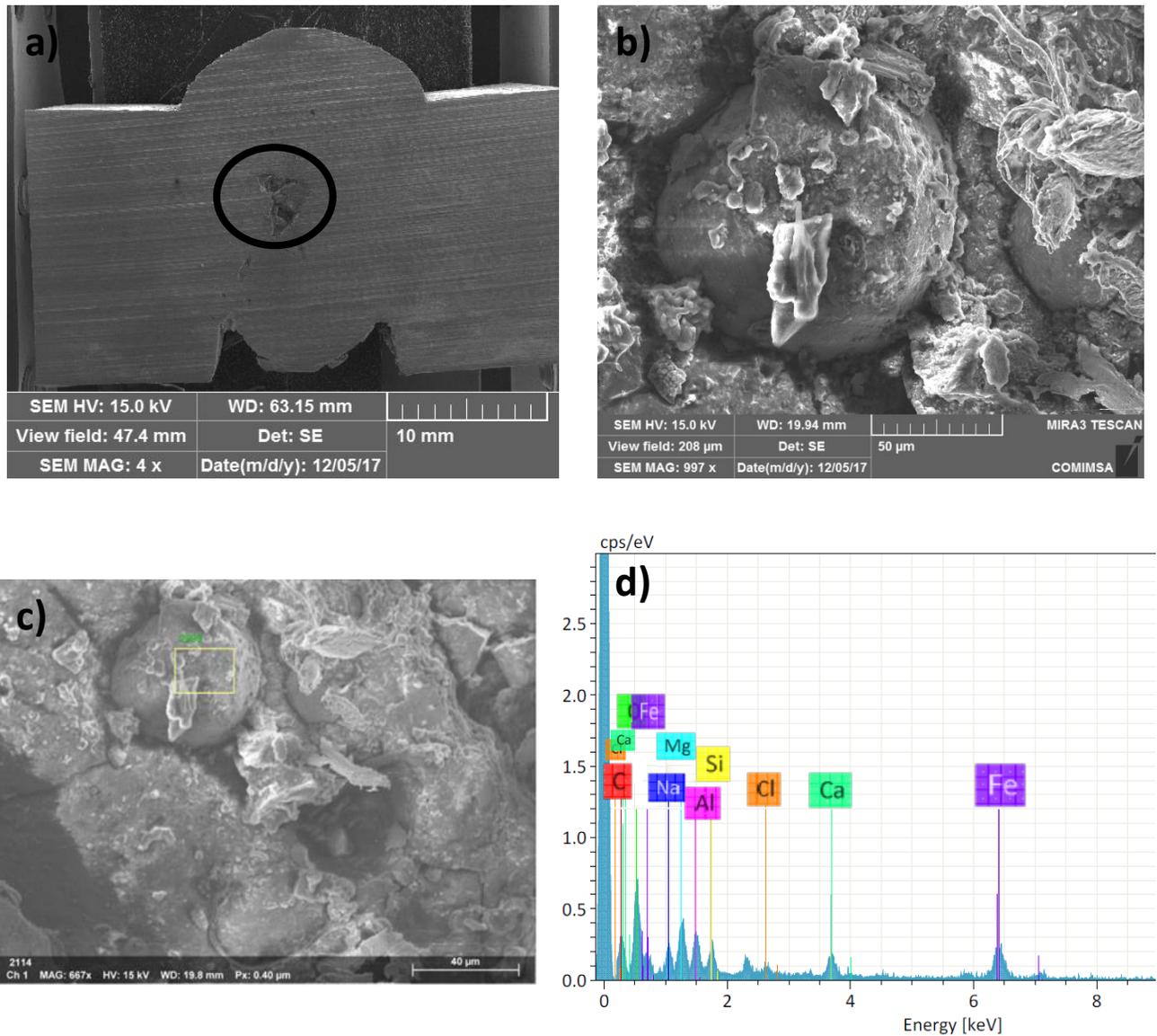


Figura 5.8 Caracterización realizada mediante MEB observada a a) 4X y b) 997X. c) Micrografía indicando el área de análisis y d) su espectro EDS.

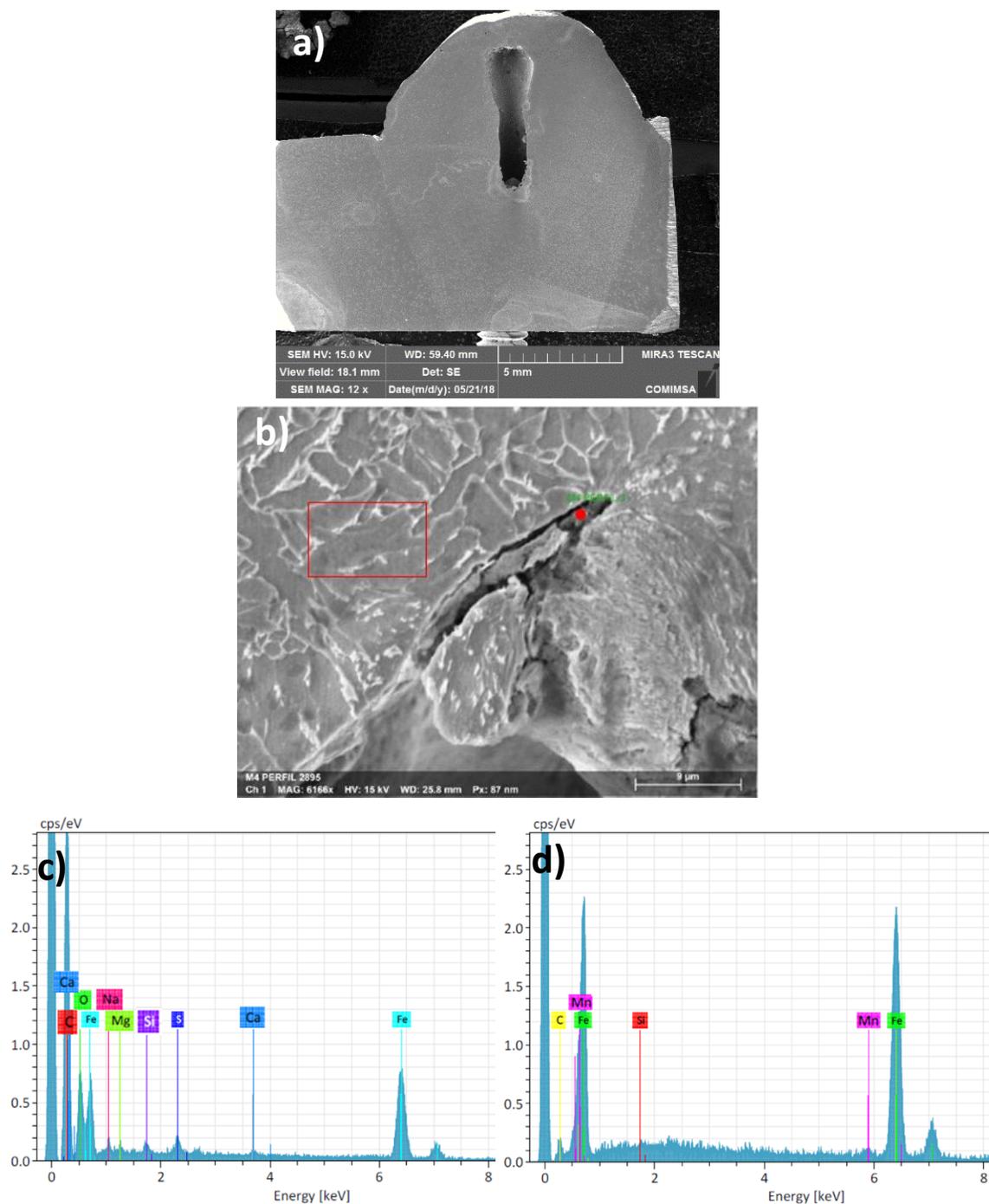


Figura 5.9 Caracterización realizada mediante MEB observada a a) 12X. b) Micrografía indicando el área de análisis a 6166X. c) Espectro EDS puntual y d) Espectro EDS del área seleccionada.

En la Figura 5.10 se muestra un mapeo realizado en la zona del defecto a un aumento de 2800X para observar qué elementos se presentaban. Se identificaron elementos como hierro (Fe), oxígeno (O), silicio (Si), azufre (S), manganeso (Mn), calcio (Ca), sodio (Na) y carbono (C). El azufre, calcio, sodio y oxígeno se identificaron en un área aledaña al poro por lo que pudiera ser atribuido a la difusión durante la solidificación del charco de soldadura, mientras que estos mismos elementos, sumándoles el carbono y el silicio se identificaron en la zona de la porosidad, concordando con lo mostrado en las Figuras 5.8 y 5.9.

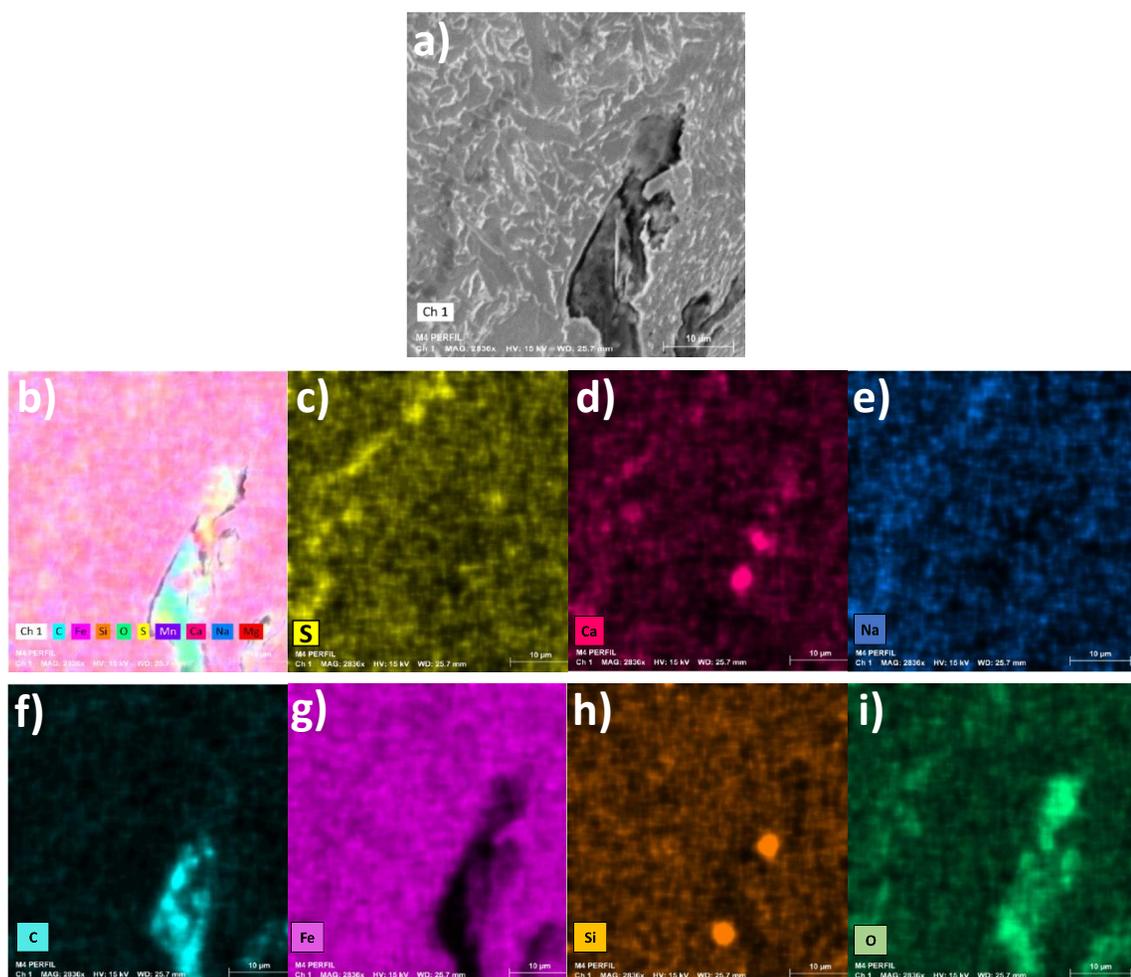


Figura 5.10 Mapeo en zona del charco de soldadura con porosidad a 2800x.

5.5 Relación de la masa del contaminante vs porosidad

La cantidad de masa necesaria para generar un poro de un radio específico se puede obtener en base en las ecuaciones 6, 7 y 8. Se calculó la P_b asumiendo que la tensión superficial del acero es de $2.5 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ para cada radio, se consideró la P_{atm} de 1 atm y la P_h se despreció. A la sumatoria de las presiones antes mencionadas se le adicionó 1 KPa para cumplir con la condición de la ecuación 6. Tomando en cuenta lo anterior, se llegó a resolver la ecuación 8 para obtener la masa necesaria de hidrógeno para generar cada burbuja con un radio especificado a distintas temperaturas, como se muestra en la Figura 5.11. Se observa que al aumentar la temperatura la masa necesaria para generar dicho radio de burbuja es menor.

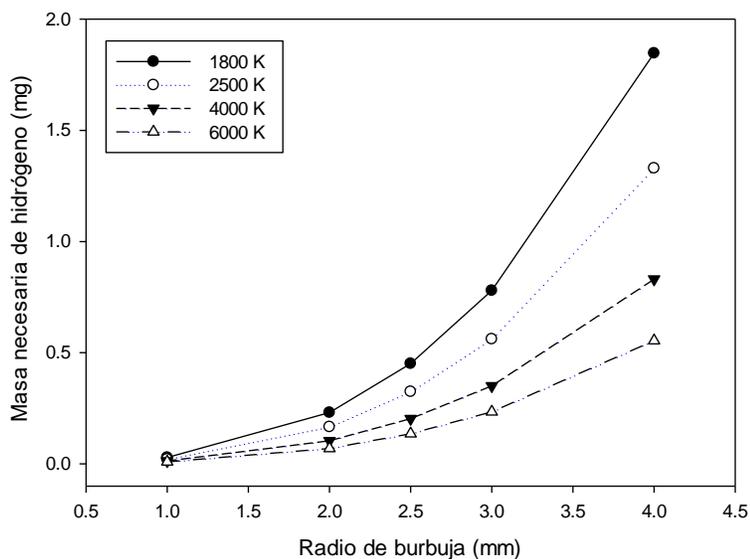


Figura 5.11. Relación entre el radio de burbuja y la masa de hidrógeno para generarlo a distintas temperaturas.

Se realizó un análisis acerca de la masa necesaria de óxido férrico (Fe_2O_3) o de agua (H_2O) para generar una burbuja de 2 mm de radio a distintas temperaturas, ver Figura 5.12. Se observa que se necesita una cantidad menor de H_2O que de Fe_2O_3 para generar dicha burbuja.

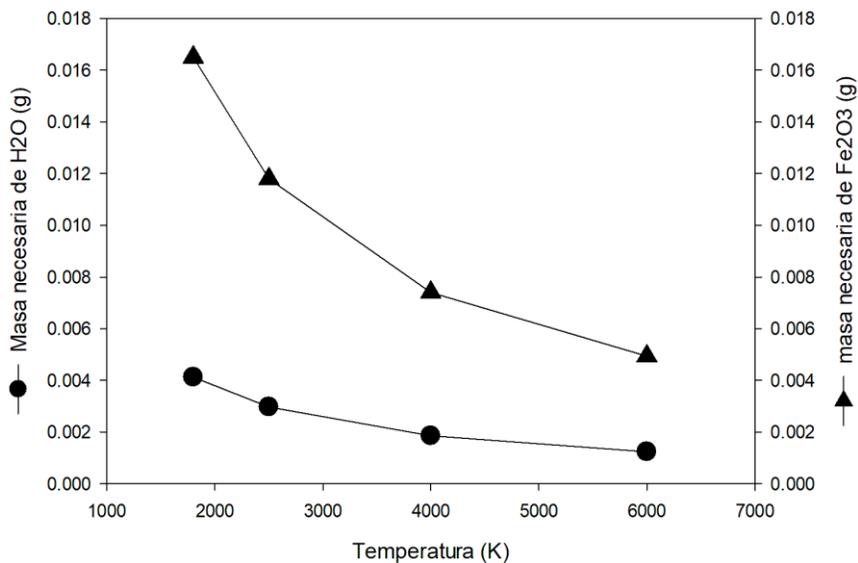


Figura 5.12. Relación de la temperatura y la masa necesaria de H_2O o Fe_2O_3 para generar una burbuja de 2 mm.

Considerando que la masa necesaria de agua es menor que la del óxido férrico, se prosiguió a calcular el espesor requerido de suciedad para poder generar dicho radio de burbuja. Se consideró una mancha estimada de 10×14 mm y una densidad de 1 g/cm^3 . La Figura 5.13 muestra los resultados obtenidos para diferentes temperaturas, indicando que el espesor requerido va entre las 20 a $180 \mu\text{m}$ para los distintos radios especificados.

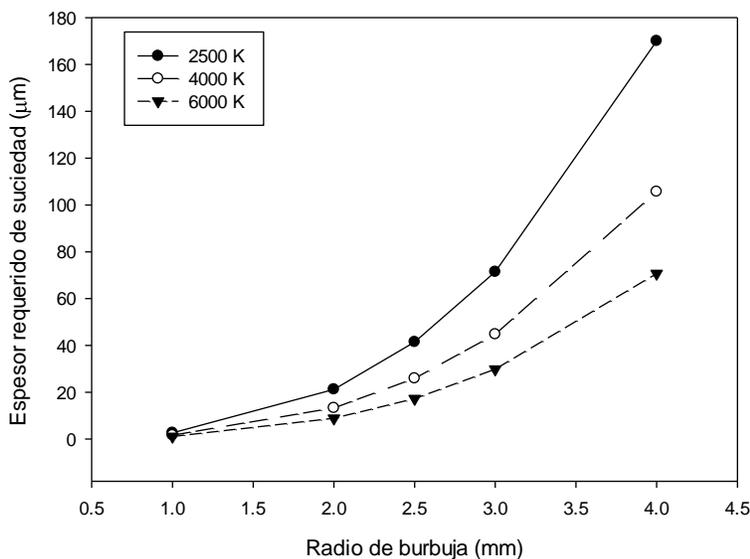


Figura 5.13. Relación del espesor requerido para generar un radio especificado a distintas temperaturas

Se realizó una caracterización de las capas de óxido presentes en las placas de acero utilizadas y se observó que su espesor varía de 50 y 120 μm , ver Figura 5.14. Por otro lado Torres Mata [97], indican que el espesor de óxido ocupado en su trabajo fue de 10 a 60 μm , por lo que las estimaciones realizadas tienen una predicción aceptable.

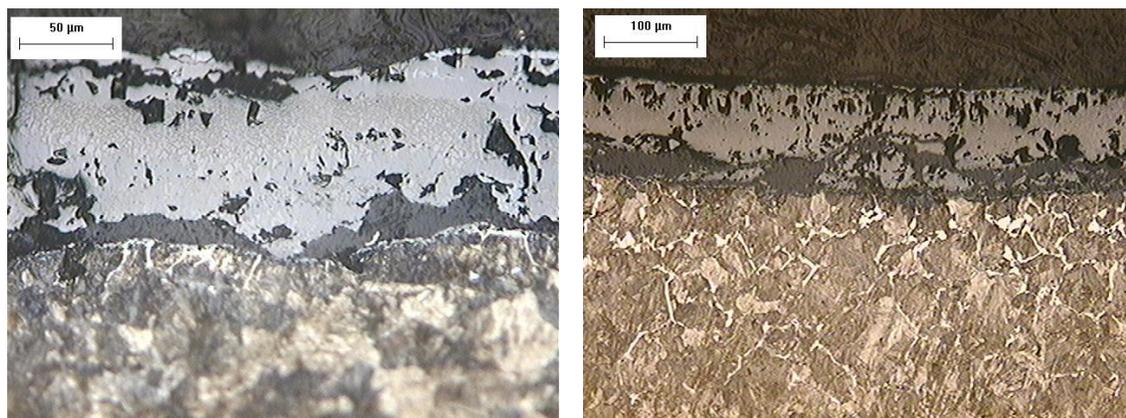


Figura 5.14 Micrografías a especímenes oxidados para observar dimensión de capa de óxido

5.6 Análisis térmico

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la instrumentación de los componentes soldados. La obtención de perfiles térmicos por medio de termopares ayudó a conocer el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo.

En la Figura 5.15 se puede observar el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo medida por los diferentes termopares a partir de las distintas distancias al centro de la soldadura, ver Figura 4.2, viendo de lado derecho los termopares 1 al 6 y del lado izquierdo del 7 al 12. Se observa que las temperaturas máximas alcanzadas son menores al irse alejando del centro del cordón de soldadura y que las curvas tanto de lado izquierdo como lado derecho del cordón de soldadura ubicadas en la posición espejo presentan comportamientos similares.

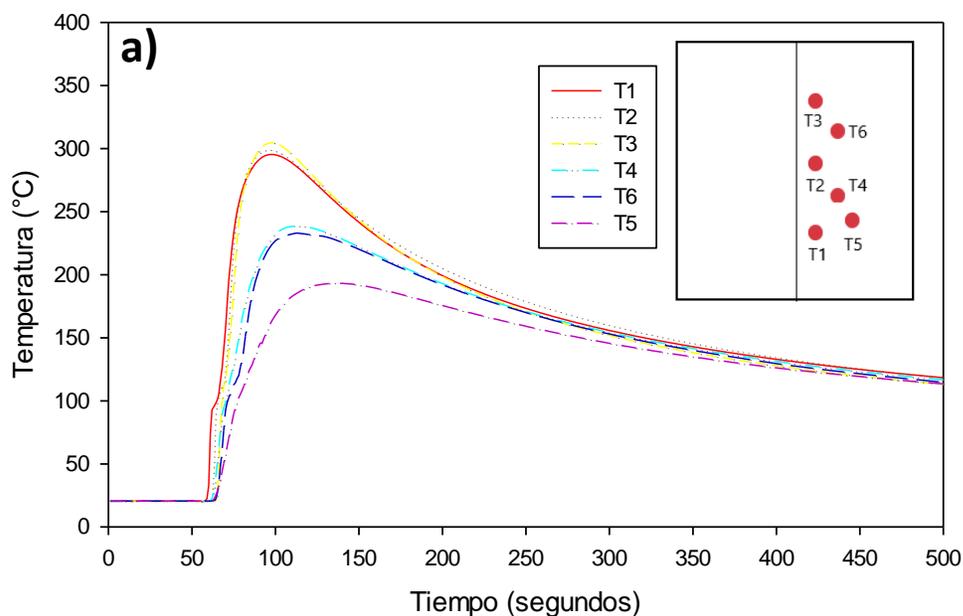


Figura 5.15 Comportamiento térmico sobre placas soldadas en termopares a) lado derecho y b) lado izquierdo.

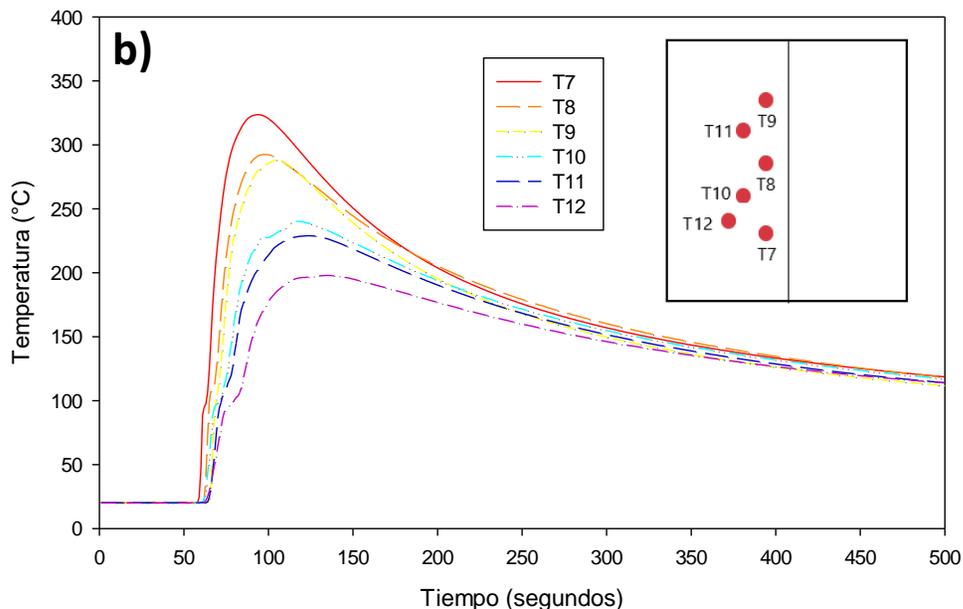


Figura 5.15 Comportamiento térmico sobre placas soldadas en termopares a) lado derecho y b) lado izquierdo. (continuación)

El comportamiento térmico se vio modificado en cada uno de las pruebas del DOE debido al cambio de niveles de los factores del mismo. En la Figura 5.16 se muestra el gráfico del valor máximo de temperatura para los termopares en las pruebas 3 y 11, donde la primera es con la abertura de raíz a tope y la segunda es con 4 mm de abertura. Se puede observar que la temperatura máxima alcanzada es inversamente proporcional a la abertura raíz ya que, al incrementar la abertura de raíz, el valor máximo de temperatura disminuye.

Como lo muestra la Figura 5.16, al disminuir la abertura de raíz en la unión la temperatura pico se ve aumentada, se considera que esto se debe al mayor contacto entre el charco de soldadura y el material base.

La velocidad de avance es una variable que afecta directamente al calor de entrada, ecuación 12, ya que al aumentar ésta, el resultado será un menor aporte de calor a la soldadura. Por lo que la Figura 5.17 muestra las curvas de las pruebas 7 y 12 donde se soldó a nivel bajo y alto respectivamente de velocidad de avance, obteniendo que la temperatura máxima registrada es menor para una velocidad mayor.

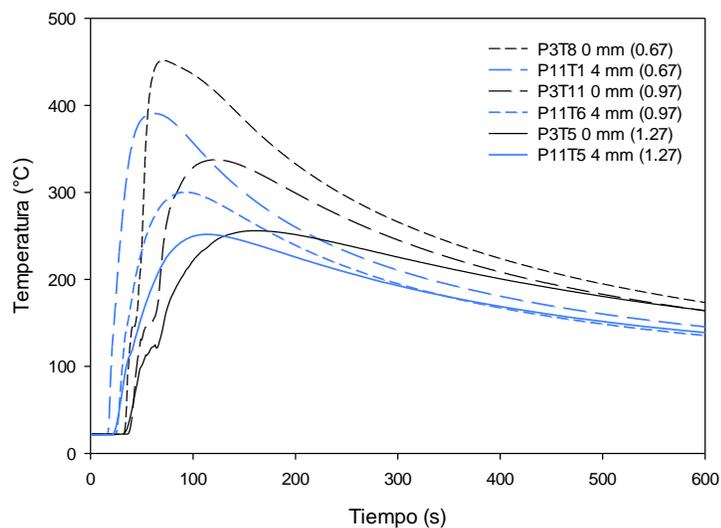


Figura 5.16 Curvas de perfil térmico registradas a 0.67, 0.97 y 1.27 pulgadas de la superficie de soldadura, para los experimentos 3 y 11 donde se varió la abertura de raíz de 0 a 4 mm.

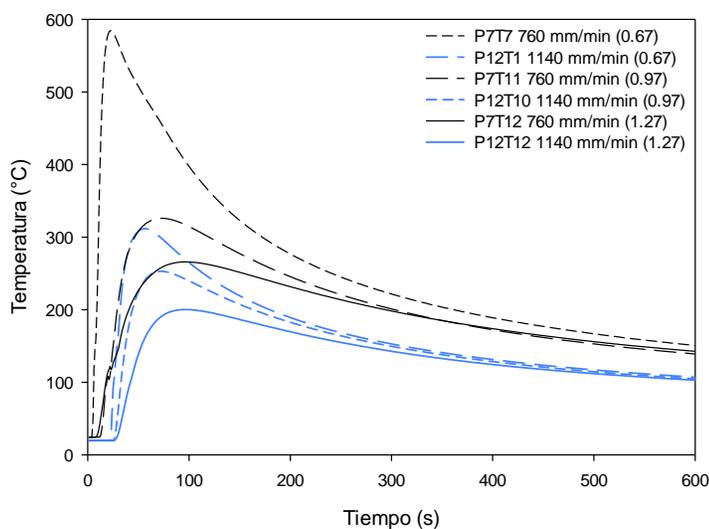


Figura 5.17 Curvas de perfil térmico registradas a 0.67, 0.97 y 1.27 pulgadas de la superficie de soldadura para las velocidades de avance de 760 y 1140 mm/min que corresponden a las pruebas 7 y 12 respectivamente.

Autores como Kou [17], Singh [32] y Cho [92] mencionan que el fundente en una soldadura realizada por SAW es otro factor generador de porosidad y atrapamiento de escoria, ya que la entrada de calor disminuye al aumentar la

velocidad de avance, trayendo dificultades para dejar escapar el fundente o gases en el charco de soldadura.

Para observar el comportamiento de la temperatura a lo largo de la soldadura en una misma probeta donde se presentó porosidad se tomó la muestra 8. Por lo que en la Figura 5.18 se muestra la radiografía con los termopares involucrados, donde en los puntos 4 y 10 se encuentra porosidad y en los puntos 6 y 11 no se localiza. Se muestra que durante el primer paso de la soldadura no se observa una modificación a las curvas térmicas, pero durante el segundo paso se distingue un diferencial de temperatura en las curvas térmicas donde se encontró porosidad, aludiendo esto al vapor generado durante la soldadura y éste por generar un espacio sin sólido, pudiera disminuir la conducción de la temperatura.

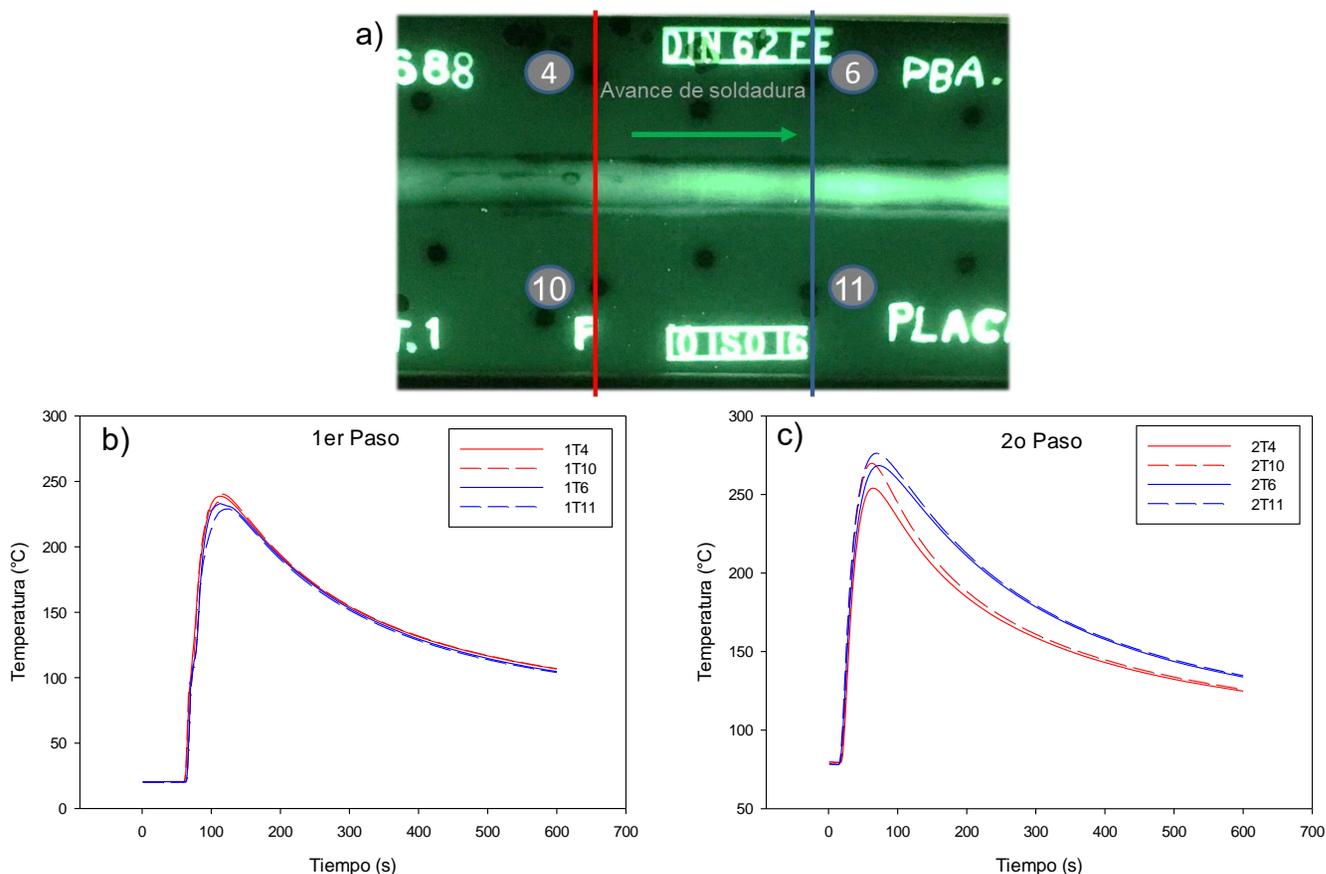


Figura 5.18 Caracterización a) Radiografía con termopares con y sin porosidad y curvas de perfil térmico de la prueba 8 b) Primer paso y c) Segundo paso.

5.7 Simulación térmica

En este trabajo, la simulación apoyó a correlacionar la aparición de porosidad indirectamente con los perfiles térmicos que se obtuvieron en el apartado anterior y la existencia de porosidad en la unión soldada.

Dicha simulación se realizó con las curvas térmicas de las corridas 3 y 1, donde no se presentó porosidad y donde si existió la aparición de la misma, respectivamente.

En la Figura 5.19 se observan las curvas experimentales de la corrida 3, la cual fue a 760 mm/min y a una abertura a tope. Las curvas obtenidas de la simulación tuvieron un error relativo de 13% en promedio.

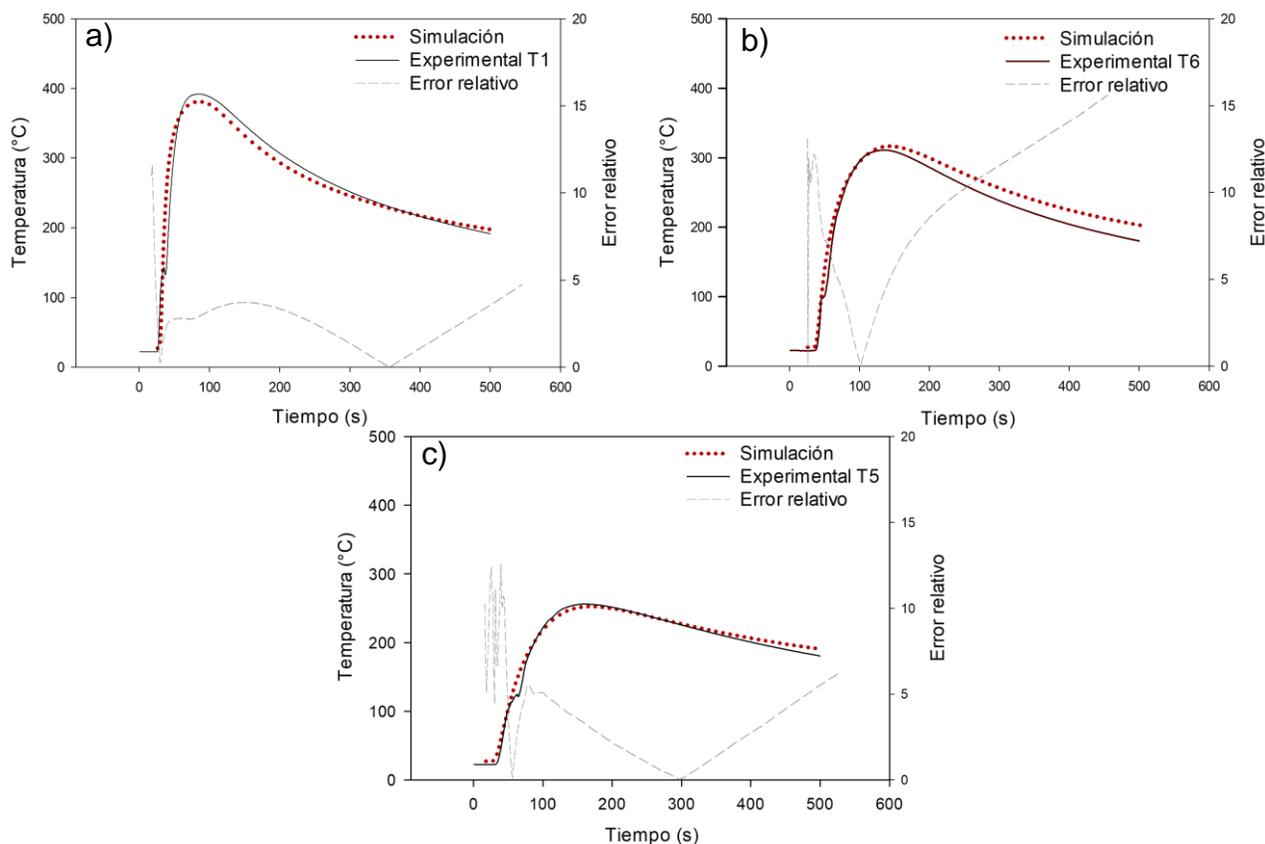


Figura 5.19 Gráficas de temperatura-tiempo simuladas y experimentales tomadas a distancias de a) 0.67, b) 0.97 y c) 1.27 pulgadas.

Para poder observar el comportamiento térmico en una placa donde se produjo porosidad se validó una simulación contra las curvas experimentales de la corrida 1, la cual fue a 1140 mm/min, una abertura de 4 mm, donde el error relativo promedio fue de 11%, ver Figura 5.20. Al igual que en el caso anterior fue posible reproducir el comportamiento térmico en los 3 puntos instrumentados, teniendo un error mínimo.

Se muestra que el comportamiento obtenido en la simulación reproduce el comportamiento térmico experimental y concuerda con lo que la literatura marca [36][73][91], ya que se muestra una disminución de la temperatura debido al aumento en la velocidad de soldadura. Lo cual sugiere que se está reproduciendo correctamente y valida la simulación que se presenta en las Figuras 5.21, 5.22 y Anexo B.

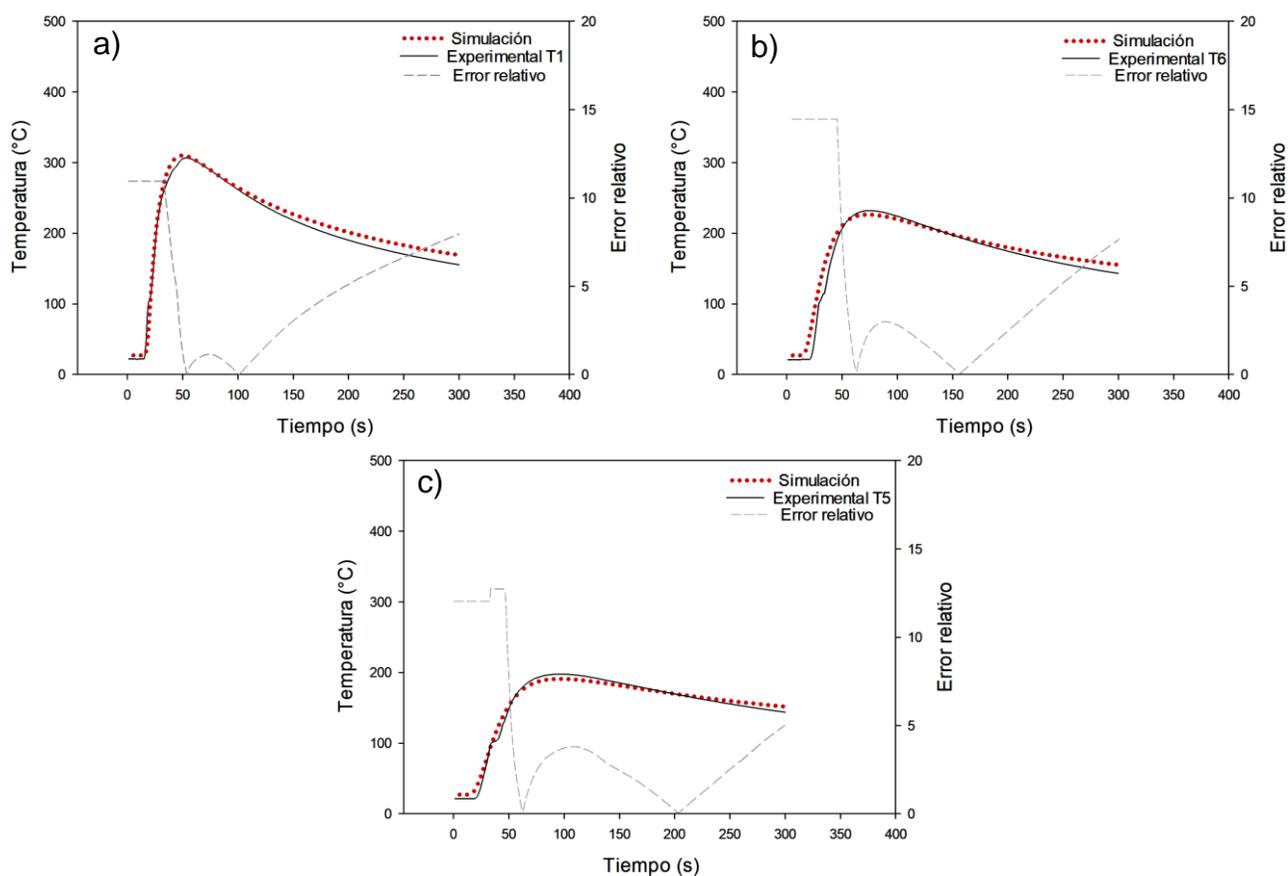


Figura 5.20 Gráficas de temperatura-tiempo simulada y experimental tomadas a distancias de a) 0.67, b) 0.97 y c) 1.27 pulgadas.

En la Figura 5.21 se muestra la variación de la temperatura con respecto al tiempo con y sin presencia de porosidad en base en la geometría de los cordones de la corrida 1 y 3 respectivamente y la velocidad de avance para cada corrida. La curva seleccionada se obtuvo cerca de la superficie de contacto de la fuente de calor.

El tiempo de solidificación en donde se presenta el poro es de 5s mientras que sin poro es de 6.5 s, es decir alrededor del 25% de diferencia.

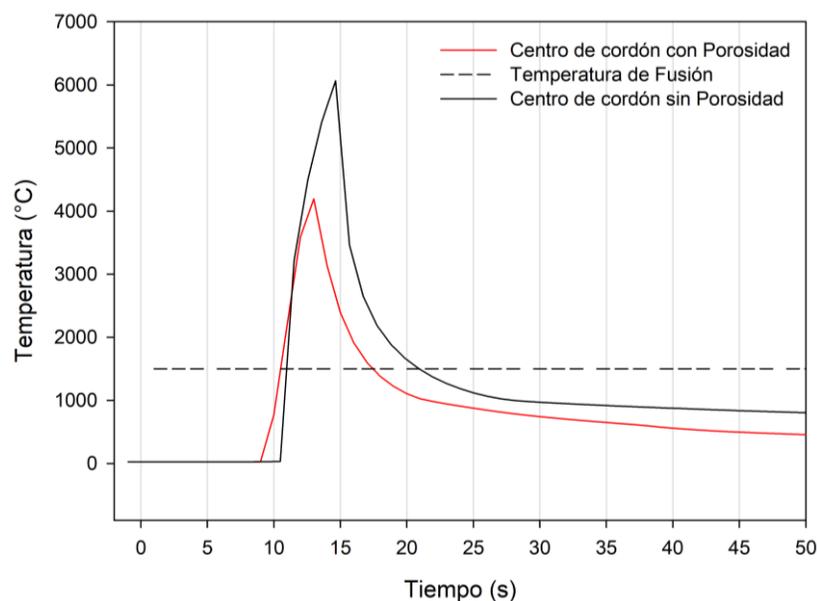


Figura 5.21 Curva térmica simulada en el centro del cordón de soldadura para las condiciones con y sin porosidad para el acero API 5L X70 PSL 2

Se muestra con la simulación que la temperatura en el charco de soldadura puede llegar por encima de los 4000 °C, lo que sugiere que los elementos del metal base, material de aporte, fundente y contaminantes involucrados en la unión soldada sobrepasan su temperatura de ebullición y como consecuencia se pueden volatilizar y generar gases. Estos pueden salir del charco líquido o quedarse atrapados dependiendo del tiempo de solidificación que se tenga disponible. Este está en función de los parámetros de velocidad de avance y abertura de raíz ya que al aumentar estos el tiempo de solidificación disminuye.

La Figura 5.22 muestra gráficamente la distribución de temperatura durante la soldadura sobre la superficie de contacto entre la fuente de calor y el sólido. En la Figura 5.22 (a-c) se muestra el comportamiento térmico en la corrida 3 y en la Figura 5.22 (d-f) de la corrida 1. Observando que al incrementar la velocidad de avance y disminuyendo el área de la fuente de calor, la distribución térmica disminuye, promoviendo una menor temperatura y mayor velocidad de enfriamiento sobre el material.

En el Anexo B se muestran gráficamente las distribuciones térmicas a nivel de los termopares, observando similitud en el comportamiento térmico.

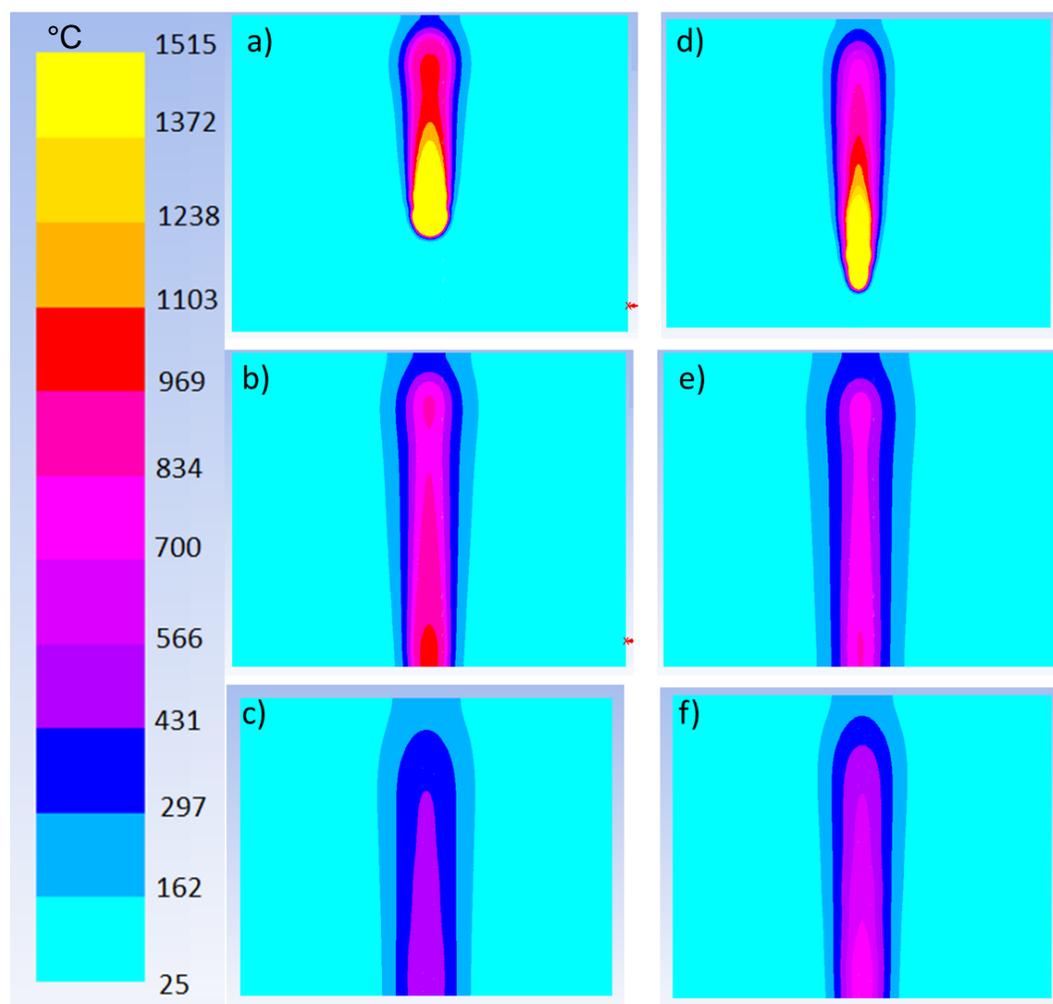


Figura 5.22 Evolución de la distribución de temperatura en el proceso de soldadura. corrida 3 a) 10 s, b) 20 s, c) 28 s y corrida 1 d) 10 s, e) 20 s, f) 28 s.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Se ha analizado la formación de porosidad en la fabricación de tuberías de grandes diámetros por medio del proceso SAWL, específicamente en los extremos de las tuberías derivado de una falta de unión durante el proceso previo de ERW, reportando lo siguiente:

- De acuerdo a las pruebas preliminares se dio a conocer que una mayor abertura de raíz reducía la afectación térmica, así como la dilución del metal de aporte al material base.
- Se le recomienda a la planta continuar aplicando la flama directa al extremo de las tuberías previo a la aplicación de GMAW, como también se le sugiere el colocar una placa delante de la boquilla de fundente para evitar aumentar el volumen de fundente depositado delante del charco líquido de soldadura.
- Los resultados del diseño de experimentos denotaron que la abertura de raíz fue la variable con mayor significancia, por lo que la presencia de porosidad es más frecuente a mayor abertura de raíz.

- La microestructura no se ve afectada por la presencia de microporosidad encontrada en la zona de fusión.
- Los resultados de microscopía electrónica de barrido de la caracterización de la porosidad mostraron la presencia de elementos químicos relacionados al fundente y al lubricante.
- La presencia de humedad y óxido en la superficie de soldadura promueve la porosidad, sin embargo, ésta se forma con mayor facilidad en presencia de agua.
- La instrumentación de las placas muestra que a una mayor abertura de raíz los gradientes térmicos en el metal base son menores, por lo que se tiene menos tiempo para que el metal en el charco solidifique promoviendo la aparición de porosidad.
- Con la velocidad de avance de igual manera se pudieron comparar las curvas térmicas obtenidas, encontrando que a menor velocidad de avance de soldadura los gradientes térmicos sobre el material base serán mayores.
- La simulación muestra que las temperaturas alcanzadas son mayores a la temperatura de evaporación de los componentes (fundente y lubricante), lo cual sugiere que se volatilizan generando gases que pudieran quedar atrapados dependiendo de la velocidad de enfriamiento del charco de soldadura.

TRABAJOS FUTUROS

El presente proyecto muestra oportunidades de estudio para profundizar en el mecanismo de formación de la porosidad y a su vez como mitigarla para mejorar el proceso productivo. Dentro de las recomendaciones para trabajos futuros se suscita lo siguiente:

- Estudiar la presencia de porosidad debido al fundente utilizado en este proceso de soldadura para profundizar en la cinética de evaporación de los gases generados durante la soldadura
- Profundizar en los modelos de mecanismo de formación de porosidad para llegar a mitigar o eliminar la porosidad a partir de dichos modelos
- Realizar pruebas experimentales para conocer la cinética de evaporación de los gases generados a partir de la soldadura por SAWL contaminada
- Optimizar el uso de la simulación al tomar en consideración la transformación de fases, el estado líquido del charco de soldadura y utilizar una fuente de calor elíptica
- Realizar pruebas específicas para obtener los valores termo físicos necesarios del material utilizado en el proyecto con el fin de mejorar el proceso de simulación

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Liu, H., *Pipeline Engineering*. USA: Lewis Publishers, 2003.
- [2] Antaki, G., *Piping and Pipeline Engineering*, vol. 159. USA: Marcel Dekker, 2003.
- [3] Jeffus, L., *Welding Principles and Applications*, 7th ed. New York, USA: Delmar Cengage Learning, 2012.
- [4] Svensson, L., *Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds*, 1st ed. Uxbridge, UK: CRC Press, 1994.
- [5] Kyriakides, S. et al., "Introduction," in *Mechanics of Offshore Pipelines, Volume I: Buckling and Collapse*, UK: Elsevier, 2007.
- [6] Winston, R., *Oil and Gas Pipelines Integrity and Safety Handbook*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [7] Goldak, J. et al., *Computational Welding Mechanics*. USA: Springer, 2005.
- [8] Volume, T.H.E. et al., *Welding, Brazing and Soldering*, vol. 6. USA: ASM International, 1993.
- [9] Legait, P.-A., "Formation and Distribution of Porosity in Al-Si Welds," Worcester Polytechnic Institute, 2005.
- [10] Castro, G., "A c e r o s," *Dep. Ing. mecánica F.I.U.B.A.*, 2009.
- [11] Alipooramirabad, H. et al., "Residual stress- microstructure- mechanical property interrelationships in multipass HSLA steel welds," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 231, pp. 456–467, 2016.
- [12] Mohammadijoo, M. et al., *Effect of Cold-Wire Addition in the TSAW Process on Microstructure and Mechanical Properties of the HAZ of X70 Microalloyed Pipeline Steel*. Alberta, Canada: Operations, Monitoring and Maintenance; Materials and Joining, 2016.
- [13] Rosado, D.B. et al., "Latest developments in mechanical properties and metallurgical features of high strength line pipe steels," 2013.
- [14] Sawhill, J.M.J., "Welding HSLA line pipe steels," *Metalloved. i Termieheskaya Obrab. Met.*, 1977.

- [15] API, *API 5L: Specification for Line Pipe*. USA, 2013.
- [16] Manikam, R.A.L., *Study of notch effect on the mechanical properties of modern gas pipeline*. Malasia, 2012.
- [17] Kou, S., *Welding Metallurgy*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [18] Bai, Q., *Subsea Pipeline Design, Analysis and Installation*. USA: Gulf Professional Publishing, 2014.
- [19] Steels, C., "Carbon-Manganese Steels," in *Subsea Pipeline Engineering*, PennWell B., USA, 2008.
- [20] Tubes, M. et al., "Pipe and Tube Manufacturing Processes," in *Mechanics of Offshore Pipelines*, Elsevier., UK, 2007.
- [21] Davis, J.R., *Corrosion of weldments*. USA: ASM International, 2006.
- [22] Singh, R., *Applied Welding Engineering*. Oxford, UK: Elsevier, 2016.
- [23] Weman, K., *Welding processes handbook*. Cambridge, England: Woodhead publishing limited, 2003.
- [24] Lcakaist, "Electric Resistance Welding," 2012. [Online]. Available: <http://www.lcakaist.org/2004/research/AbeadshapemonitoringsystemforHERWpipeproduction.htm>. [Accessed: 24-Nov-2016].
- [25] Kim, C. et al., "The effect of electromagnetic forces on the penetrator formation during high-frequency electric resistance welding," vol. 9, pp. 838–846, 2008.
- [26] Takatoshi, O. et al., "Numerical Analysis of Welding Phenomena in High-Frequency Electric Resistance Welding," *Key Eng. Mater.*, vol. 623, pp. 525–531, 2014.
- [27] Haga, B.Y.H. et al., "Welding Phenomena and Welding Mechanisms in High Frequency Electric Resistance Welding — 1st Report," *Weld. J.*, no. July, pp. 208–212, 1980.
- [28] Mohitpour, M., *Pipeline Operation and Maintenance*. New York, USA: ASME Press, 2005.
- [29] Grupmav, "Sistemas y procesos de soldadura," 2015. [Online]. Available: <http://www.grupmav.es/formacion/soldadura/especializada>.
- [30] The Lincoln Electric Co., *The Procedure Handbook of Arc Welding*. USA:

Lincoln Electric Co., 1973.

- [31] Messler, W., *Principles of Welding*, 2nd ed. New York, USA: Wiley-VCH, 2004.
- [32] Singh, B. et al., "Experimental study on effect of flux composition on element transfer during submerged arc welding," *Sāadhanā*, vol. 43, no. 2, pp. 1–12, 2018.
- [33] Rowe, M. et al., "The Effect of Ferro-Alloy Additions and Depth on the Quality of underwater wet welds," *Weld. J.*, no. AUGUST, pp. 156–166, 2002.
- [34] Bavaria, "Agglomerated welding flux BF 6.30," Germany, 2013.
- [35] Cho, D.W. et al., "Molten pool behavior in the tandem submerged arc welding process," 2014.
- [36] Dhollander, R. et al., *Multiwire submerged arc welding of structures*. Belgica: Universidad de Ghent, 2012.
- [37] Costa, P.S. et al., "Optimización de los Parámetros de Soldadura por Arco Sumergido en Acero HSLA : una Aplicación para Manufactura de Tuberías de Conducción de Hidrocarburos," vol. 20, no. 4, pp. 456–466, 2015.
- [38] Sailender, M. et al., "Influences of Process Parameters on Heat Affected Zone in Submerged Arc Welding of Low Carbon Steel," *American Journal of Materials Science*, India, 2016.
- [39] Podder, D. et al., "Heat Source Modeling and Analysis of SAW," *Welding Journal*, USA, 2014.
- [40] Singh, A. et al., "Optimization of bead geometry of submerged arc weld using fuzzy based desirability function approach," India, 2011.
- [41] Murugan, N. et al., "Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes," India, 2005.
- [42] Scutelnicu, E. et al., "Prediction of Cooling Rate in API-5L-X70 Steel Plates welded by Submerged Double-Arc Welding," Rumania, 2013.
- [43] Alam, S. et al., "Prediction of the Effect of Submerged Arc Welding Process Parameters on Weld Bead Width for MS 1018 Steel," USA, 2012.
- [44] Li, K. et al., "Metal transfer in submerged arc welding," *J. Mater. Process.*

- Technol.*, vol. 244, pp. 314–319, 2017.
- [45] API, “API 1104: Welding of Pipelines and Related Facilities,” USA, 2013.
- [46] Houldcroft, P.T., *Submerger-Arc Welding*. England: Abington Publishing, 1989.
- [47] Rybakov, A.A., *Cracks in welded joints of large diameter pipes and measures for their prevention*. Ucraina: Scientific and Technical, 2013.
- [48] Gupta, S., “Welding Defects,” 2014. [Online]. Available: <http://nptel.ac.in/courses/112107144/welding/lecture13.htm>. [Accessed: 06-Oct-2016].
- [49] Huang, L. et al., “Numerical study of keyhole instability and porosity formation mechanism in laser welding of aluminum alloy and steel,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 252, no. 2018, pp. 421–431, 2017.
- [50] Courtois, M. et al., “Guidelines in the experimental validation of a 3D heat and fluid flow model of keyhole laser welding,” *Phys. D Appl. Phys.*, vol. 49, 2016.
- [51] Bunaziv, I. et al., “Fiber laser-MIG hybrid welding of 5 mm 5083 aluminum alloy,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 233, pp. 107–114, 2016.
- [52] Xu, J. et al., “Keyhole-induced porosity formation during laser welding,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 252, no. July 2017, pp. 720–727, 2018.
- [53] Trevistan, R.E. et al., “The fundamentals of weld metal pore formation,” in *Welding: Theory and Practice*, New York, USA: Elsevier B.V., 1990, pp. 79–115.
- [54] Cui, S. et al., “Microstructure evolution and mechanical properties of keyhole deep penetration TIG welds of S32101 duplex stainless steel,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 709, no. June 2017, pp. 214–222, 2018.
- [55] Ma, J. et al., “Finite-element thermal analysis of laser welding of galvanized high-strength steel in a zero-gap lap joint configuration and its experimental verification,” *Mater. Des.*, vol. 36, pp. 348–358, 2012.
- [56] Stützer, J., “Studies on the pore formation in super duplex stainless steel welds,” *Weld. World*, pp. 351–359, 2017.
- [57] Chang, R. et al., “Kinetic Theory of Gases,” in *Physical Chemistry for the*

- Chemical Sciences*, Canada: University Science Books, 2014, pp. 35–71.
- [58] Safarian, J. et al., "Vacuum Evaporation of Pure Metals," vol. 44, no. February, pp. 747–753, 2013.
- [59] Fang, Z.Z., *Sintering of advanced materials*. USA: Woodhead publishing limited, 2010.
- [60] Smith, P.N. et al., "The Evaporation of Liquid Iron Alloys Under Vacuum," *Can. Metall. Q.*, vol. 5, pp. 77–92, 1966.
- [61] Zhu, C. et al., "Molten pool behaviors and their influences on welding defects in narrow gap GMAW of 5083 Al-alloy," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 126, pp. 1206–1221, 2018.
- [62] Eagar, T.W. et al., "Metal Vaporization from Weld Pools," *Metall. Trans. B*, vol. 15, no. SEPTEMBER, pp. 461–470, 1984.
- [63] Ogasawara, Y. et al., "Rates of evaporation in a Vacuum in Liquid Ni-Ti Alloys," *ISIJ Int.*, vol. 38, pp. 789–793, 1998.
- [64] Bellot, J.P. et al., "Evaporation of Fe and Cr from Induction-stirred Austenitic Stainless Steel . Influence of the Inert Gas Pressure," *ISIJ Int.*, vol. 41, no. 7, pp. 696–705, 2001.
- [65] Smirnov, B.M. et al., "Growth of bubbles in liquid," *Chem. Cent. J.*, pp. 1–8, 2015.
- [66] Silva, W.F. et al., "Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje," *Prospectiva*, vol. 15, no. 2, pp. 135–144, 2017.
- [67] Paniagua-mercado, A.M. et al., "Effect of Active and Nonactive Fluxes on the Mechanical Properties and Microstructure in Submerged-Arc Welds of A-36 Steel Plates," *Mater. Manuf. Process.*, pp. 31–34, 2007.
- [68] Naumov, S. V et al., "Submerged Arc Welding Using Slag Base of West Urals Mineral Raw Resources with Low Detrimental Content," *Procedia Eng.*, vol. 206, pp. 1355–1359, 2017.
- [69] Volume, T.H.E. et al., *Nondestructive Evaluation and Quality Control*. USA: ASM International, 1993.
- [70] Grong, O., *Metallurgical Modelling of Welding*, Second. Trondheim, Norway, 1997.

- [71] Montgomery, D., *Design and analysis of experiments*, Eight. Arizona, US: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [72] Wackerly, D. et al., *Mathematical Statistics with Applications*, Seventh. USA: Thomson Brooks, 2008.
- [73] Sharma, A. et al., "Mathematical model of bead profile in high deposition welds," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 220, pp. 65–75, 2015.
- [74] Gunaraj, V. et al., "Prediction of Heat-Affected Zone Characteristics in Submerged Arc Welding of Structural Steel Pipes," *Weld. J.*, pp. 94–98, 2002.
- [75] Narang, H.K. et al., "Modelling and predicting the effects of submerged arc weldment process parameters on weldment characteristics and shape profiles," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 226, no. 7, pp. 1230–1240, 2012.
- [76] Kiran, D. V et al., "Influence of process variables on weld bead quality in two wire tandem submerged arc welding of HSLA steel," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, pp. 2041–2050, 2012.
- [77] Om, H. et al., "Mathematical Modeling Of HAZ In Submerged Arc Welding Process Using Factorial Design Technique," *Proc. Natl. Conf. Trends Adv. Mech. Eng.*, vol. 1, pp. 616–626, 2012.
- [78] Tarng, Y.S. et al., "Application of the Taguchi Method to the Optimization of the Submerged Arc Welding Process," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 13, pp. 455–467, 1998.
- [79] Sharma, M. et al., "Optimization Of Weld Bead Geometrical Parameters For Bead On Plate Submerged Arc Welds Deposited On IS-2062 Steel Using Taguchi Method," *Int. J. Tech. Res. Appl.*, vol. 2, no. 1, pp. 8–11, 2014.
- [80] Kanjilal, P. et al., "Prediction of Mechanical Properties in Submerged Arc Weld Metal of C – Mn Steel," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 22, pp. 114–127, 2007.
- [81] Kumar, V., "Modeling of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding using developed fluxes," *Jordan J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 5, no. 5, pp. 461–470, 2011.

- [82] Raja, J.E. et al., "Optimization of parameters of submerged arc weld using non conventional techniques," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 11, no. 8, pp. 5198–5204, 2011.
- [83] Ghosh, A. et al., "Prediction of Submerged Arc Welding Yield Parameters through Graphical Technique," *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 2797–2802, 2011.
- [84] Tao, W. et al., "Simulating effects of welding speed on melt flow and porosity formation during double-sided laser beam welding of AA6056-T4 / AA6156-T6 aluminum alloy T-joint," *J. Alloys Compd.*, vol. 699, pp. 638–647, 2017.
- [85] Krishnaswamy, K., *Industrial instrumentation*. India: New Age International Publishers, 2003.
- [86] ASME, "ASME Section 5. Nondestructive Examination," New York, USA, 2013.
- [87] Huang, Z. et al., "Numerical Simulations of temperature for the in-service welding of gas pipeline," *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 248, pp. 72–78, 2017.
- [88] Sridhar, P.V.S.S. et al., "Experimental and Numerical Prediction of Thermal history in Single Sided Single pass Submerged Arc Welding of Austenitic Stainless Steel," in *6th International & 27th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, 2016, pp. 1796–1800.
- [89] Nezamdost, M.R. et al., "Investigation of temperature and residual stresses field of submerged arc welding by finite element method and experiments," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, UK, pp. 615–624, 2016.
- [90] Forouzan, M.R. et al., "Residual stress prediction in submerged arc welded spiral pipes," *Mater. Des.*, vol. 33, pp. 384–394, 2012.
- [91] Nóbrega, J.A. Da et al., "Numerical Evaluation of Temperature Field and Residual Stresses in an API 5L X80 Steel Welded Joint Using the Finite Element Method," *Metals (Basel)*, vol. 6, no. 28, pp. 1–14, 2016.

- [92] Cho, D. et al., "Analysis of molten pool behavior by flux-wall guided metal transfer in low-current submerged arc welding process," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 110, pp. 104–112, 2017.
- [93] Paredes, M. et al., "Prediction of Crack Initiation and Propagation in X70 Pipeline Steels," *Eng. Fract. Mech.*, 2016.
- [94] Aucott, L.A., "Mechanism of Solidification Cracking during Welding of High Strength Steels for Subsea Linepipe," University of Leicester, Leicester, 2015.
- [95] Moya, L. et al., "Desde el aceite lubricante usado hasta su puesta en el mercado tras su regeneración," Madrid, España, 2010.
- [96] Milacron, "Cloro y Fluidos para Trabajo de Metales: Preguntas y Respuestas," Queretaro, Mexico, 2004.
- [97] Torres Mata, M., "Crecimiento y deformación del óxido durante la laminación en caliente de aceros de bajo carbono," Universidad Autónoma de Nuevo León, 1992.

Lista de Figuras

Figura 2.1. Proceso de fabricación de tubería en planta TUBACERO S. de R.L. de C.V.	11
Figura 2.2. Esquema de las regiones en una soldadura.	13
Figura 2.3 Proceso de soldadura GMAW	15
Figura 2.4 Proceso de soldadura ERW para tuberías.....	16
Figura 2.5. Esquema del proceso de soldadura por arco sumergido, SAW	17
Figura 2.6. Variación de la deposición de soldadura vs el amperaje suministrado con diferentes números de alambres.....	19
Figura 2.7 Efecto del voltaje en una soldadura	20
Figura 2.8 Efecto de la polaridad en una soldadura	21
Figura 2.9 Efecto de la corriente en una soldadura	21
Figura 2.10 Representación esquemática del efecto de la velocidad de avance con respecto a la geometría del cordón	22
Figura 2.11 Tipos de porosidades que pueden presentarse en soldadura a) dispersa, b) agrupada, c) lineal, d) tubular o wormholes	26
Figura 2.12 Relación entre el radio de burbuja con respecto a la velocidad de ascenso y el tiempo	29
Figura 2.13 Imágenes radiográficas de tipos de porosidad en cordones de soldadura de porosidad a) agrupada b) dispersa c) lineal	34
Figura 3.1 Diagrama de metodología	44
Figura 4.1 Representación esquemática de las mediciones realizadas a las muestras de la prueba de la abertura de raíz	47
Figura 4.2 Colocación y numeración de termopares	49
Figura 4.3 Instrumentación con termopares a) tubo cerámico para protección de cables y b) placa instrumentada.....	51
Figura 4.4 Equipo industrial para radiografía industrial (Cortesía TUBACERO) .	52
Figura 4.5 Equipos utilizados a) densitómetro y b) negatoscopio.....	53

Figura 4.6 Equipos utilizados a) microscopio óptico y b) microscopio electrónico de barrido	54
Figura 4.7 Esquema de trabajo utilizado en el proceso de simulación	55
Figura 4.8 Dimensiones de las placas para simulación y superficies semi elípticas para entrada de flujo de calor (A)	55
Figura 4.9 Malla utilizada para simulación del proceso SAWL	57
Figura 4.10 Condiciones de frontera en el sistema	62
Figura 5.1 Gráficos obtenidos de la variación de la abertura de raíz con respecto a: a) zona afectada por el calor, b) ancho del cordón y c) dilución para las pruebas en planta.....	65
Figura 5.2 Actividades realizadas en planta a) Aplicación de flama, b) corte manual con disco, c) Fundición de metal con plasma	66
Figura 5.3 Área analizada para cuantificación de discontinuidades en las placas radiográficas	67
Figura 5.4 Defectos observados por radiografía, a) porosidad aislada, b) porosidad agrupada, c) falta de fusión, d) escoria, e) socavado, f) porosidad al final del cordón	68
Figura 5.5 Efecto de los niveles del DOE contra el porcentaje de porosidad	70
Figura 5.6 Gráfica de cubo de resultados del DOE factorial 2^3 con puntos centrales	70
Figura 5.7 Micrografía óptica del charco de soldadura de cupones soldados de acero API 5L X70 con zona de fusión a) sana y b) con porosidad	71
Figura 5.8 Caracterización realizada mediante MEB observada a) 4X y b) 997X. c) Micrografía indicando el área de análisis y d) su espectro EDS.....	73
Figura 5.9 Caracterización realizada mediante MEB observada a) 12X. b) Micrografía indicando el área de análisis a 6166X. c) espectro EDS puntual y d) espectro EDS del área seleccionada	74
Figura 5.10 Mapeo en zona del charco de soldadura con porosidad a 2800x.....	75
Figura 5.11. Relación entre el radio de burbuja y la masa de hidrógeno para generarlo a distintas temperaturas	76

Figura 5.12. Relación de la temperatura y la masa necesaria de H_2O o Fe_2O_3 para generar una burbuja de 2 mm	77
Figura 5.13. Relación del espesor requerido para generar un radio especificado a distintas temperaturas	78
Figura 5.14 Micrografías a especímenes oxidados para observar dimensión de capa de óxido	78
Figura 5.15 Comportamiento térmico sobre placas soldadas en termopares a) lado derecho, b) lado izquierdo	79
Figura 5.16 Curvas de perfil térmico registradas a 0.67, 0.97 y 1.27 pulgadas de la superficie de soldadura, para los experimentos 3 y 11 donde se varió la abertura de raíz de 0 a 4 mm	81
Figura 5.17 Curvas de perfil térmico registradas a 0.67,0.97 y 1.27 pulgadas de la superficie de soldadura para las velocidades de avance de 760 y 1140 mm/min que corresponden a las pruebas 7 y 12 respectivamente.....	81
Figura 5.18 Caracterización a) Radiografía con termopares con y sin porosidad y curvas de perfil térmico de la prueba 8 b) Primer paso y c) Segundo paso.....	82
Figura 5.19 Gráficas de temperatura-tiempo simuladas y experimentales tomadas a distancias de a) 0.67, b) 0.97 y c) 1.27 pulgadas	83
Figura 5.20 Gráficas de temperatura-tiempo simulada y experimental tomadas a distancias de a) 0.67, b) 0.97 y c) 1.27 pulgadas.....	84
Figura 5.21 Curva térmica simulada en el centro del cordón de soldadura para las condiciones con y sin porosidad para el acero API 5L X70 PSL 2	85
Figura 5.22 Evolución de la distribución de temperatura en el proceso de soldadura. corrida 3 a) 10 s, b) 20 s, c) 28 s y corrida 1 d) 10 s, e) 20 s, f) 28 s ..	86

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Composición química de un acero API 5L X70 PSL 2 (% e.p.)	10
Tabla 2.2. Eficiencia del arco eléctrico en un proceso de soldadura	14
Tabla 2.3 Composición química del fundente BF 6.30	20
Tabla 2.4 Temperaturas de evaporación de agentes contaminantes	25
Tabla 2.5 Ventajas y desventajas de la técnica de radiografía industrial	34
Tabla 3.1 Datos para elaboración de matriz de diseño de experimentos	41
Tabla 4.1 Valores de los parámetros utilizados en la prueba	46
Tabla 4.2 Matriz de diseño para corridas experimentales	48
Tabla 4.3 Corridas experimentales	48
Tabla 4.4 Parámetros de soldadura por GMAW para respaldo	50
Tabla 4.5 Parámetros en máquina para realizar las pruebas de soldadura	52
Tabla 4.6 Valores para la simulación de la probeta 3 del proceso SAWL.....	60
Tabla 4.7 Valores para la simulación de la probeta 1 del proceso SAWL.....	61
Tabla 5.1 Resultados de experimentación al modificar la abertura de raíz	64
Tabla 5.2 Resultados de actividades desarrolladas en planta para mejorar la limpieza de la abertura de raíz	66
Tabla 5.3. Valores obtenidos de respuesta de la experimentación realizada	68
Tabla 5.4 Análisis de varianza para porcentaje de porosidad	69

Anexo A

Curvas obtenidas durante DOE

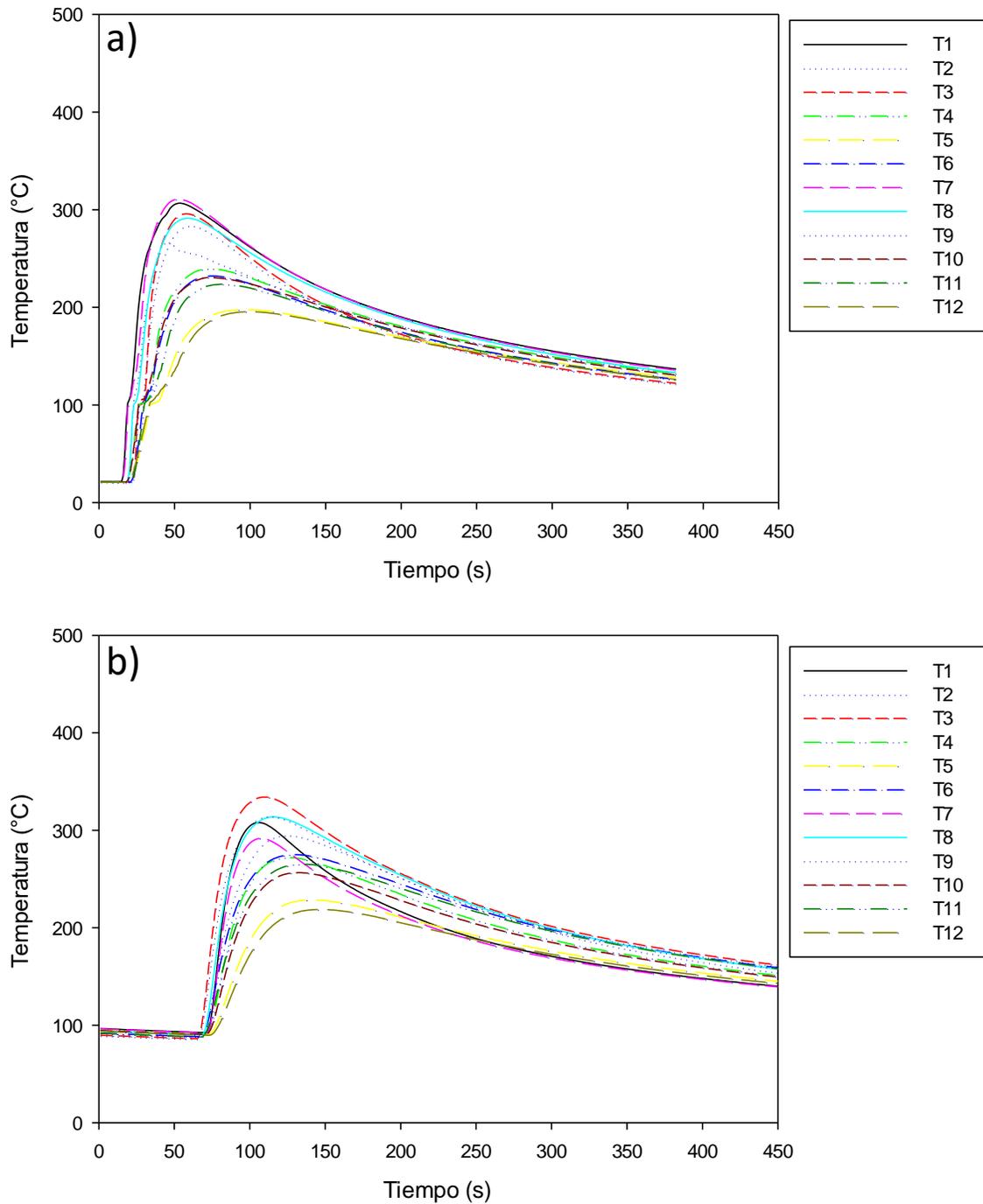


Figura A1. Curvas del experimento 1 a) Primer paso y b) Segundo paso

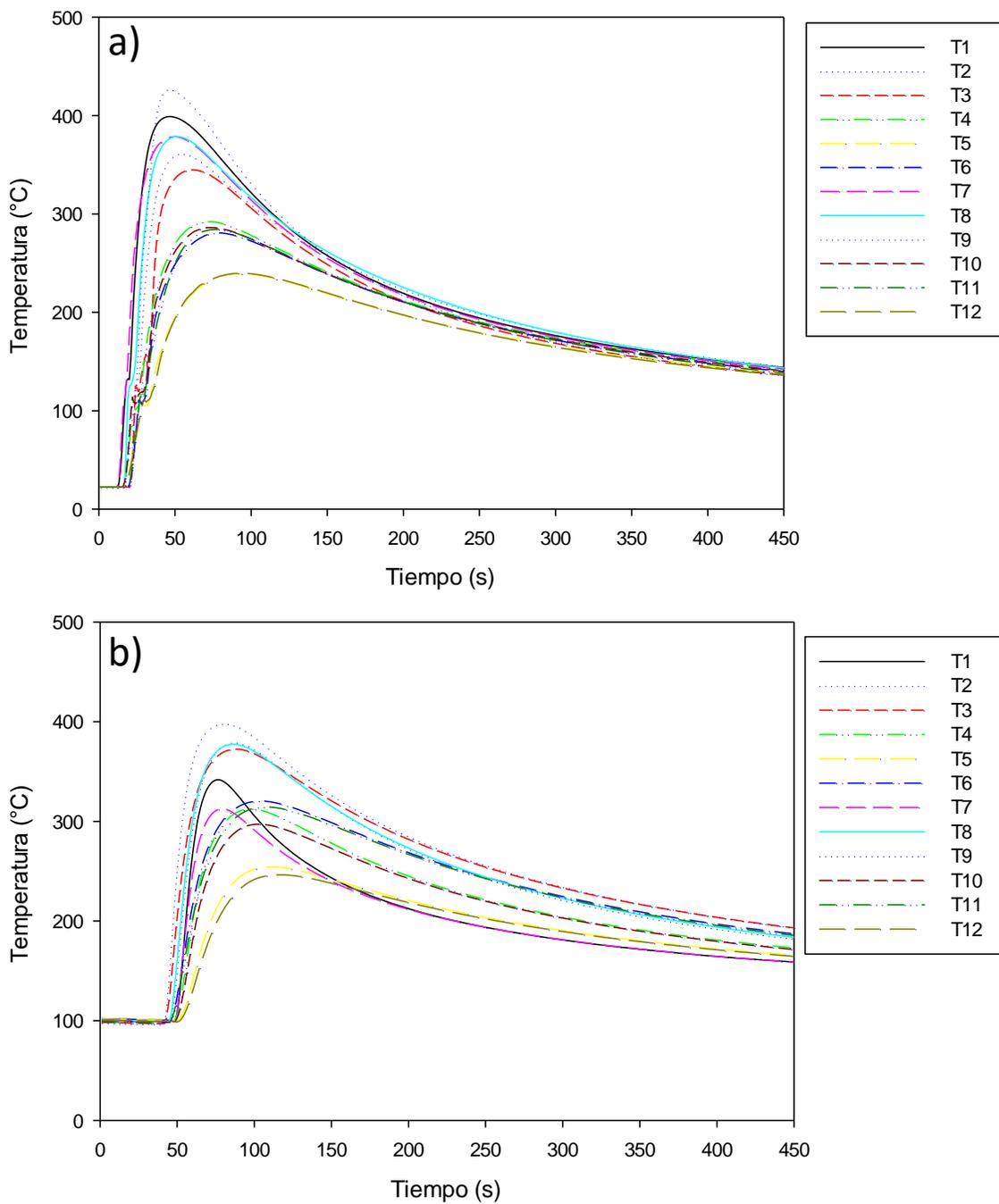


Figura A2. Curvas del experimento 2 a) Primer paso y b) Segundo paso

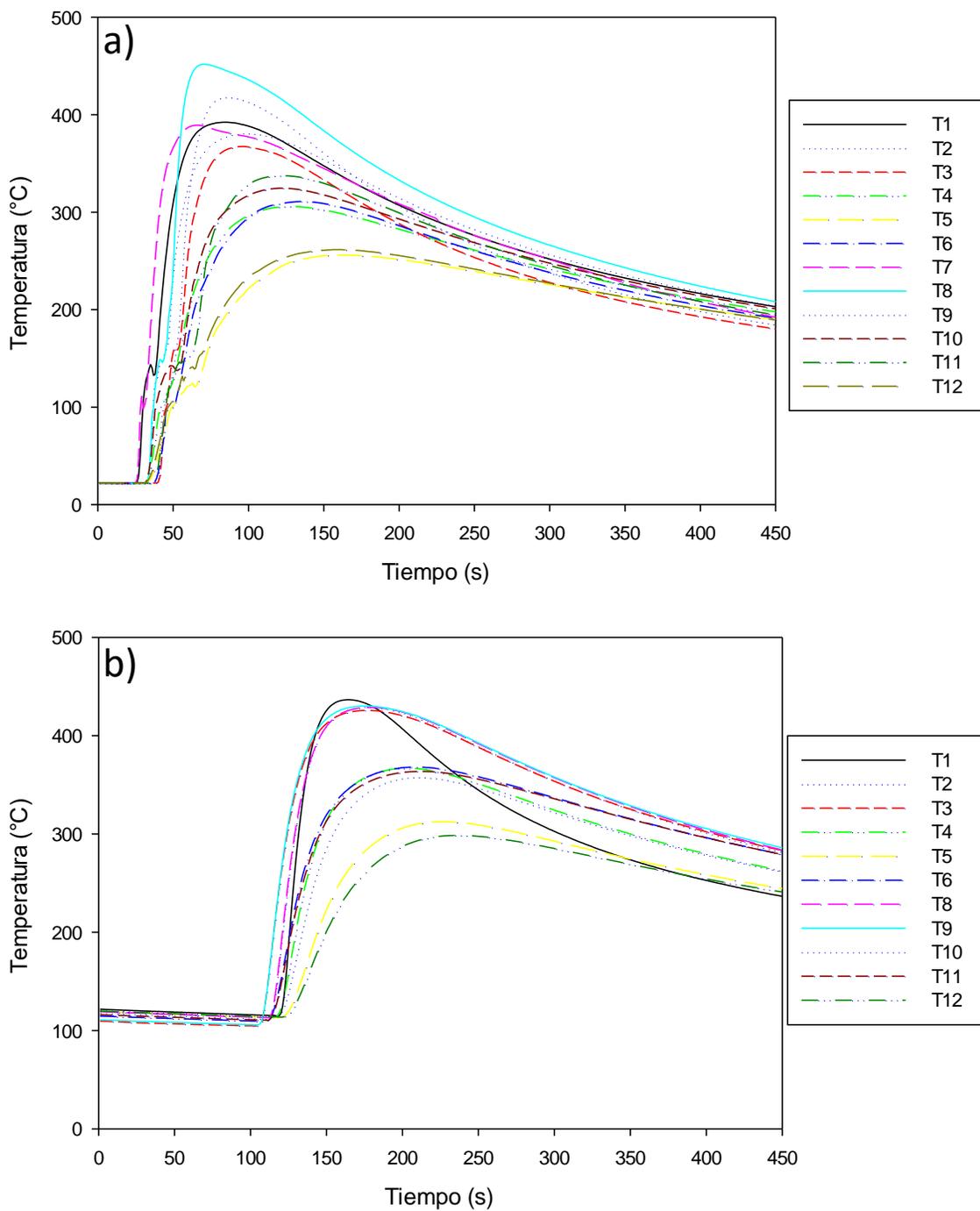


Figura A3. Curvas del experimento 3 a) Primer paso y b) Segundo paso

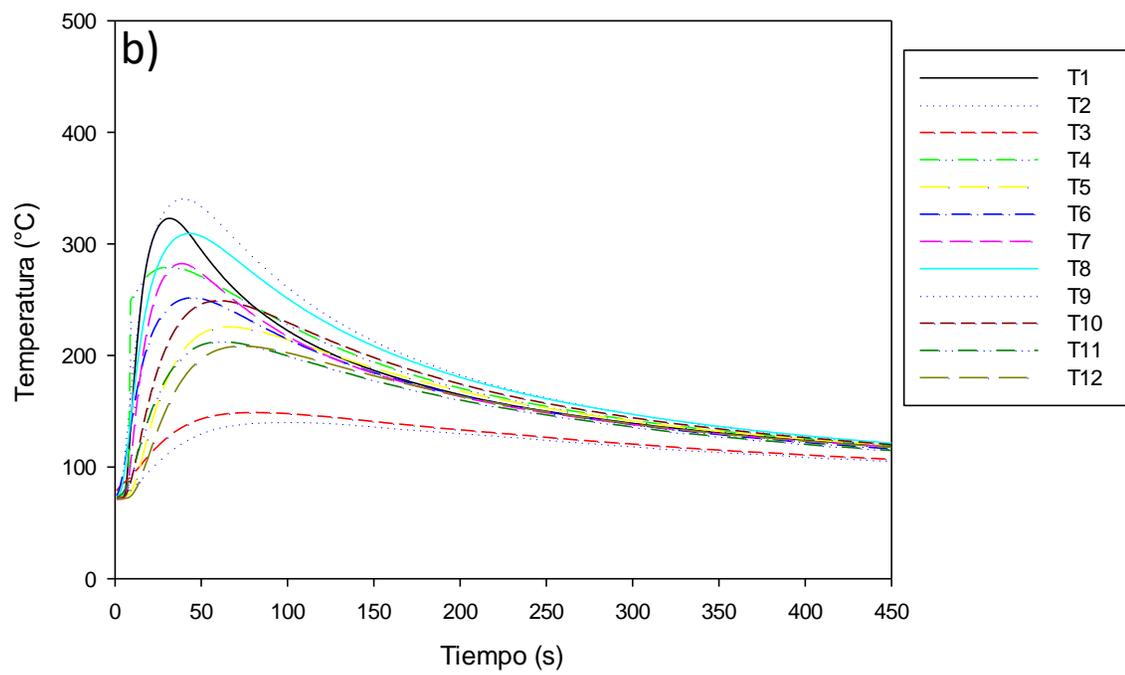
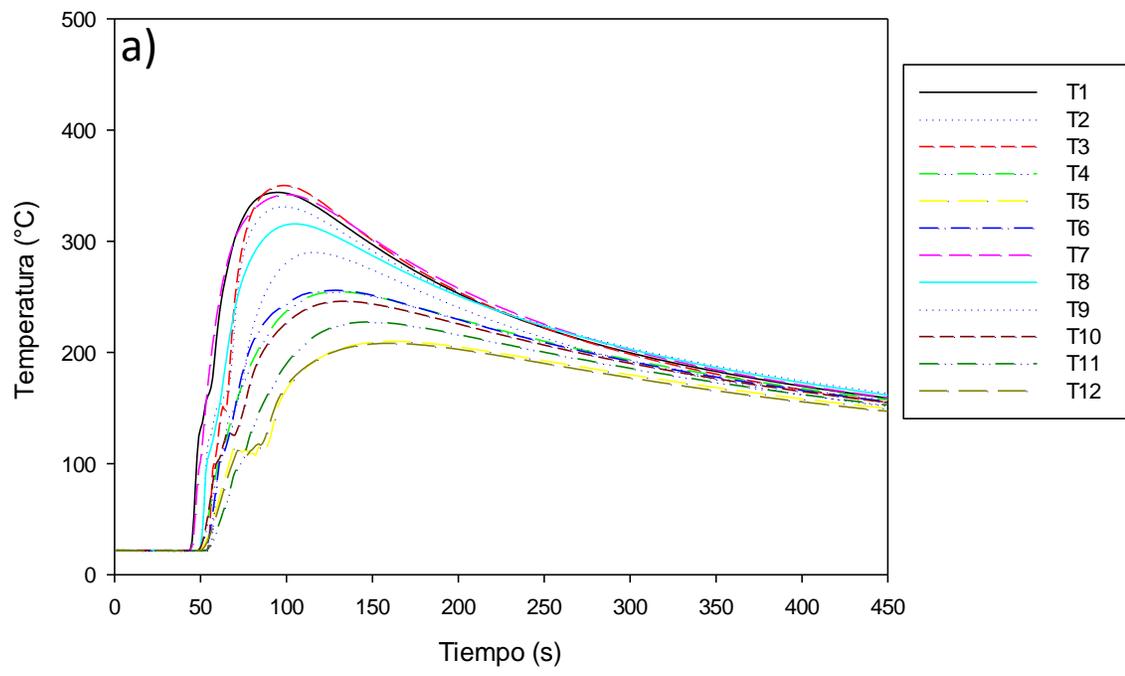


Figura A4. Curvas del experimento 6 a) Primer paso y b) Segundo paso

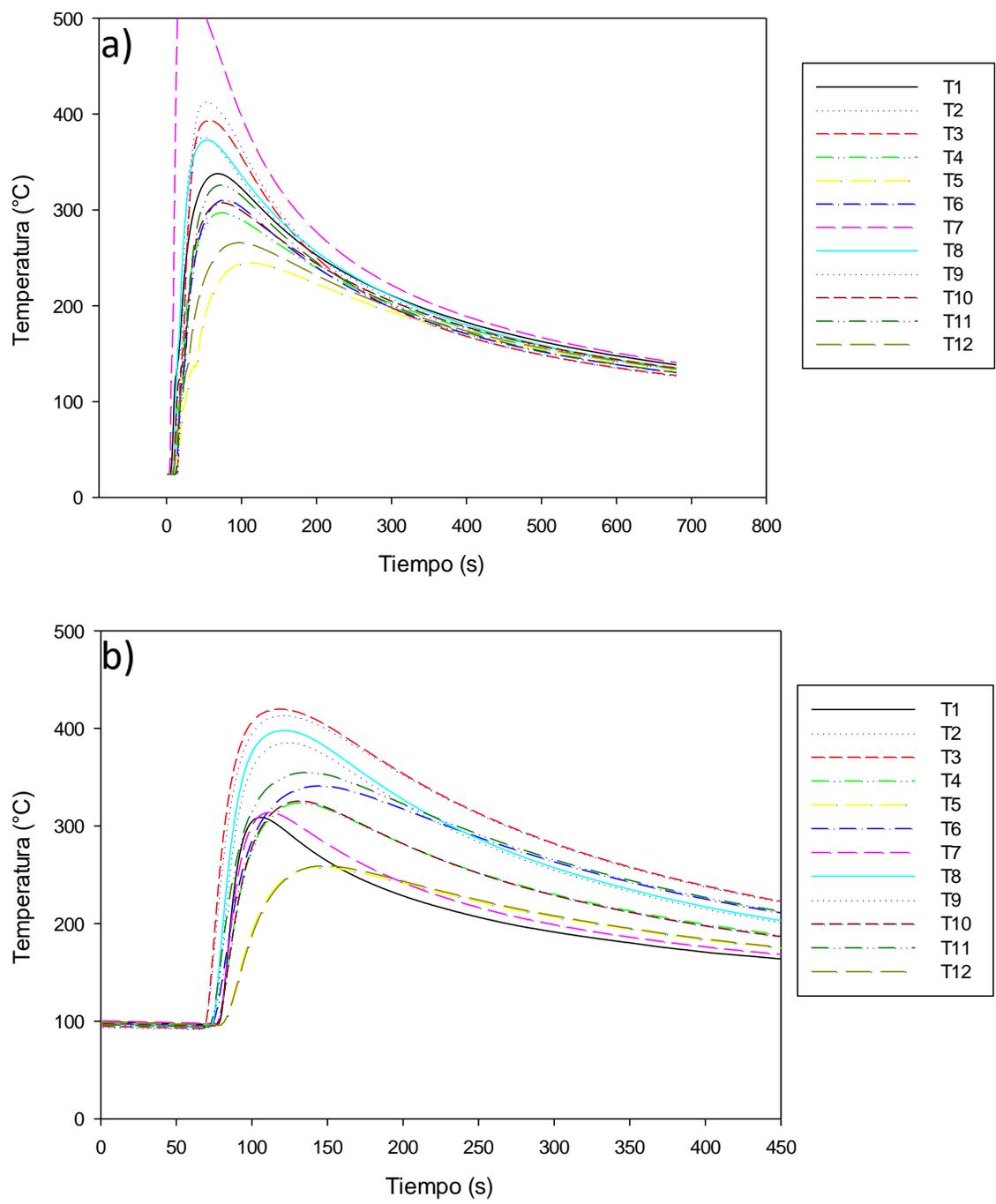


Figura A5. Curvas del experimento 7 a) Primer paso y b) Segundo paso

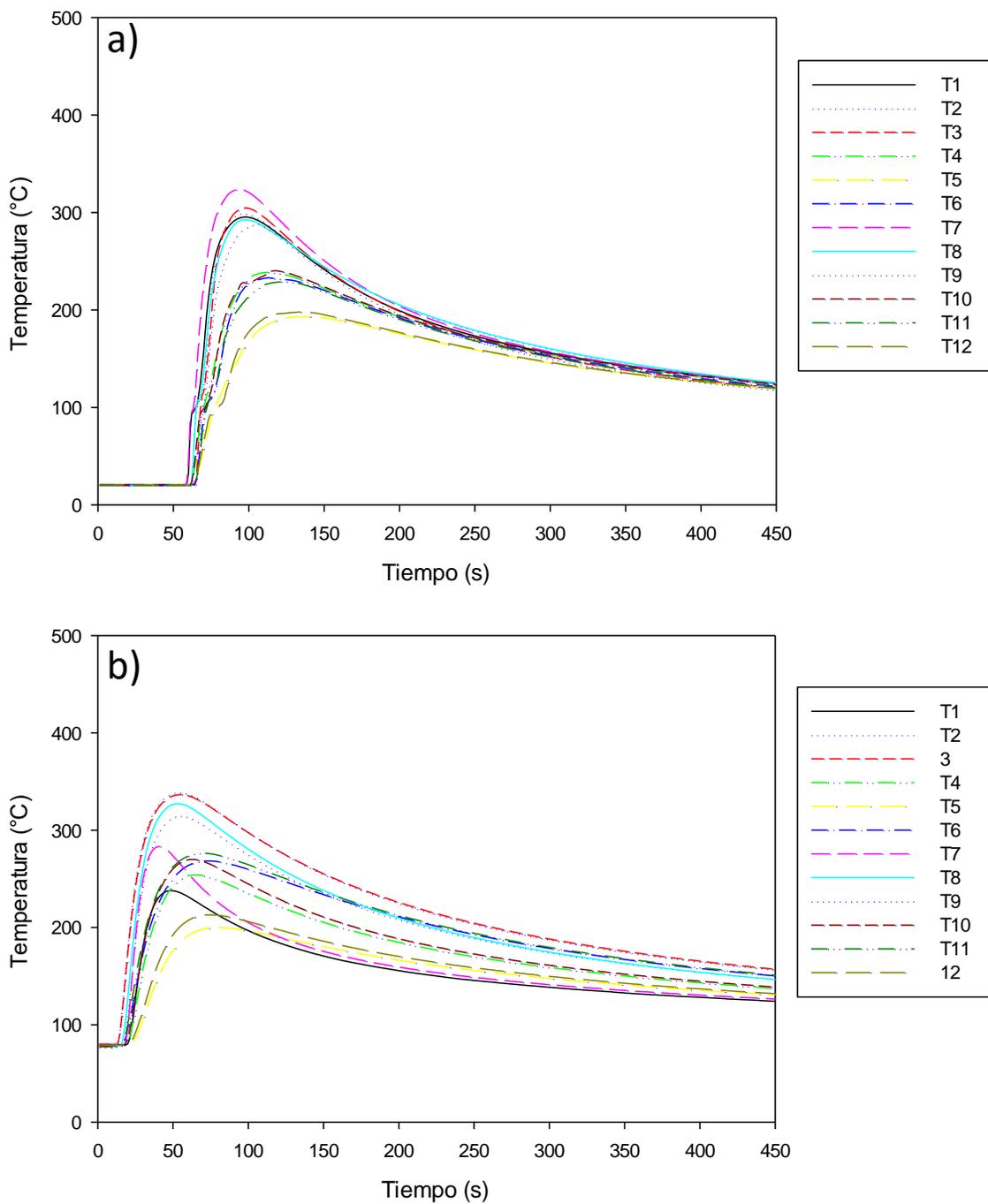


Figura A6. Curvas del experimento 8 a) Primer paso y b) Segundo paso

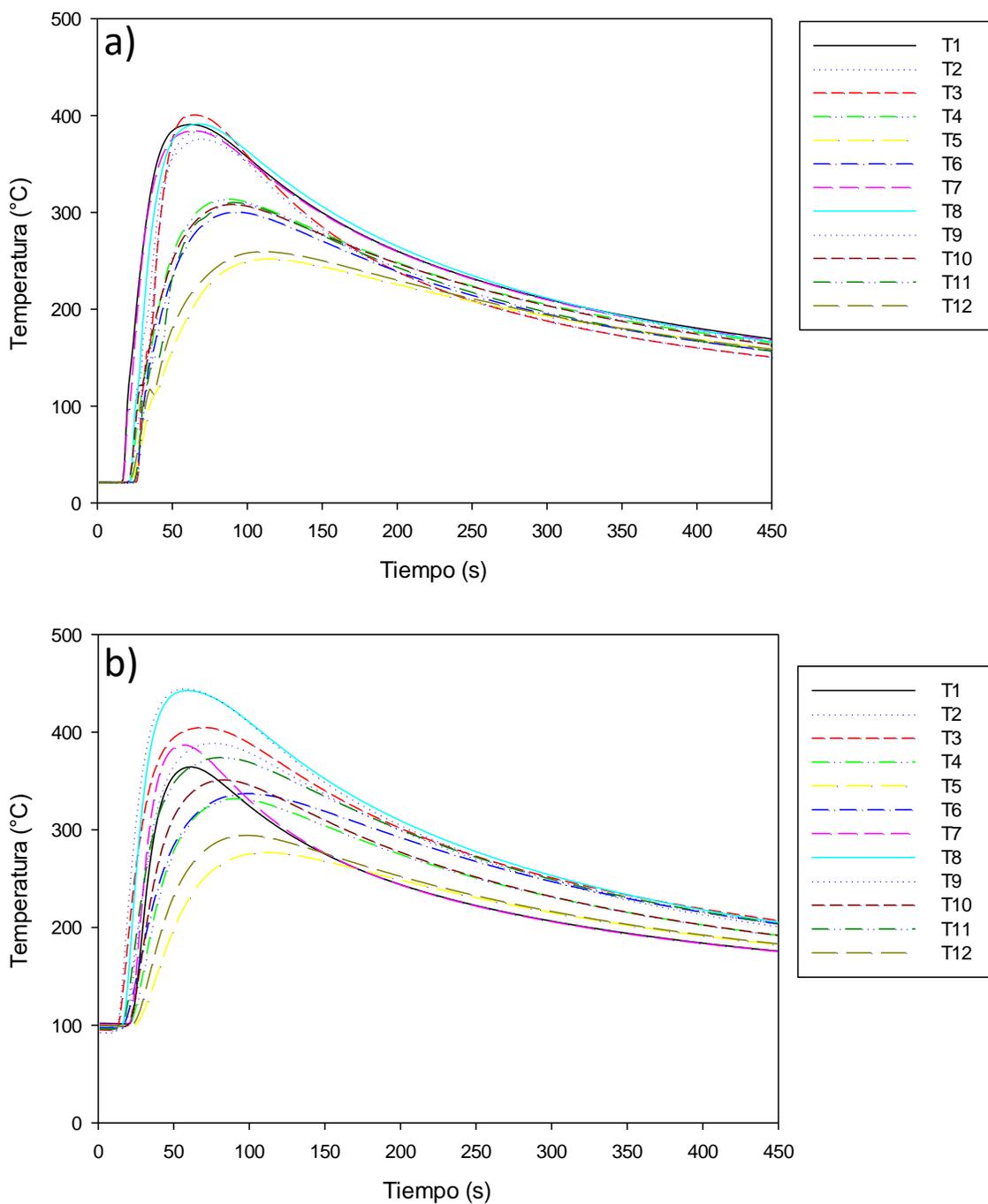


Figura A7. Curvas del experimento 11 a) Primer paso y b) Segundo paso

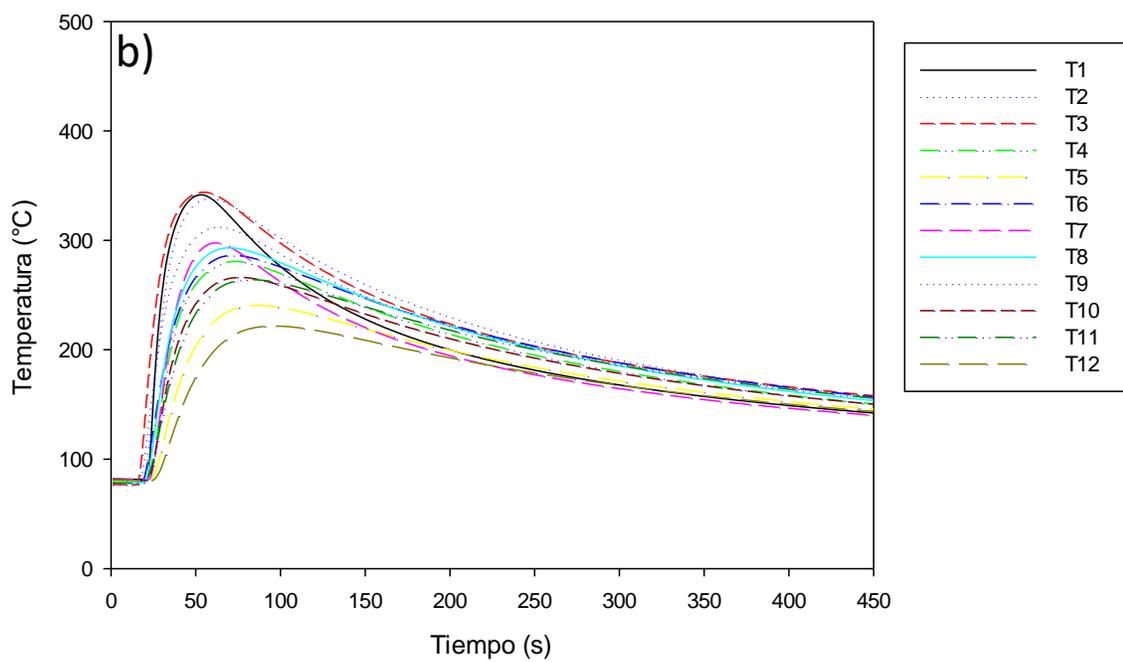
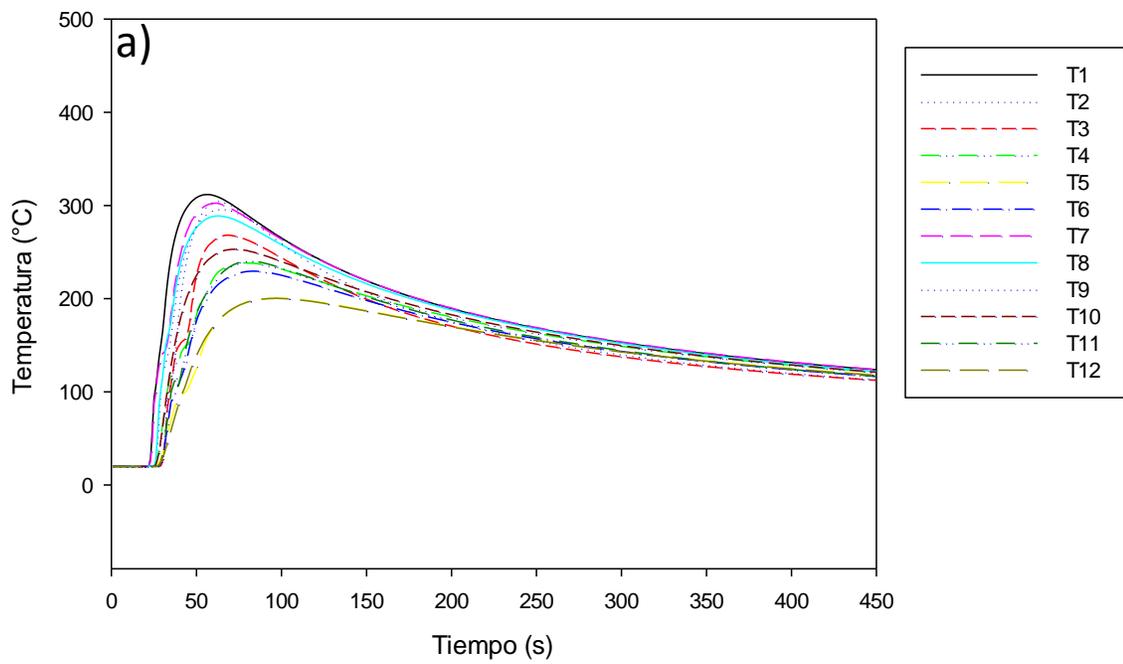


Figura A8. Curvas del experimento 12 a) Primer paso y b) Segundo paso

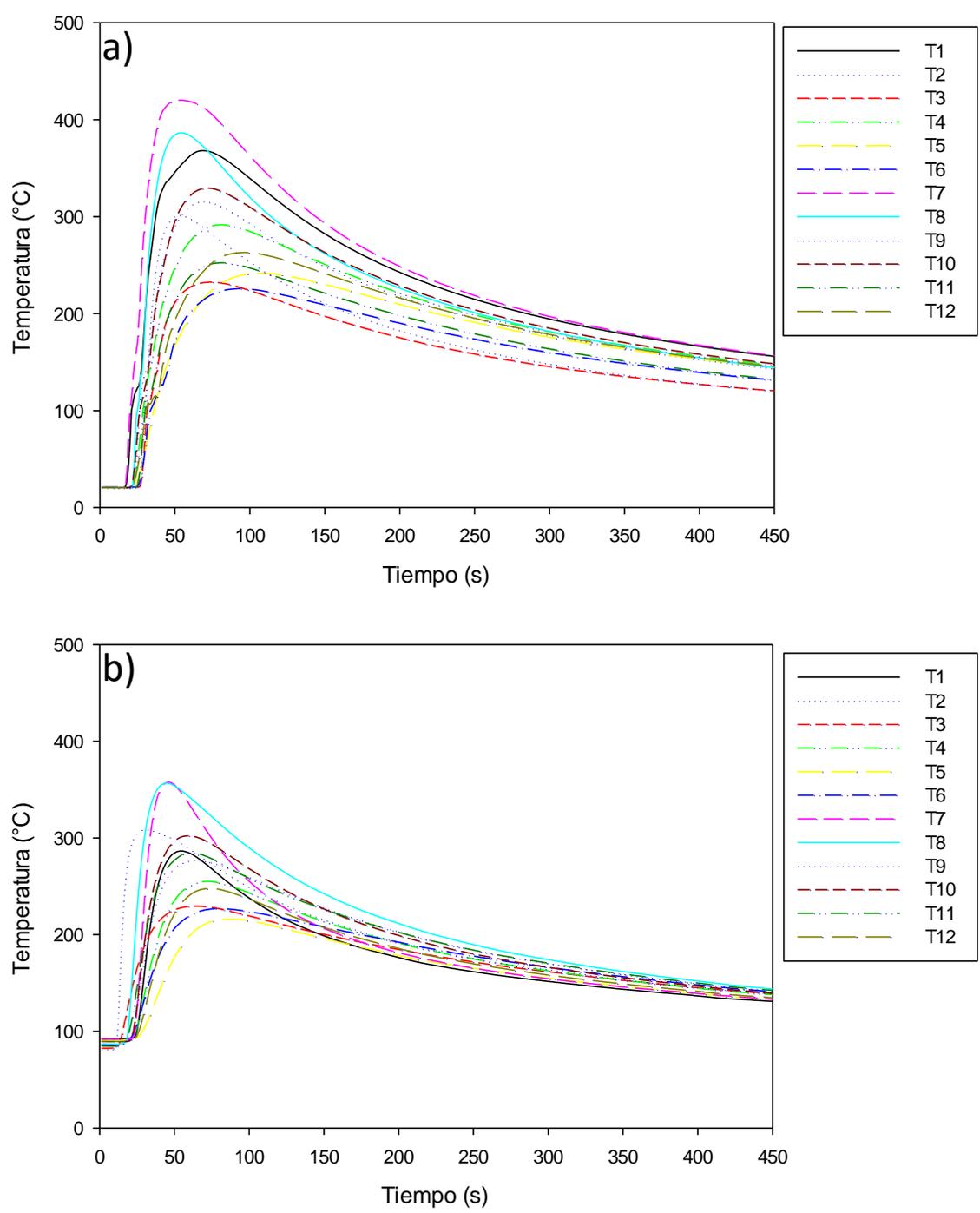


Figura A9. Curvas del experimento 13 a) Primer paso y b) Segundo paso

Anexo B

Distribución de la temperatura a nivel de termopares

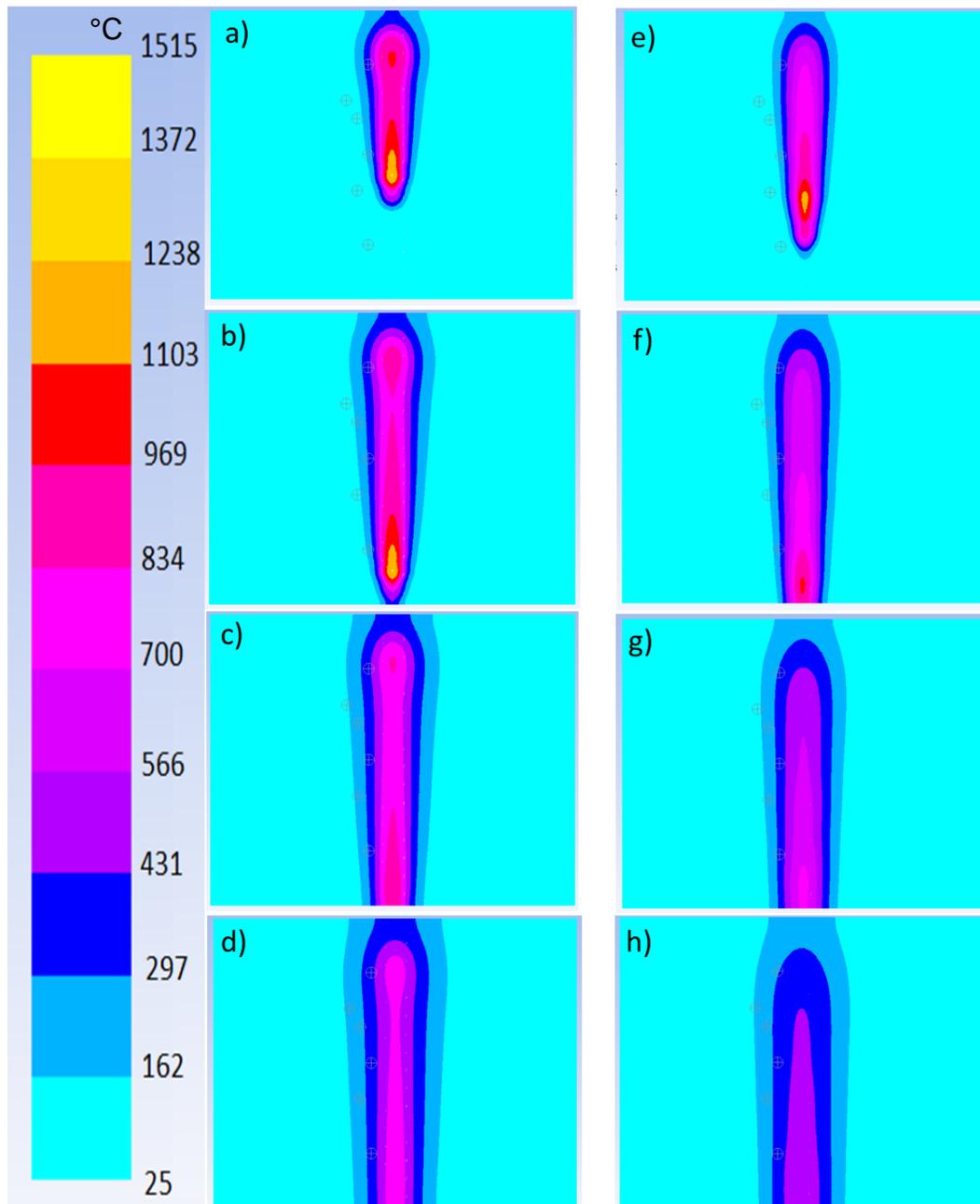


Figura B1. Evolución de la distribución de temperatura en el proceso de soldadura a nivel de termopares. corrida 3 a) 10 s, b) 15 s, c) 20 s, d) 28 s y corrida 1 e) 10 s, f) 15 s, g) 20 s, h) 28 s.

Resumen autobiográfico

Luis Gustavo Velasco Hernández nació el 05 de agosto de 1992 en la ciudad de Villahermosa, Tabasco. Egresó como ingeniero en mecatrónica de la Universidad Autónoma de Guadalajara Campus Tabasco en enero del 2014, donde realizó prácticas profesionales en empresas como PEMEX en el área de mantenimiento a equipo dinámico de la estación de compresión Samaria II y también en el IMP como apoyo técnico en el área electrónica y diseño estructural. Durante dos años trabajó en el giro petrolero en la supervisión de mantenimiento a equipo estático en las instalaciones del sector Muspac-Macuspana en PEMEX, para después ingresar a la maestría en tecnología de la soldadura industrial en la corporación mexicana de investigación en materiales SA de CV durante dos años en el periodo de septiembre 2016-octubre 2018 y bajo el proyecto “Análisis de la formación de porosidad en soldadura longitudinal aplicada por el proceso SAWL en extremos de tubería API 5L X70 PSL 2” con el cual se obtuvo su grado de maestría en tecnología.

Durante dicha maestría tuvo la oportunidad de generar experiencia en la industria manufacturera, apoyando a empresas como Miner Enterprises para la implementación de procedimientos de soldadura y calificación de la habilidad de los soldadores, y COMIMSA al dar cursos sobre SAW y apoyo técnico en cursos como interpretación de imágenes radiográficas, inspección visual y preparación para presentar examen de CWI.

Luis Gustavo domina idiomas como el inglés y el español además de ser un activo deportista realizando actividades como béisbol, futbol, entre otros.