



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE INFLUENCIA DEL PROCESO DE PEGADO EN CALIENTE (HOT TAPPING) EN TUBERÍA DE ACERO A-106 GRADO B BASADO EN LAS NORMAS API 1104 Y ASME IX

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

GARZÓN MEJÍA KLÉVER ABDÓN
klever.garzon@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME MSC.
carlos.diaz@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. GRANJA RAMÍREZ MARIO GERMÁN MSC.
mario.granja@epn.edu.ec

Quito, enero de 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **KLÉVER ABDÓN GARZÓN MEJÍA**, bajo mi supervisión.

**Ing. Carlos Wime Díaz Campoverde Msc.
DIRECTOR**

**Ing. Mario Germán Granja Ramírez Msc.
CODIRECTOR**

DECLARACIÓN

Yo, **Kléver Abdón Garzón Mejía**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Kléver Abdón Garzón Mejía

DEDICATORIA

Dedicado a mi Dios padre todo poderoso, por enviarme un amanecer cada nuevo día y cuidarme a cada paso, dedicado a mi madre María Beatriz Mejía por apoyarme en este difícil camino y cuyo amor infinito que siento por ella me motiva a dar mi máximo esfuerzo.

“El universo sabio y generoso, siempre premia al mayor esfuerzo (Iván Vallejo R.)”

Dedicado a mis tres lindas sobrinas Anahí, Camila y Monserrath Garzón Carvajal a quienes quiero mucho y espero ser ejemplo de lucha y perseverancia para sus vidas, comprometiéndome en motivarlas a que se preparen para alcanzar sus sueños y metas.

“AMAT VICTORIA CURAM”

Dedicado también a María José Paredes por regalarme una sonrisa desde el instante en el que la conocí, hasta el último día de su vida y haberse convertido en mi angelito de la guarda que me ha ayudado a superar mis obstáculos y sé que desde el cielo podrás ver el inmenso cariño que te tengo.

“Hay una fuerza motriz más poderosa que la del vapor, la electricidad y la energía atómica: La Voluntad (Albert Einstein)”

AGRADECIMIENTO

“Aunque el hijo se alejara del hogar una madre siempre espera su regreso”.

Agradezco a mi madre María Beatriz Mejía por haberme apoyado de manera incondicional, a mi padre Daniel Garzón Paredes por darme su bendición y desearme lo mejor, sin duda alguna a mi hermano Daniel Garzón Mejía también, por motivarme en este camino arduo y difícil.

“El fracaso es una gran oportunidad para empezar otra vez con más inteligencia. (Henry Ford)”. Un sincero agradecimiento a un maestro quien creyó

en mí desde el inicio y me enseñó que el fracaso es parte del éxito Lcdo. Efraín Hidalgo B. Cursar por mi querido Colegio San Alfonso, fue una bendición que luego se convirtió en un peldaño para vencer los retos de la gloriosa EPN.

“El gran secreto de mi éxito fue el haberme rodeado de personas mejores que yo (Andrew Carnegie)”...No tengo palabras para expresar un homenaje de

gratitud a dos grandes profesores y amigos quienes me han ayudado en mi proyecto de titulación, Ing. Carlos Díaz Campoverde como mi director y al Ing. Mario Granja Ramírez como mi codirector, sin dejar de lado a profesores también extraordinarios con un carácter altruista, a quienes también los considero como mis amigos tales como al Ing. Jorge Escobar, Ing. Carlos Baldeón V., Ing. Gabriel Velastegui, Ing. Lenin Ubidia , Ing. Marcelo Fernando Salvador y la distinguida Ing. Verónica Sotomayor, profesores con una ética intachable a quienes admiro y respeto mucho.

Al igual que respeto y agradezco también al Ing. Ramiro Garzón Villarroel gerente general de Novacero S.A. quien otro referente de perseverancia, éxito y superación dentro de mi familia, gracias por haberme extendido su mano en varias ocasiones desde el inicio de mi carrera.

“El hombre feliz es aquel que siendo rey o campesino encuentra paz en su hogar (Johann W. Goethe)”. Quito se convirtió en mi hogar y en un lugar donde mis vivencias me dieron momentos de inmensa felicidad y a veces tristezas profundas, estas vivencias las llevaré en mi corazón, tuve la dicha inmensa de vivir y conocer personas maravillosas tales como el Sr. Jorge Mena y la Señora Blanca Mena, con quienes tengo una deuda impagable por ese cariño y voluntad recibida al vivir en su respetable casa.

“Nadie sabe quién será en esta vida, pero es importante recordar que naciste para hacer algo especial (J. D. Rockefeller)”. Agradezco al Ing. Lenin Urrutia

Duque. accionista de EJINPRO Cia. Ltda y gerente general de AUMAPROC S.A.,
a quien lo considero como amigo, primo y padrino quien ha estado muy
comprometido en ayudarme en mi proyecto de titulación.

Cada persona que ha llegado a mi vida me ha ayudado a forjar este sueño, tales como mis amigos, muchos de ellos “guayperos” , “petroleros” algunos del “poker” y otros tales como los “cholos” en especial a mis grandes amigos “Los Alvergas” , a estos últimos los aprecio y respeto mucho, y en general tengo un sentimiento de gratitud especial a todos a quienes tuve el gusto de conocer de la facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, pero sin embargo, me siento muy orgulloso de ser guaypero, amo a mi carrera y pienso que esta es la mejor decisión que pude haber tomado en mi vida y estoy muy agradecido con la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional por haberme dado más de lo que esperaba.

“Nadie se cruza por azar en nuestras vidas, todos llegan por una razón, por una estación o por una vida entera (Paulo Coelho)”. También debo agradecer a Mariela Díaz Varela, quien me acompañó y me apoyó durante una etapa muy difícil de mi carrera, yo y mi teoría de máquinas ella y su teoría electromagnética sin duda alguna, fue otra persona más que aportó positivamente a este logro y de quien aprendí que **“la constancia vence, lo que la dicha no alcanza”**.

Toda búsqueda se inicia con la suerte del principiante y termina con la prueba del conquistador, porque cuando uno desea algo de corazón, todo el universo conspira para que ese deseo se haga realidad. **(Tomado del libro “El Alquimista”)**

Klever A. Garzón M.
04/Septiembre/2018

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1. Proceso de pegado en caliente (Hot Tapping o Hot Tap).....	2
1.1.1. Características generales del proceso de pegado en caliente (Hot Tapping)	4
1.1.2. Ventajas.....	5
1.1.3. Desventajas.....	5
1.2. Proceso de decisión.....	5
1.2.1. Costo para realizar la interrupción e interconexión.....	6
1.2.2. Beneficios económicos obtenidos al aplicar el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping).....	6
1.2.3. Condiciones físicas de la línea de transporte.....	6
1.2.4. Estado de la tubería.....	6
1.3. Equipos y aditamentos.....	7
1.3.1. La máquina de perforación en caliente (Hot Tapping).....	7
1.3.2. Aditamentos soldables (Weldolets).....	7
1.3.3. Aditamento soldable (Sockolet).....	8

1.3.4.	Aditamento Soldable (Threadolet)	10
1.4.	Tubería de acero A-106 grado B	11
1.4.1.	Composición química	12
1.4.2.	Propiedades mecánicas	12
1.5.	Proceso de soldadura.....	13
1.5.1.	Soldabilidad de la tubería de acero A106 grado B.....	13
1.5.2.	Temperatura de precalentamiento y entre pasadas.....	14
1.5.3.	Defectos en la soldadura.....	14
1.6.	Ensayos no destructivos contemplados en la norma API 1104.....	16
1.6.1.	Ensayo de líquidos penetrantes.....	16
1.6.2.	Ensayo de partículas magnéticas	17
1.6.3.	Ensayo radiográfico.....	18
1.6.4.	Ensayo de ultrasonido	19
2.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	21
2.1.	Proceso de soldadura.....	21
2.1.1.	Diseño de la junta soldada	21
2.1.2.	Material base.....	22
2.1.3.	Selección del aditamento (weldolet)	22
2.1.4.	Selección del material de aporte.....	23
2.1.5.	Equipos empleados en el proceso de soldadura	24
2.1.6.	Procedimiento para la ejecución de la soldadura.....	26
2.2.	Ensayo de líquidos penetrantes.....	27
2.2.1.	Probetas para el ensayo de líquidos penetrantes	27
2.2.2.	Implementos para el ensayo de líquidos penetrantes	28
2.2.3.	Procedimiento para el ensayo de líquidos penetrantes.....	29
2.3.	Ensayo de partículas magnéticas	30
2.3.1.	Probetas para el ensayo de partículas magnéticas.....	30
2.3.2.	Implementos para el ensayo de partículas magnéticas	31
2.3.3.	Procedimiento para el ensayo de partículas magnéticas	32

2.4.	Ensayo radiográfico.....	32
2.4.1.	Probetas para el ensayo radiográfico	32
2.4.2.	Equipos empleados para el ensayo radiográfico	33
2.4.3.	Procedimiento para el ensayo radiográfico.....	34
2.5.	Ensayos metalográficos	34
2.5.1.	Probetas para el ensayo metalográfico.....	34
2.5.2.	Equipos para el ensayo metalográfico	35
2.5.3.	Procedimientos para en ensayo metalográfico	37
2.6.	Ensayo de dureza	38
2.6.1.	Probetas para el ensayo de dureza	38
2.6.2.	Equipos para el ensayo de dureza	39
2.6.3.	Procedimiento para el ensayo de dureza.....	40
2.7.	Análisis de composición química.....	40
2.7.1.	Probetas para el análisis de composición química	40
2.7.2.	Equipos para el ensayo de composición química	41
2.7.3.	Procedimiento para el ensayo de composición química	41
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
3.1.	Resultado del proceso de soldadura	42
3.1.1.	Comportamiento térmico del material base sometido al precalentamiento continuo.....	42
3.1.2.	Ensayo de líquidos penetrantes.....	44
3.1.3.	Partículas magnéticas	45
3.1.4.	Ensayo radiográfico.....	48
3.1.5.	Ensayo metalográfico	50
3.1.6.	Ensayo de dureza	59
3.1.7.	Composición química del material base	62
3.2.	Discusión de resultados	63
3.2.1.	Defectos revelados por el líquido penetrante.....	63
3.2.2.	Defectos encontrados por las partículas magnéticas.....	63

3.2.3. Aceptación o rechazo en el ensayo de radiografía industrial	63
3.2.4. Comportamiento Metalúrgico.....	64
3.2.5. Ensayo de dureza	73
3.2.6. Composición química, carbono equivalente y soldabilidad	76
3.2.7. Caracterización de la soldadura	77
3.2.8. Parámetros de Influencia del proceso de pegado en caliente (Hot Tapping) ...	80
3.2.9. Validación del proceso de soldadura con precalentamiento continuo	81
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
4.1. Conclusiones.....	84
4.2. Recomendaciones.....	85
Referencias Bibliográficas	87
Anexos	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Equipos empleados en el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping). ...	3
Figura 1.2. Partes Principales de la máquina de pegado (Hot Tap).	7
Figura 1.3. Dimensiones del elemento soldable (Weldolet).....	7
Figura 1.4. Dimensiones del elemento soldable (Sockolet).....	9
Figura 1.5. Dimensiones del elemento soldable (Theadolet).....	10
Figura 1.6. Diagrama de Graville para evaluar la soldabilidad de los aceros.	13
Figura 1.7. Fisura presente en la zona afectada térmicamente (ZAT) en la soldadura de una tubería de acero A106 Gr B.	15
Figura 1.8. Fisuras presentes en el cordón de soldadura en una tubería de acero A 106 Gr. B.	16
Figura 1.9. Principio de operación de los líquidos penetrantes.	17
Figura 1.10. Ensayo con partículas magnéticas.	17
Figura 1.11. Problemas frecuentes en la soldadura.	19
Figura 1.12. Medición del espesor de una tubería en operación.	20
Figura 2.1. Detalle de la Junta soldada con la secuencia de soldadura recomendada.	21
Figura 2.2. Tubo de acero A 106 Gr B cortado en frío.....	22
Figura 2.3. Aditamento soldable (weldolet) seleccionado.....	23
Figura 2.4. Probetas para el ensayo de líquidos penetrantes a) caso 1 b) caso 2.....	28
Figura 2.5. Probetas para el ensayo de partículas magnéticas a) Caso 1 b) Caso 2. .	31
Figura 2.6. Probeta para el ensayo Radiográfico a) Caso 1 b) Caso 2.....	33
Figura 2.7. Probetas para el ensayo metalográfico a) Caso 1 b) Caso 2.....	35
Figura 2.8. Probetas para el ensayo de dureza a) Caso 1 b) Caso 2.	39
Figura 2.9. Probetas para el análisis de composición química a) Tubería de acero A 106 Gr, B b) Aditamento soldable (weldolet) A 105 STD.	41
Figura 3.1. Comportamiento térmico durante todo el proceso de soldadura.	43
Figura 3.2. Discontinuidad presente en la probeta del caso 1 (Probeta realizada con el procedimiento de precalentamiento continuo).....	64
Figura 3.3. Zonas de análisis metalográfico caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).....	65
Figura 3.4. a) Micrografía mostrando la estructura típica de un acero hipoeutectoide laminado en caliente [27] b) Perlita y ferrita proeutectoide encontrada en la zona del aditamento soldable (weldolet) (zona 1).....	66

Figura 3.5. a) Micrografía mostrada de un acero hipoeutectoide recocido [27] b) Desintegración de perlita producida en la zona afectada por el calor en el aditamento soldable (weldolet) (Zona 2).....	67
Figura 3.6. a) Micrografía típica del cordón de soldadura soldado con el electrodo E 6010 en un acero hipoeutectoide,[24] b) Ferrita columnar presente en la zona interna del cordón de soldadura (Zona 3).....	68
Figura 3.7. a) Micrografía típica del cordón de soldadura soldado con el electrodo E 7018 en un acero hipoeutectoide. b) Presencia de perlita intergranular en una matriz de ferrita columnar, presente en la zona periférica del cordón de soldadura. (Zona 4).	69
Figura 3.8. a) Micrografía típica de un acero hipoeutectoide enfriado rápidamente. [27] b) Acero templado se observa ferrita widmanstätten en la zona afectada por el calor de la tubería de acero A 106 grado B (Zona 5).	70
Figura 3.9. a) Metalografía típica de un acero de bajo contenido de carbono < 0.8%C b) Perlita fina laminar en matriz ferrítica presente en la tubería de acero A 106 grado B (Zona 6).....	71
Figura 3.10. Discontinuidad presente en la probeta del caso 2 (probeta con procedimiento estándar).	71
Figura 3.11.Zonas de análisis metalográfico caso 2 (Probeta con procedimiento convencional).....	72
Figura 3.12. a) Metalografía típica de la tubería de acero de bajo contenido de carbono con recocido [27]b) Desintegración de perlita presente en la tubería de acero A 106 grado B (Zona 6).....	73
Figura 3.13. Resultados de las durezas obtenidas en diferentes zonas para la probeta del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).....	75
Figura 3.14. Resultados de las durezas obtenidas en diferentes zonas para la probeta del caso 1 y caso 2.	76
Figura 3.15. Diagrama de Graville para identificar la zona de soldabilidad del conjunto soldado.	77
Figura 3.16. Dimensiones principales del cordón de soldadura (Longitud de pierna, convexidad y altura del cordón)	78
Figura 3.17. Garganta efectiva.....	78
Figura 3.18. Dimensiones principales del cordón de soldadura (Longitud de pierna, convexidad y altura del cordón).	79
Figura 3.19. Garganta efectiva.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Dimensiones comerciales de los elementos soldables (Weldolets).....	8
Tabla 1.2 Dimensiones comerciales de los elementos soldables (Socoklets).....	9
Tabla 1.3 Dimensiones comerciales del elemento soldable (Threadolet).....	10
Tabla 1.4. Clasificación de los aceros según la norma ASTM.....	11
Tabla 1.5. Composición química del acero ASTM A 106 grado B.	12
Tabla 1.6. Propiedades mecánicas del acero ASTM A 106 grados A, B y C.....	12
Tabla 2.1. Horno para electrodos.....	24
Tabla 2.2. Pirómetro digital.	24
Tabla 2.3. Máquina soldadora.....	25
Tabla 2.4. Amoladora.....	25
Tabla 2.5. Especificaciones del limpiador/removedor.....	28
Tabla 2.6. Especificaciones del líquido penetrante.	29
Tabla 2.7. Especificaciones del revelador.	29
Tabla 2.8. Especificaciones del yugo magnético.....	31
Tabla 2.9. Especificaciones de las partículas magnéticas.....	32
Tabla 2.10. Especificaciones del equipo de rayos x.....	33
Tabla 2.11. Máquina desbastadora de disco.....	35
Tabla 2.12. Máquina pulidora y desbastadora FORCIMAT.	36
Tabla 2.13. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico.....	36
Tabla 2.14. Características principales del ensayo de dureza Rockwell B y C.....	38
Tabla 2.15. Especificaciones técnicas del durómetro Rockwell.....	39
Tabla 2.16. Especificaciones técnicas del espectrómetro de chispa.	41
Tabla 3.1. Datos referentes al precalentamiento continuo.	43
Tabla 3.2. Resultados del ensayo de líquidos penetrantes para el procedimiento implementado en AUMAPROC S.A.	44
Tabla 3.3. Resultados del ensayo de líquidos penetrantes del caso 2 (procedimiento convencional).....	45
Tabla 3.4 Resultados del ensayo de partículas magnéticas caso1 (Procedimiento con calentamiento continuo).....	46
Tabla 3.5 Resultados del ensayo de partículas magnéticas caso2 (Procedimiento convencional).....	47
Tabla 3.6. Resultados del ensayo de radiografía industrial para el caso 1 (Procedimiento con precalentamiento continuo).	48
Tabla 3.7. Resultados del ensayo de radiografía industrial para el caso 2 (Procedimiento convencional).....	49

Tabla 3.8. Discontinuidades presentes en la probeta del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).....	50
Tabla 3.9. Tamaño de discontinuidades en la probeta del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).....	51
Tabla 3.10. Zona afectada por el calor caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).	51
Tabla 3.11. Dimensiones de la zona afectada por el calor en la probeta del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).....	52
Tabla 3.12. Resultados metalográficos con ataque químico caso 1 (Probeta realizada con precalentamiento continuo).	52
Tabla 3.13. Discontinuidades presentes en la probeta del caso 2 (Probeta con procedimiento estándar).	55
Tabla 3.14. Tamaño de discontinuidades en la probeta del caso 2 (Probeta con procedimiento convencional).	56
Tabla 3.15. Zona afectada por el calor caso 2 (Probeta con el procedimiento estándar).	56
Tabla 3.16. Dimensiones de la zona afectada por el calor en la probeta del caso 2 (Probeta con procedimiento convencional).	57
Tabla 3.17. Resultados metalográficos con ataque químico caso 2 (Probeta realizada siguiendo el procedimiento convencional).....	57
Tabla 3.18. Resultados del ensayo de dureza en la probeta del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).....	60
Tabla 3.19. Resultados del ensayo de dureza en la probeta del caso 2 (Probeta obtenida con el procedimiento convencional).	61
Tabla 3.20. Composición química de la tubería de Acero A 106 Gr B.	62
Tabla 3.21. Composición química del aditamento soldable (weldolet).	62
Tabla 3.22. Detalle de las zonas de análisis metalográfico caso 1.....	65
Tabla 3.23. Fases y tamaño de grano para la tubería de acero A 106 Gr B.	66
Tabla 3.24. Fases y tamaño de grano de la zona afectada por el calor entre la tubería y el cordón de soldadura.	67
Tabla 3.25. Fases y tamaño de grano para el cordón de soldadura periférico.	68
Tabla 3.26. Fases y tamaño de grano del cordón de soldadura interior.	69
Tabla 3.27. Fases y tamaño de grano de la zona afectada por el calor en el aditamento soldable (weldolet).	70
Tabla 3.28. Fases y tamaño de grano del aditamento soldable (weldolet).	71
Tabla 3.29. Detalle de las zonas de análisis metalográfico de la probeta del caso 2. .	72
Tabla 3.30. Fases y tamaño de grano de la tubería de acero A 106 Gr B.	73

Tabla 3.31. Durezas presentes en la junta soldada.....	74
Tabla 3.32. Hoja de validación para el proceso de soldadura del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).....	82
Tabla 3.33. Ensayos adicionales para el caso 1 (procedimiento con precalentamiento continuo).....	82
Tabla 3.34. Hoja de validación del proceso de soldadura caso 2 (Probeta con procedimiento convencional).	82
Tabla 3.35. Ensayos adicionales para el caso 2 (procedimiento convencional).	83

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I. Carta de auspicio de AUMAPROC S.A.	90
Anexo II. Procedimiento de soldadura WPS.	91
Anexo III. Catalogo Boney Forge de aditamentos soldables (WELDOLETS).	93
Anexo IV. Catálogo de electrodos Lincoln.....	97
Anexo V. Informe del ensayo de líquidos penetrantes.	101
Anexo VI. Informe de resultado del ensayo de partículas magnéticas LEN-EPN.	104
Anexo VII. Informe del ensayo de radiografía industrial.	107
Anexo VIII. Informe del análisis de composición química de la tubería de acero A 106 Gr. B.	111
Anexo IX. Informe del análisis de composición química del aditamento soldable (weldolet) A 105 STD.....	114
Anexo X. Tamaño de grano norma ASTM E 112..	116
Anexo XI. Diagrama Hierro Carbono.....	118

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Gr	Grado de carbono
C	Carbono
Mn	Manganeso
Ceq	Carbono Equivalente
ZAC	Zona Afectada Térmicamente
t	Espesor de la soldadura
STD	Estándar
AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Continua
S_t	Resistencia a la tracción (MPa)
$\bar{\sigma}_y$	Esfuerzo de fluencia (MPa)
$\bar{\sigma}_{ut}$	Esfuerzo ultimo de tracción (MPa)
GLP	Gas Licuado de Petróleo

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se estudiaron los parámetros de influencia en el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping). Para este propósito se han realizado dos procesos de soldadura, simulando una tubería en operación, uno con el procedimiento tradicional expuesto en el código **ASME IX** y otro procedimiento implementado con los técnicos de la empresa AUMAPROC S.A., en los mismos que se han seguido de manera estricta los lineamientos de la norma **API 1104**, donde para corroborar el buen estado de la soldadura se han practicado los respectivos ensayos no destructivos y además se ha estudiado y caracterizado la microestructura del cordón de soldadura y la zona afectada por el calor.

Después de obtener la probeta soldada por un soldador calificado API otorgado por la empresa AUMAPROC S.A. se ha procedido a encontrar defectos superficiales con la ayuda del ensayo de líquidos penetrantes contemplados en la norma ASTM E 165 y el ensayo de partículas magnéticas contemplado en la norma ASTM E 709, para realizar el ensayo de radiografía industrial fue necesario realizar una obturación en frío con la ayuda del taladro con la broca de 2 pulgadas de diámetro para poder colocar la película radiográfica de la manera más óptima.

Finalmente se procedió a caracterizar la microestructura y determinar el tamaño de grano en el cordón de soldadura y zona afectada por el calor, en cuyos resultados se han podido corroborar la validez del procedimiento implementado para la empresa AUMAPROC S.A.

Palabras clave: Pegado en caliente, caracterización, aditamento soldable, precalentamiento continuo, desviación, en operación,

ABSTRACT

In the present work of finished of major, the parameters of influence in the process of stuck in hot (Hot Tapping) were studied. For this purpose two welding processes have been carried out, simulating a pipeline in operation, one with the traditional procedure outlined in the ASME IX standard and another procedure implemented with the technicians of the company AUMAPROC SA, in the same ones that have been followed in a Strictly the guidelines of the API 1104 standard, where to verify the good state of the welding, the respective non-destructive tests have been carried out and also the microstructure of the weld bead and the area affected by the heat has been studied and characterized.

After obtaining the specimen welded by a qualified API welder granted by the company AUMAPROC S.A. we have proceeded to find surface defects with the help of the penetrant liquid test contemplated in the ASTM E 165 standard and the magnetic particle test contemplated in the ASTM E 709 standard, to perform the industrial radiography test it was necessary to make a cold seal with the help of the drill with the drill of 2 inches in diameter to be able to place the radiographic film in the most optimal way. Finally, we proceeded to characterize the microstructure and determine the grain size in the weld bead and heat affected area, with the results of which we have been able to corroborate the validity of the procedure implemented for the company AUMAPROC S.A.

Keywords: Hot Tapping, weldolet, characterization, continuous preheating, bypass, working

ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE INFLUENCIA DEL PROCESO DE PEGADO EN CALIENTE (HOT TAPPING) EN TUBERÍA DE ACERO A-106 GRADO B BASADO EN LAS NORMAS API 1104 Y ASME IX

INTRODUCCIÓN

La importancia de una tubería radica en la eficacia y la seguridad que ésta brinda para transportar cierto fluido hasta un punto determinado, en el campo petrolero las tuberías que se utilizan deben tener altos estándares de calidad, contar con procesos de soldadura idóneos y con un equipo apto y capacitado para su ejecución. Los daños ambientales y las pérdidas económicas resultan irreparables cuando una tubería en mal estado colapsa. En la actualidad en el Ecuador, el transporte de crudo sufre un aproximado de 1.5 derrames de petróleo por semana, en los mismos que se han perdido hasta 11,400 barriles en cada desastre, el 25% de estos derrames se producen por fallas mecánicas en la soldadura de una tubería en operación según datos del Ministerio del Ambiente. [1]

El proceso de pegado en caliente (Hot Tapping) es un método de gran utilidad que permite obtener una ramificación de una tubería en operación para crear una desviación (bypass) y reparar una zona determinada sin parar la producción, este método contempla un proceso de soldadura y otro de corte, el proceso de soldadura se encuentra estipulado en la norma API 1104 y en el código ASME sección IX, si dentro de este proceso no se tiene un estricto control en los parámetros de soldadura y una posterior inspección mediante una serie de ensayos no destructivos que corroboren el buen estado de la misma, puede generar defectos propios de la soldadura que posteriormente conllevarán al colapso de toda la línea de transporte generando grandes pérdidas económicas, materiales y ambientales.

Aumaproc S.A. es una empresa ecuatoriana dedicada a la prestación de servicios en la industria petrolera, quienes realizan el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping) en tuberías de acero al carbono. Durante ciertos proyectos, al realizar el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping) en tuberías de acero A106 Grado B, se notó la presencia de fisuras y grietas en el cordón de soldadura y la zona afectada por el calor, y a pesar de haber contado con los equipos necesarios, seguido los fundamentos de las normas API 1104 o ASME IX con rigurosidad y emplear al personal altamente calificado por el laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, no se lograba realizar de manera satisfactoria este proceso, por lo

cual fue de gran importancia contar con el presente estudio técnico que permita definir, controlar y mitigar las causas que están generando estos inconvenientes en el momento de ejecutar el proceso de soldadura. (Anexo I)

Objetivo general

Estudiar los parámetros de influencia del proceso de pegado en caliente (Hot Tapping) en tubería de acero A106 Grado B basado en la norma API 1104 y ASME IX mediante información técnica y experimental con el propósito de facilitar su ejecución bajo condiciones controladas que permitan obtener resultados óptimos en la soldadura.

Objetivos específicos

- Caracterizar la soldadura efectuada en probetas de acero A 106 grado B para el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping).
- Determinar los parámetros adecuados para la correcta ejecución del proceso de pegado en caliente (Hot Tapping) en una tubería de acero A106 Grado B.
- Establecer las propiedades microestructurales de la soldadura y la zona afectada por el calor.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Proceso de pegado en caliente (Hot Tapping o Hot Tap)

Es una técnica de fijación de un elemento mecánico de ramificación, soldado a una tubería la cual se encuentra en servicio y donde posteriormente se crea una abertura mediante la perforación brindando a su vez una línea de interconexión (Bypass). El proceso de pegado en caliente (Hot Tapping) contempla principalmente un proceso de soldadura estipulado y respaldado mediante la norma API 1104 y en el código ASME IX y con un posterior proceso de corte, el mismo que debe brindar las garantías necesarias para completar su correcta ejecución, con el fin de brindar seguridad y eficiencia durante su funcionamiento. [2]

En la Figura 1.1 se puede ver los equipos básicos para la ejecución del corte para el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping).

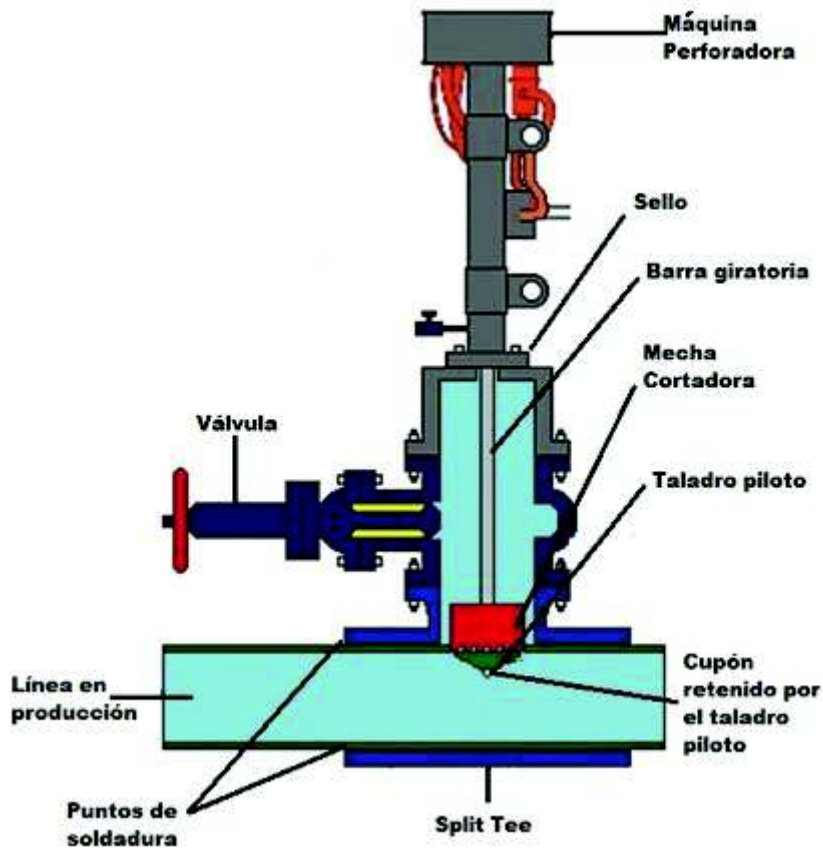


Figura 1.1. Equipos empleados en el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping).
(Fuente: <http://larocamadrehg.blogspot.com/2013/03/hot-tapping-perforacion-en-caliente.html>).

La sección B de la norma API 1104 establece los lineamientos para la ejecución del proceso de soldadura en una línea de transporte en funcionamiento, dicha sección se centra principalmente en evitar dos grandes problemas frecuentes en este proceso, evitar las quemaduras pasantes, donde la soldadura por arco es la responsable de dicho problema. El segundo problema es la generación de fisuras por hidrógeno, esto se debe a la acelerada velocidad de enfriamiento de la soldadura a través de las paredes de la tubería por donde por lo general circula fluido a bajas temperaturas en comparación a la temperatura de la zona afectada por el calor. [2]

Para evitar el quemón (burn-through) es necesario apoyarse con la experiencia en procesos de soldadura afines a éste, también es de gran ayuda realizar un estudio de la transferencia de calor que se obtiene con este procedimiento. Para minimizar el “quemón”, la primera pasada que se realice a una tubería de menos de 6.4 mm ($\frac{1}{4}$ pulgada) de espesor se debe hacer usando un electrodo de 2.4 mm ($\frac{3}{32}$ pulgadas) de diámetro o menor a este. Para limitar la transferencia de calor hacia el metal base y los pases posteriores se debe emplear un electrodo de 3.2 mm ($\frac{1}{8}$ de pulgada) de

diámetro, o menor si el espesor del material no excede los 12.7 mm (½ pulgada) de espesor. [2]

También se debe evitar la entrada de bajos niveles de calor ya que esto puede aumentar el riesgo de la formación de grietas por falta de fusión en materiales de alto contenido de carbono equivalente. Para tuberías que poseen un espesor superior a 12.7 mm (½ pulgada) donde el “quemón” no es una preocupación principal, se puede elegir un electrodo de diámetro mayor. [2]

En muchas situaciones el uso de un electrodo con bajo contenido de hidrógeno puede ser de gran utilidad para prevenir el “quemón” a través del agrietamiento para la soldadura de componentes de alto contenido de carbono equivalente. [2]

El exceso de calor también puede ser evitado con el manejo adecuado de las variables de soldadura, tales como el voltaje y amperaje, en especial el segundo, debido a que el amperaje es el responsable en brindar profundidad al flujo de electrones, los mismos que desprenden grandes cantidades de energía en forma de calor.

Todo tipo de tubería está expuesta a sufrir problemas de quemón (burn-through) en especial tuberías de espesores pequeños, para lo cual una previa revisión de la norma API 1104 es sumamente necesaria y vital a fin de garantizar la calidad en el proceso, además de esto la presión interna de la tubería juega un papel importante debido al incremento y formación de esfuerzos combinados en la misma. [3]

El código ASME IX da los lineamientos para la calificación de procedimientos de soldadura en recipientes a presión y además para la calificación de soldadores, este código es aplicable a procesos manuales y automáticos, donde se puede usar maquinaria especial para dichos casos. Permite calificar a los soldadores, así como el procedimiento de soldadura en recipientes y tuberías de alta presión, este código, al igual que la norma API 1104 requiere la elaboración sistemática de un WPS (Calificación del procedimiento de soldadura), PQR (Registro de calificación del proceso), WPQ (Calificación de las habilidades del soldador). [3]

1.1.1. Características generales del proceso de pegado en caliente (Hot Tapping)

El proceso de pegado en caliente (Hot Tapping) es el único método que permite obtener una ramificación de una tubería durante su operación, es un método irremplazable que puede ser aplicado mediante los procesos de soldadura estipulados y establecidos en las diferentes normativas referentes a procesos de soldadura, e independiente del tipo de fluido circundante a través de dicha línea de transporte, en caso de ser un fluido

inflamable que circula por dicha tubería, las herramientas de corte deben ser de bronce especiales que no produzca algún destello de fuego que pueda desatar una combustión no deseada, generando daños y pérdidas a lo largo de todo el sistema de bombeo.[3]

1.1.2. Ventajas

Este proceso es un método eficiente, rápido, amigable con el medio ambiente y seguro para obtener una desviación (Bypass) lo cual genera beneficios económicos, evita pérdidas en la producción y daños al medio ambiente. Permite obtener las siguientes ventajas [3]

- Método muy económico, debido a que evita gastos y costos ocasionados por la paralización en el servicio de bombeo.
- Seguro y eficiente, permite reparar de manera satisfactoria tuberías en mal estado con ayuda de desviaciones (Bypass).
- Es aplicable a todo tipo de tubería y se puede emplear el proceso de soldadura más adecuado estipulado en las normativas AWS.
- Es un método rápido donde se puede ejecutar correctamente más de una intervención por día con ayuda del personal indicado.

1.1.3. Desventajas

A pesar de ser un método único e irremplazable tiene algunas desventajas, que al momento de aplicar dicho proceso son tomadas en cuenta para optar por la decisión correcta, tales desventajas son las siguientes: [3]

- Se requiere un personal altamente calificado con una buena pericia y experiencia en este tipo de procesos.
- El equipo y maquinaria empleado en este proceso es costoso por lo que se requiere una producción en serie para que resulte rentable su adquisición.
- Requiere de una serie de ensayos no destructivos que corrobore el buen estado de las instalaciones.

1.2. Proceso de decisión

Los operadores y técnicos especializados en el tema pueden evaluar los beneficios económicos de realizar una intervención en cierta línea de transmisión (tubería) tomando en cuenta la interrupción del servicio y sin la interrupción del mismo, para esto se debe basar la viabilidad analizando los aspectos que se detallan a continuación:

1.2.1. Costo para realizar la interrupción e interconexión

El costo de un proyecto real incluye los costos directos tales como los materiales y el equipo, los requisitos de soldadura, el control de calidad, los costos de purgado, la mano de obra y los gastos de programación. Algunos gastos indirectos adicionales o costos “ocultos” pueden incluir el costo de las válvulas de cerrado, la publicidad de qué el servicio se interrumpirá, reencendido del servicio de los consumidores, las excavaciones, los tapones y las conexiones de purga. Los operadores deben consultar los datos históricos para determinar estos costos. [3]

1.2.2. Beneficios económicos obtenidos al aplicar el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping)

Si se compara los rubros obtenidos mediante el proceso de pegado en caliente con algún proceso de interrupción e interconexión, por lo general el beneficio económico se va a inclinar a favor del primero, en este punto es donde se ratifica la decisión de ejecutar el proceso de pegado en caliente (hot tapping) tomando en cuenta las normas, pasos y procedimientos propios de este proceso. [3]

1.2.3. Condiciones físicas de la línea de transporte

Según la norma API 1104 Apéndice B un parámetro considerable es la velocidad de enfriamiento, lo cual constituye una variable esencial para lo cual se debe tomar en cuenta el flujo interno, el tipo de fluido y la temperatura del mismo. El espesor de la tubería también constituye una variable esencial y se debe tomar en cuenta el rango de aplicación del calor en el momento de aplicar el precalentamiento y ejecutar el proceso de soldadura para lo cual se debe contar con un procedimiento de control de calor aportado. [4]

1.2.4. Estado de la tubería

Es común para las empresas, ejecutar el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping) en tuberías cuya vida útil ya ha transcurrido un determinado tiempo, para lo cual previamente es necesario realizar una inspección en el estado de la misma, la zona en donde se va a realizar el procedimiento debe tener un espesor igual o superior al 70% del espesor original, la superficie debe estar libre de óxidos y corrosión, y las condiciones físicas de la tubería deben ser aceptables, es decir, no debe existir presencia de grietas y fisuras. [4]

1.3. Equipos y aditamentos

1.3.1. La máquina de perforación en caliente (Hot Tapping)

Para realizar el presente proceso se debe utilizar la denominada “Máquina para Hot Tap” que viene a ser el equipo principal, la misma que consta de una barra giratoria que puede moverse en dirección axial, cuyo giro es accionado por un motor eléctrico, en el extremo se encuentra una cuchilla giratoria denominada “mecha cortadora” en su centro se nota un elemento denominado “cupón” cuya función principal es mantener unido el pedazo de tubo cortado a la máquina de pegado (Figura 1.2).[4]

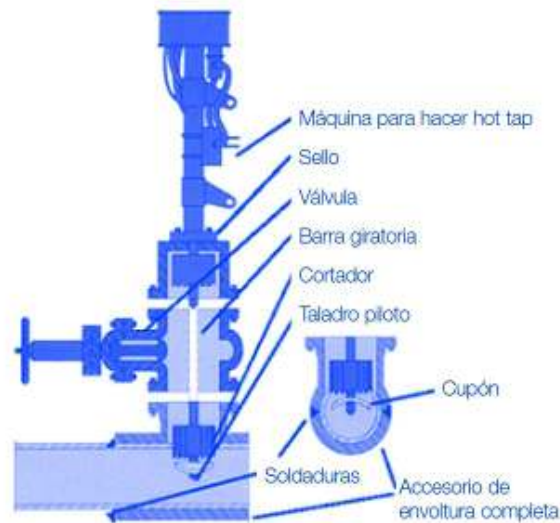


Figura 1.2. Partes Principales de la máquina de pegado (Hot Tap).
(Fuente: <http://larocamadrehg.blogspot.com/2013/03/hot-tapping-perforacion-en-caliente.html>).

1.3.2. Aditamentos soldables (Weldolets)

El aditamento (weldolet) es una pieza de interconexión que permite obtener fácilmente una derivación de una tubería y fácil de acoplarse a la sección externa de la tubería gracias a la curvatura de su base soldable como se puede ver en la Figura 1.3. [4]

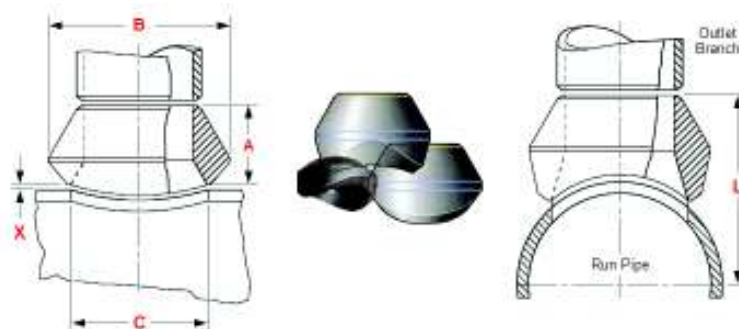


Figura 1.3. Dimensiones del elemento soldable (Weldolet).
(Fuente: http://www.wermac.org/fittings/dimensions_weldolet_reducing_std-wt.html).

La dimensión de este elemento depende del requerimiento para el cual se diseñe la tubería de ramificación, obviamente se debe tomar en cuenta las dimensiones de la tubería principal de donde se va a obtener dicha derivación, para lo cual los fabricantes ofrecen este aditamento con las medidas normalizadas indicadas. Tabla 1.1

Tabla 1.1. Dimensiones comerciales de los elementos soldables (Weldolets).

Diámetro del tubo (Pulgadas)	3000 lb				6000 lb			
	A	B	C	Peso Aprox.(Kg)	A	B	C	Peso Aprox.(Kg)
1/2	19,05	35,00	23,80	0,08	19,05	35,00	23,80	0,09
3/4	22,20	44,50	30,10	0,11	22,20	44,50	30,10	0,14
1	27	54,00	36,50	0,23	27	54,00	36,50	0,21
1 1/4	31,80	65,00	44,50	0,36	31,80	65,00	44,50	0,41
1 1/2	33,30	73,00	50,80	0,45	33,30	73,00	50,80	0,50
2	38,10	89,00	65,00	0,79	38,10	89,00	65,00	0,79
2 1/2	41,30	103,00	76,20	1,13	41,30	103,00	76,20	1,18
3	44,50	122,00	93,60	1,81	44,50	122,00	93,60	1,86
3 1/2	47,60	143,00	112,70	2,50	47,60	143,00	112,70	2,54
4	50,80	152,00	120,60	2,86	50,80	152,00	120,60	2,90
6	66,70	225,00	169,80	5,45	66,70	225,00	169,80	10,43
8	69,80	284,00	220,60	10,45	69,80	284,00	220,60	16,78

(Fuente: Boney Forge).

El aditamento soldable (weldolet) no es el único elemento de ramificación que existe actualmente en el mercado, dependiendo de los diversos requerimientos de un determinado proyecto también se puede emplear otros elementos de derivación tales como los siguientes:

1.3.3. Aditamento soldable (Socoklet)

Son similares a los aditamentos (weldolets), con la diferencia de que la tubería ramificada se asienta, y se puede soldar, en el zócalo que está disponible en la parte

interior de la salida (outlet) como se denota en la Figura 1.4. El orificio de un manguito coincide con el orificio de la tubería ramificada. El aditamento (Sockolet) se considera una conexión de enchufe y está disponible en las clases 3000 #, 6000 # y 9000 # y se ilustran en la Tabla 1.2. [4]



Figura 1.4. Dimensiones del elemento soldable (Sockolet).
(Fuente: <http://metcare.com.tr/sockolet>).

Tabla 1.2 Dimensiones comerciales de los elementos soldables (Sockolets).

Diámetro del tubo (Pulgadas)	3000 lb					6000 lb					
	A	B	C	F	Peso Aprox.(Kg)	A	B	C	D	F	Peso Aprox.(Kg)
1/2	25,5	35,0	23,3	32,0	0,11	31,80	44,50	30,01	11,80	37,30	0,20
3/4	27,0	44,5	30,0	36,5	0,16	36,50	54,00	36,50	15,60	46,00	0,34
1	33,3	54,0	36,5	46,0	0,28	39,60	65,00	44,30	20,70	57,20	0,56
1 1/4	33,3	65,0	44,5	56,0	0,41	41,20	73,00	50,80	29,70	65,00	0,71
1 1/2	35,0	73,0	50,8	62,0	0,55	42,80	89,00	65,00	36,00	79,20	0,89
2	38,1	89,0	65,0	75,0	0,79	52,00	103,00	76,20	43,00	92,00	2,30
2 1/2	46,0	100,0	76,2	82,3	1,36						
3	50,8	122,0	93,6	104,7	1,97						
3 1/2	53,9	143,0	112,7	122,2	2,61						
4	57,2	192,0	120,6	110,0	1,22						

(Fuente: Boney Forge).

1.3.4. Aditamento Soldable (Threadolet)

Son similares a los weldolets, pero el tubo ramificado se atornilla dentro de la salida outlet (que generalmente es roscado NPT) y por lo tanto no es necesaria la actividad de soldadura. El orificio de un manguito coincide con el orificio de la tubería ramificada como se indica la Figura 1.5. Los thredolets se clasifican como accesorios roscados y están disponibles en las clases 3000 # y 6000 # y se ilustran en la Tabla 1.3.[4]

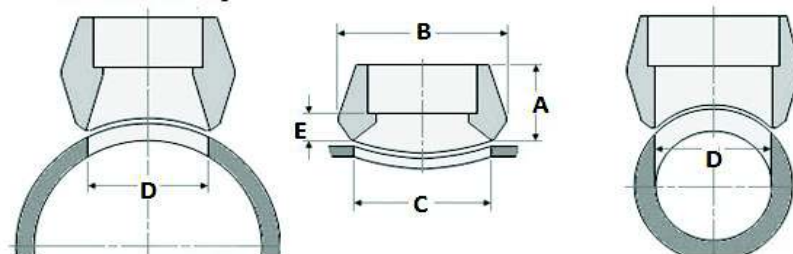


Figura 1.5. Dimensiones del elemento soldable (Theadolet).

(Fuente: <http://www.neelconsteel.com/flexolet.html>).

Tabla 1.3 Dimensiones comerciales del elemento soldable (Threadolet).

Diámetro del tubo (Pulgadas)	3000 lb					6000 lb					
	A	B	C	F	Peso Aprox.(Kg)	A	B	C	D	F	Peso Aprox.(Kg)
1/2	25,5	35,0	23,3	32,0	0,11	31,80	44,50	30,01	11,80	37,30	0,20
3/4	27,0	44,5	30,0	36,5	0,16	36,50	54,00	36,50	15,60	46,00	0,34
1	33,3	54,0	36,5	46,0	0,28	39,60	65,00	44,30	20,70	57,20	0,56
1 1/4	33,3	65,0	44,5	56,0	0,41	41,20	73,00	50,80	29,70	65,00	0,71
1 1/2	35,0	73,0	50,8	62,0	0,55	42,80	89,00	65,00	36,00	79,20	0,89
2	38,1	89,0	65,0	75,0	0,79	52,00	103,00	76,20	43,00	92,00	2,30
2 1/2	46,0	100,0	76,2	82,3	1,36						
3	50,8	122,0	93,6	104,7	1,97						
3 1/2	53,9	143,0	112,7	122,2	2,61						
4	57,2	192,0	120,6	110,0	1,22						



(Fuente: Boney Forge).

1.4. Tubería de acero A-106 grado B

La especificación ASTM A106 (Specification for seamless carbon steel for high-temperature service), es utilizada para la fabricación de tubería de acero al carbono para el transporte de gas, petróleo y sus derivados, gas carbónico entre otros. Para el presente estudio se va a emplear una tubería como parte del metal base, por lo cual es necesario conocer sus propiedades especificadas en la Tabla 1.4 correspondiente a la clasificación de los aceros entre los cuales se tiene al acero A 106 grado B. [18]

Tabla 1.4. Clasificación de los aceros según la norma ASTM.

Clasificación de los aceros según la ASTM	Límite elástico		Tensión de rotura	
	Ksi	MPa	Ksi	MPa
ASTM A36	36	250	58-80	400-550
ASTM A 53 Grado B	35	240	>60	>415
ASTM A 106 Grado B	35	240	>60	>415
ASTM A 131 Grado A,B, CS, D, DS	34	235	58-71	400-490
ASTM A 139 Grado B	35	240	>60	>415
ASTM A 139 Grado Y 35	35	240	>60	>415
ASTM A 500 Grado A	33	228	>45	>310
ASTM A 500 Grado B	42	290	>58	>400
ASTM A501	36	250	>58	>400
ASTM A 516 Grado 55	30	205	55-75	380-515
ASTM A 516 Grado 60	32	220	60-80	415-550
ASTM A524 Grado I	35	240	60-85	415-586
ASTM A524 Grado II	30	205	55-80	380-550
ASTM A 529	42	290	60-80	415-550
AST A570 Grado 30	30	205	>49	>340
AST A570 Grado 33	33	230	>52	>360
AST A570 Grado 36	36	250	>53	>365
AST A570 Grado 40	40	275	>55	>380
AST A570 Grado 45	45	310	>60	>415
AST A570 Grado 50	50	345	>65	>450
ASTM A709 Grado 36	36	250	58-80	400-550
API 5L Grado B	35	240	60	415
API 5L Grado X42	42	290	60	415

(Fuente: ASTM, 2008).

1.4.1. Composición química

La tubería fabricada con acero A106 Gr B debe cumplir con la composición química estipulada por la ASTM, especificada en la Tabla 1.5. [18]

Tabla 1.5. Composición química del acero ASTM A 106 grado B.

Elemento Alenate	Grado A	Grado B	Grado C
Carbono máx.	0,25	0,3	0,35
Manganeso	0,27-0,93	0,29-1,06	0,29-1,06
Fosforo máx.	0,035	0,035	0,035
Azufre máx.	0,035	0,035	0,035
Silicio min.	0,1	0,1	0,1
Cromo máx.	0,4	0,4	0,4
Cobre máx.	0,4	0,4	0,4
Molibdeno máx.	0,15	0,15	0,15
Níquel máx.	0,4	0,4	0,4
Vanadio máx.	0,08	0,08	0,08

(Fuente: ASTM,2008).

1.4.2. Propiedades mecánicas

El acero A 106 grado B debe cumplir con las propiedades mecánicas normalizadas por la ASTM que se encuentran especificadas en la Tabla 1.6.[18]

Tabla 1.6. Propiedades mecánicas del acero ASTM A 106 grados A, B y C.

Propiedad mecánica	Grado A	Grado B	Grado C
Resistencia la tracción min:	48000 psi [330 MPa]	60000 psi [415 MPa]	70000 psi [485 MPa]
Límite de fluencia min.	30000 psi [205 MPa]	35000 psi [240MPa]	40000 psi [275 MPa]

(Fuente: ASTM 2008).

1.5. Proceso de soldadura

1.5.1. Soldabilidad de la tubería de acero A106 grado B

El carbono equivalente es un parámetro que permite determinar la soldabilidad y también ayuda a conocer la susceptibilidad de un material de sufrir agrietamiento por soldadura, por lo cual en base a este parámetro es necesario determinar la temperatura de precalentamiento y entre pases de la junta soldada. [19]

La soldabilidad es la capacidad que tienen los materiales, de igual o diferente naturaleza, para ser unidos permanentemente mediante un determinado proceso de soldadura, sin presentar transformaciones estructurales perjudiciales, tensiones o deformaciones que puedan ocasionar alabeos. [20]

El diagrama de Graville es un método confiable que permite determinar la zona de soldabilidad de un acero en base al porcentaje de carbono del metal base y al respectivo carbono equivalente, dicho diagrama presenta tres zonas en las cuales se puede identificar el tipo de acero que se va a someter al proceso de soldadura como se puede ver en la Figura 1.6.

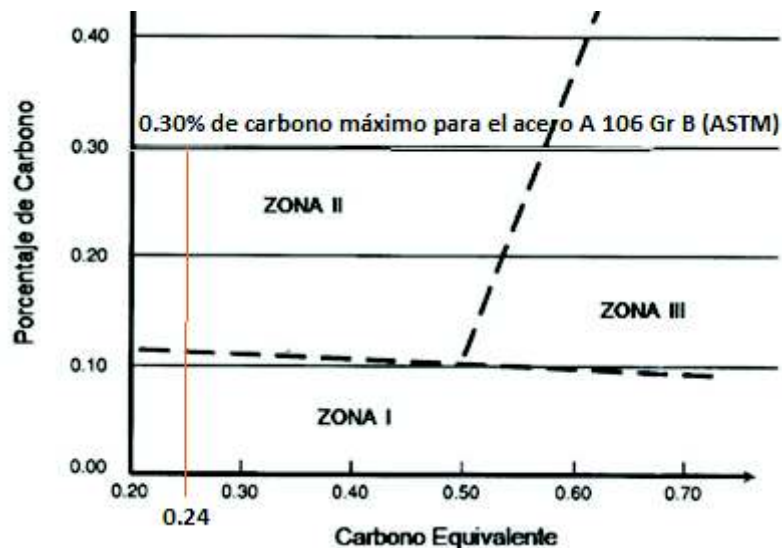


Figura 1.6. Diagrama de Graville para evaluar la soldabilidad de los aceros.
(Fuente: <https://metfusion.wordpress.com/2013/08/10/soldabilidad-de-los-aceros/>).

Para la presente tubería se tiene un carbono equivalente de 0,24% lo cual indica que la tubería de acero A 106 Gr B recae en la zona II del diagrama de Graville, en dicha zona se encuentran aceros con mayor porcentaje de carbono de bajo endurecimiento y el riesgo a fisuras en la ZAC puede ser evitado mediante el control de la velocidad de enfriamiento, por medio del aporte térmico o con pre calentamiento. [2]

1.5.2. Temperatura de precalentamiento y entre pasadas

El control de temperatura de precalentamiento y entre pases es de vital importancia para obtener propiedades mecánicas óptimas, resistencia al agrietamiento y control de su dureza, esto es de gran importancia en procesos con múltiples pasadas que involucren espesores más gruesos, además, las condiciones de trabajo, la aplicación de ciertos códigos, la restricción, el nivel de aleación y entre otras consideraciones, pueden requerir el control de temperatura de precalentamiento y entre pasadas.[20]

La temperatura entre pasadas o pases se refiere a la temperatura que alcanza el material inmediatamente antes del segundo y subsiguiente pase, de los múltiples pases que contempla todo el proceso de soldadura, en la práctica, la temperatura entre pases es la mínima temperatura de precalentamiento especificada, la temperatura entre pases puede ser más importante que la misma temperatura de precalentamiento, con respecto a las propiedades microestructurales de las soldaduras. La AWS recomienda que para mantener la resistencia última a la tracción σ_{ut} , la temperatura de precalentamiento no debe exceder de los 290°C, por lo cual se debe elevar la temperatura entre pases para evitar el agrietamiento, por lo cual es necesario controlar los siguientes parámetros. [20]

- Tiempo entre pases
- Espesor del metal base
- Temperatura de precalentamiento
- Condiciones ambientales
- Las características de la transferencia de calor
- La entrada de calor de la soldadura

1.5.3. Defectos en la soldadura

Las imperfecciones pueden existir tanto en el metal de soldadura como en el metal base; son generalmente descritas como discontinuidades. Las discontinuidades existen en un número de formas diferentes, incluyendo fisuras, falta de fusión, falta de penetración, inclusiones, porosidad, socavación y otras como las grietas, conociendo como pueden formarse estas discontinuidades, el inspector de soldadura puede tener éxito en detectar estas causas y prevenir problemas. [20]

Para el presente estudio se tomará en cuenta a las fisuras como principal imperfección, las mismas que se procederá a realizar a continuación.

Fisuras ("Cracks")

Ocurren en el metal base y en el cordón de soldadura, cuando las tensiones localizadas exceden la resistencia última del material. La mayor parte de las normas utilizadas en la industria consideran que las fisuras son, independientemente de su longitud, defectos y por lo tanto una vez detectadas deben removerse o eliminarse. Las fisuras pueden clasificarse en: [19]

- a) Fisuras en caliente: se desarrollan durante la solidificación (Choque Térmico) y su propagación es intergranular (entre granos). [20]
- b) Fisuras en frío: se desarrollan luego de la solidificación, son asociadas comúnmente con fragilización por hidrógeno. Se propagan entre y a través de los granos (inter y trans granular). [20]

Las fisuras bajo el cordón y fisuras en la ZAT, son generalmente fisuras en frío que se forman en la ZAT del metal base, son cortas, pero pueden unirse para formar una fisura continua. Las que se dan bajo el cordón, pueden convertirse en un serio problema cuando están presentes: hidrógeno, microestructura poco dúctil y altos esfuerzos residuales. Ambos tipos de fisuras se pueden formar en caliente o en frío. Son encontrados a intervalos regulares bajo la soldadura y también por el contorno de la ZAT donde los esfuerzos residuales son máximos. [20]

En las Figuras 1.7 y 1.8 se puede observar la presencia de fisuras existentes en el cordón de soldadura ocurridas durante el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping) como indican las respectivas flechas.

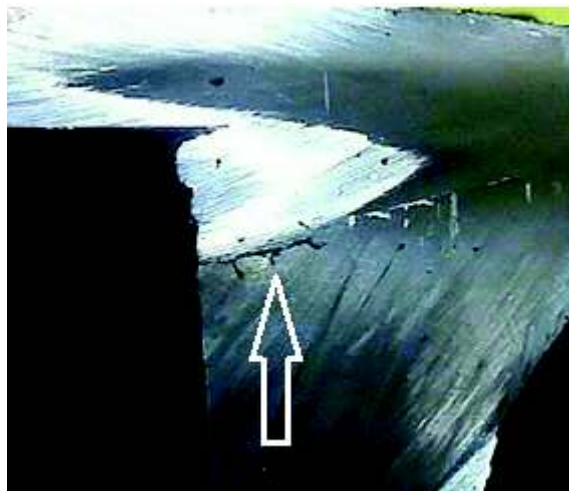


Figura 1.7. Fisura presente en la zona afectada térmicamente (ZAT) en la soldadura de una tubería de acero A106 Gr B.
(Fuente: AUMAPROC S.A.).



Figura 1.8. Fisuras presentes en el cordón de soldadura en una tubería de acero A 106 Gr. B.
(Fuente: AUMAPROC S.A.).

1.6. Ensayos no destructivos contemplados en la norma API 1104

El criterio de aceptación de los ensayos no destructivos para este tipo de procedimientos es de vital importancia para validar resultados y emitir la aprobación de los resultados obtenidos dentro de dicho proceso, la norma API 1104 es explícita y exigente, se debe practicar ensayos radiográficos, de líquidos penetrantes, partículas magnéticas y también ultrasonido. [5]

1.6.1. Ensayo de líquidos penetrantes

Para este ensayo es necesario emitir un informe por escrito según exija la empresa, el mismo que debe estar regido con la norma ASTM E 165. [5]

La Figura 1.9 ilustra el principio de operación de los líquidos penetrantes, y los respectivos fenómenos que ocurren en cada etapa del ensayo. El principio de capilaridad, mojabilidad y viscosidad son factores primordiales para obtener éxito en el presente ensayo, una baja viscosidad permitirá que el líquido penetre hasta los lugares más recónditos de la pieza, una buena capilaridad permitirá obtener resultados óptimos en el revelado y la probeta con buena mojabilidad va a lograr que el líquido la recubra fácilmente. [5]

Para casos de soldadura de tuberías en operación la norma ASTM E 165 recomienda realizar la inspección del cordón de soldadura por partes, con la finalidad de obtener resultados acertados que posteriormente sean verificados con los criterios de aceptación para el ensayo de líquidos penetrantes de la sección 9 de la norma API 1104.

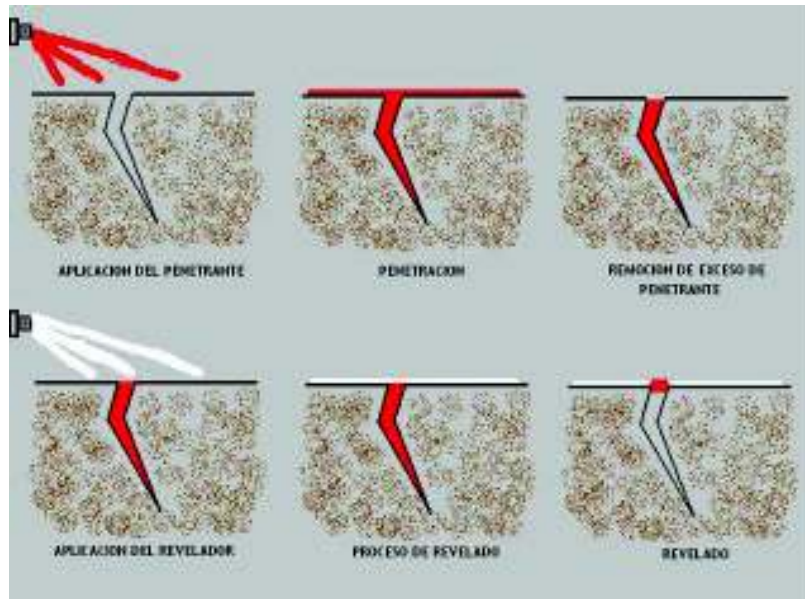


Figura 1.9. Principio de operación de los líquidos penetrantes.
 (Fuente: http://endases.mex.tl/photo_26975_L-QUIDOS-PENETRANTES.html).

1.6.2. Ensayo de partículas magnéticas

Los resultados arrojados por el ensayo con aplicación de partículas magnéticas, no se puede considerar necesariamente como un defecto, debido a que las propiedades metalúrgicas de los materiales pueden verse afectadas y eso a la vez distorsiona el campo magnético, para realizar este ensayo en una tubería es necesario emplear el yugo magnético como se puede ver en la Figura 1.10. La norma API 1104 sugiere seguir lineamientos de la norma ASTM E 709 para la ejecución del ensayo de partículas magnéticas. [5]



Figura 1.10. Ensayo con partículas magnéticas.
 (Fuente: <http://www.rent-industrial.com/producto/inspeccion-mediante-particulas-magneticas-mt/>).

1.6.3. Ensayo radiográfico

El uso de la radiografía industrial permite detectar problemas relacionados con la fusión incompleta, falta de fusión, quemaduras (Burn-through), inclusiones, porosidades, fisuras, grietas y socavaciones la mismas que están contempladas en la parte 9.3 de la norma API 1104. [5]

Para el cálculo de la distancia entre el foco de la fuente y el extremo para el ensayo radiográfico se define la ecuación 1.6. [4]

$$D = \frac{St}{k} \quad (1.6)$$

Donde:

D: Es la distancia mínima en pulgadas entre la fuente o punto focal y el extremo lateral del objeto que se está radiografiando.

S: Es el tamaño de la fuente efectiva o punto focal.

t : Es el espesor de la soldadura en pulgadas incluyendo el refuerzo más la distancia del extremo de la película.[5]

El ensayo radiográfico es vital y puede detectar imperfecciones internas, las mismas que resultan indetectables para el ensayo de líquidos penetrantes y partículas magnéticas.

La penetración inadecuada por lo general ocurre cuando el diámetro del electrodo es inferior al recomendado o el amperaje utilizado es bajo y el voltaje muy alto a los especificados en el documento de procedimiento de soldadura (WPS).

La fusión incompleta se debe principalmente al choque térmico, es decir cuando la junta soldada sufre un enfriamiento violento inmediatamente luego de terminar los distintos pases, por lo cual se hace relevante el precalentamiento de la junta soldada antes de iniciar el proceso y luego de cada pase de soldadura.

La Figura 1.11 ilustra los defectos más relevantes y comunes presentes en juntas soldadas, originados por distintas causas, todos estos defectos pueden ser detectados fácilmente mediante el ensayo radiográfico.

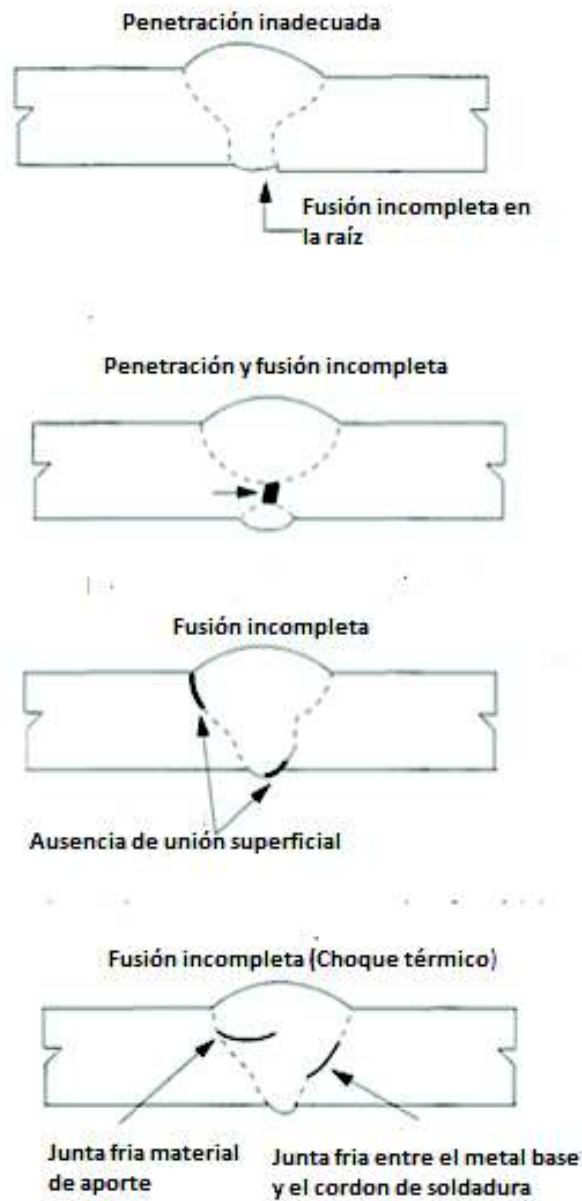


Figura 1.11. Problemas frecuentes en la soldadura.
(Fuente: Norma API 1104).

1.6.4. Ensayo de ultrasonido

Los resultados arrojados por el ultrasonido no deben ser considerados como defectos, en todo caso, este ensayo es útil y necesario cuando se va a realizar un proceso de soldadura en una tubería en operación cuya vida útil ya ha sido considerable, para lo cual se debe medir el espesor de dicha tubería en el lugar donde se ha decidido ejecutar el proceso de soldadura y si este espesor es mayor o igual al 70% del espesor original, se podrá dar paso al proceso de soldadura, caso contrario el código ASME IX recomienda no ejecutar el proceso de soldadura en dicha zona analizada, y si la tubería

es nueva, el presente ensayo es innecesario, en la Figura 1.12 se puede observar en la práctica la ejecución del ensayo de ultrasonido en una tubería en operación. [5]



Figura 1.12. Medición del espesor de una tubería en operación.
(Fuente: <https://consumerenergyalliance.org>).

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para cumplir los objetivos del presente trabajo de titulación, se debe estudiar las propiedades metalográficas del cordón de soldadura y zona afectada por el calor (ZAC), para lo cual es imprescindible realizar primero el proceso de soldadura del aditamento weldolet de acero A105, el mismo que es compatible con la tubería de acero A106 grado B según lo establece el grupo 1 y número P 1 (P number 1) del código ASME IX, posterior a esto se debe obtener las respectivas probetas para cada ensayo. Dichas pruebas se sustentan en la norma API 1104, la misma que especifica los criterios de aceptación de cada ensayo no destructivo.

Con el propósito de garantizar la conformidad del proceso de soldadura realizado, se debe someter la junta soldada al ensayo de líquidos penetrantes, posterior a esto se debe preparar las probetas para el ensayo de radiografía, dichos ensayos deberán corroborar el buen estado de la junta que será sometida al proceso tradicional, así como de la junta que tiene implementado el nuevo procedimiento que permitirá obtener resultados aceptables, para llevar a cabo esta parte se ha contado con la participación de un soldador debidamente calificado según lo exige la norma API 1104, donde dicha calificación se la ha realizado por el personal del laboratorio de soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. (Anexo III)

2.1. Proceso de soldadura

2.1.1. Diseño de la junta soldada

La junta soldada constituye la unión permanente del aditamento de ramificación (weldolet) con la tubería de acero A 106 Gr. B como se puede observar en la Figura 2.1, para el presente caso se va emplear el proceso de soldadura eléctrica por arco con electrodo revestido (SMAW), en posición 6F con múltiples pasadas, según lo indica el respectivo documento de especificación del proceso de soldadura (Anexo II)

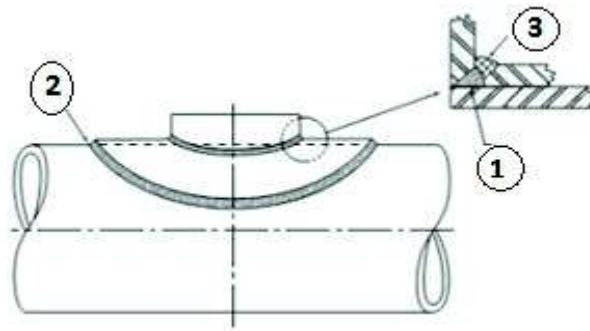


Figura 2.1. Detalle de la Junta soldada con la secuencia de soldadura recomendada.
(Fuente: Norma API 1104).

2.1.2. Material base

El material base corresponde a la tubería de acero A 106 grado B de 152.4 mm (6 pulgadas) de diámetro con cedula estándar, la misma que esta inclinada 45°, en cuyo interior se encuentra agua a temperatura ambiente como se ilustra en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Tubo de acero A 106 Gr B cortado en frio.
(Fuente: AUMAPROC S.A.).

2.1.3. Selección del aditamento (weldolet)

El criterio de los números P (P-number) para seleccionar el aditamento soldable (weldolet) es un método propio del estándar ASME IX, dicho método contempla en un mismo grupo y un mismo número P a metales base con propiedades similares en cuanto a su composición química soldabilidad y propiedades mecánicas.

El aditamento de ramificación (weldolet) elegido para este caso esta descrito en el catálogo de aditamentos soldables (Anexo IV) el mismo que es un acero A 105 marca BONEY FORGE estándar de 50.8 mm (2 pulgadas) de diámetro para tubería de 152.4mm (6 pulgadas) de diámetro, cuya especificación es 8 x 2 STD SA/A105 y se lo puede ver en la Figura 2.3.

Tanto la tubería de acero A 106 Gr. B así como el aditamento soldable (weldolet) STD SA/A105 tienen el numero P=1 y grupo 1 que corresponden a aceros de bajo carbono < 0.8 % C que tienen buena soldabilidad y propiedades mecánicas similares.



Figura 2.3. Aditamento soldable (weldolet) seleccionado.
(Fuente: AUMAPROC S.A.).

2.1.4. Selección del material de aporte

Los criterios de selección del material de aporte para el proceso (SMAW) se estipulan en la norma AWS A 5.1, cuya denominación es la siguiente. [21]

EXYZ

Donde:

E: representa la palabra electrodo

XX: Es la resistencia a la tensión del depósito de soldadura en miles de libra por pulgada cuadrada.

Y: Representa la posición de soldadura para la cual está diseñado el electrodo (1 Todas, 2 Frontal y Horizontal, 3 Frontal, 4 Vertical Descendente)

Z: Es el tipo de revestimiento y sus propias características de operación (0 y 1 es recubrimiento celulósico, 2, 3 y 4 es de recubrimiento Rutilico y 5, 6, 7,8 es Básico)


Para el presente proceso de soldadura se escogió dos tipos de electrodos, el electrodo AWS E 6010, el mismo que es un electrodo que brinda una resistencia a la tensión de 413 MPa. (60000 psi), que sirve para soldar en todas las posiciones y posee un recubrimiento celulósico. También se ha seleccionado al electrodo AWS E 7018 el mismo que tiene un recubrimiento básico, que sirve para soldar en todas las posiciones y brinda 483 MPa. (70000 psi) de resistencia a la tracción. Ambos electrodos tienen un diámetro de 2.4 mm (3/32 de pulgada). (Anexo V)

2.1.5. Equipos empleados en el proceso de soldadura

El proceso de soldadura se llevó a cabo en el laboratorio de la empresa AUMAPROC S.A., los equipos utilizados constan de máquinas de corte y desbaste, un horno para el precalentamiento de los electrodos, máquina soldadora, entre otros elementos necesarios para obtener una soldadura adecuada tales como; el medidor de nivel y demás herramientas propias del proceso de soldadura, las principales se detallan continuación.

El horno para electrodos permite elevar la temperatura de los electrodos hasta los 120 °C E 7018 con el propósito de eliminar la humedad y ponerlo en óptimas condiciones previo al proceso de soldadura, en la Tabla 2.1 se presentan las especificaciones técnicas.


Tabla 2.1. Horno para electrodos.

Descripción	Especificación	Imagen
Capacidad	205 Kg	
Elemento Calentador	1200 watts	
Rango de temperaturas	120Vac= 150° - 275° F (65° - 135°C) 208/230Vac= 150° - 550° F (65° - 288° C	
Aislamiento	53 mm de fibra de Vidrio	
Tamaño de cámara	51 x 51 cm (20" Diam. x 20")	
Peso neto	38 Kg.	
Disponible	120/240 volts	

(Fuente: Propia).

Para medir la temperatura de los electrodos en el interior del horno, así como del metal base durante el proceso de soldadura se ha empleado el pirómetro digital cuyas especificaciones se indican en la Tabla 2.2.


Tabla 2.2. Pirómetro digital.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	Fluke	
Modelo	IR-566	
Rango de temperaturas	De -40°C a 650°C	
Apreciación	0,1°C	
Tiempo de respuesta	<500 mms	

(Fuente: Propia).

Con ayuda de la máquina soldadora eléctrica se logró obtener las determinadas probetas, las especificaciones del equipo se detallan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Máquina soldadora.


Descripción	Especificación	Imagen
Marca	Lincoln	
Modelo	V275 S	
Voltaje	220v	
Corriente Entrada	AC	
Corriente de uso	AC/DC +_	
Procesos	Electrodo Revestido y TIG	
Tipo	Manual	
Vmax.	275v	

(Fuente: Propia).

La máquina amoladora es de vital importancia para el proceso de soldadura debido a sus múltiples usos. Con ayuda del disco abrasivo de corte se logra cortar tubería de acero, para el desbaste solo es necesario cambiarlo con un disco de desbaste y para una mejor limpieza se debe sustituir al disco por una grata de acero.

La Tabla 2.4 describe a las especificaciones de la máquina amoladora empleada durante el proceso de soldadura.

Tabla 2.4. Amoladora.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	Dewalt	
Modelo	DWE4212	
Potencia	1200 Watt	
RPM	11000 rpm	
Tipo de Interruptor	Paleta	
Extracción de polvo	si	
Prof. máx. de corte	27.88 mm	
Circunferencia de la herramienta	194mm	

(Fuente: Propia).

2.1.6. Procedimiento para la ejecución de la soldadura

Caso 1: Procedimiento de soldadura con precalentamiento continuo.

Corte de probetas: El corte se va realizar en el tubo de acero A 106 Gr B de 6 pulgadas de diámetro y cedula estándar con un disco abrasivo a una distancia de 55 cm, el corte debe ser en frío necesariamente con el fin de evitar variaciones considerables de temperatura que afecten a la microestructura del acero.

Montaje: Después de cortar la mencionada cantidad de tubo es necesario soldar en uno de sus extremos una tapa hermética que permita albergar agua a temperatura ambiente durante el proceso de soldadura, y todo este sistema se lo debe fijar a una base firme que permita obtener una inclinación de 45° del tubo y del aditamento soldable (weldolet) durante todo el proceso de soldadura.

Limpieza inicial: La tubería de acero A 106 Gr B por lo general viene recubierta de una delgada capa de pintura color negra, que protege a la misma de agentes corrosivos del medio exterior, por lo que es de vital importancia realizar una limpieza previa en la zona donde se va a realizar la soldadura con la ayuda de la amoladora y un disco de desbaste y grata.

Precalentamiento de los electrodos E 7018: Es recomendable mantener este tipo de electrodos dentro del horno por un lapso de 2 a 4 horas y elevar su temperatura por encima de la temperatura ambiente, para el presente caso se ha precalentado hasta los 140 °C con el propósito de eliminar la humedad y evitar problemas al momento de soldar

Precalentamiento del metal base: Con ayuda del mechero para GLP se puede elevar fácilmente la temperatura del metal base hasta una temperatura considerable, la norma ASME IX sugiere un precalentamiento de 130 °C pero al tratarse de un proceso en operación los técnicos de la empresa AUMAPROC S.A. sugieren elevar hasta una temperatura de 200 °C con ayuda de un calentamiento continuo que permita disminuir la velocidad de enfriamiento. Con esto se ha logrado suministrar calor al metal base. Primer y segundo pase de soldadura: El primer y segundo pase de soldadura se ha utilizado electrodos E 6010 debido a que brindan mayor penetración los mismos que no necesitan precalentamiento.

Pases siguientes: Los próximos 3 pases se los ha realizado con el electrodo E 7018 de 2.4 mm (3/32 pulgadas) de diámetro.

Limpieza entre pases: Después de cada pase, el cordón de soldadura queda recubierto de la escoria producto de su revestimiento por lo que es necesario utilizar la amoladora

con grata y disco de desbaste para limpiar el cordón de soldadura luego de cada pase y brindar una buena presentación.

Control de la velocidad de enfriamiento: En AUMAPROC S.A, se ha implementado un sistema de calentamiento continuo, es decir, antes durante y después del proceso de soldadura con el propósito de evitar cambios drásticos de temperatura que puedan afectar a la microestructura y producir problemas de agrietamiento y fisuras.

Caso 2: Proceso de soldadura convencional

El procedimiento del caso 1 fue implementado en los laboratorios de AUMAPROC S.A., pero para comparar posteriores resultados, se ha realizado el proceso de soldadura con el precalentamiento de 130°C únicamente según lo estipula la norma ASME IX, es decir las variantes del proceso implementado es el precalentamiento continuo a fin de mantener una temperatura de 200°C y el control de la velocidad de enfriamiento con el propósito de evitar el choque térmico.

2.2. Ensayo de líquidos penetrantes

El presente ensayo se lo ha realizado con la ayuda y la cooperación del laboratorio de ensayos no destructivos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, el presente ensayo está sustentado bajo la norma ASTM E165 Tipo II método A y registro ICC-132 como lo recomienda la norma API 1104.

2.2.1. Probetas para el ensayo de líquidos penetrantes

Al ser un procedimiento de ensayo de una soldadura en una tubería en operación, la probeta que se debe necesariamente emplear en el presente ensayo es el del aditamento soldable (weldolet) a la tubería de acero A 106 Gr-B de 152.4 mm (6 pulgadas) de diámetro interior, en la misma que se va a inspeccionar con el objetivo de identificar discontinuidades superficiales únicamente, para lo cual en el entorno a inspeccionar se ha medido una intensidad luminosa superior a los 1700 lux, en la Figura 2.4 a se puede observar a la probeta del caso 1 y el a Figura 2.4 b la del caso 2.



Figura 2.4. Probetas para el ensayo de líquidos penetrantes a) caso 1 b) caso 2.
(Fuente: Laboratorio END-FIM-EPN).

2.2.2. Implementos para el ensayo de líquidos penetrantes

Para este ensayo se necesita implementos básicos tales como franelas, guantes quirúrgicos, mascarillas y gafas protectoras. Las franelas brindan buena absorción del líquido en la probeta lo cual deja pulcritud en la superficie a examinar, los guantes, las gafas y la mascarilla son implementos de seguridad industrial.

El limpiador/removedor permite dejar la superficie libre de impurezas, y sus especificaciones se detallan en la Tabla 2.5


Tabla 2.5. Especificaciones del limpiador/removedor.

Descripción	Especificación	Imagen
Código	E59A	
Clase	2	
Densidad	743 gr/lit	
Corrosión de Acero al Carbono	No	
Inflamable	Si	

(Fuente: Propia).

El penetrante es el líquido que va a fluir hasta las zonas más profundas atravesando socavaduras que la vista humana no puede distinguir fácilmente, este líquido se debe aplicar luego de haber previamente limpiado la superficie con el respectivo líquido removedor. La Tabla 2.6 brinda información referente al penetrante utilizado.


Tabla 2.6. Especificaciones del líquido penetrante.

DESCRIPCION	Especificación	Imagen
Codigo	P-31A	
Clase	2	
Densidad	810 gr/lit	
Corrosión de Acero al Carbono	No	
Inflamable	Si	

(Fuente: Propia).

El revelador es el líquido que se encarga en develar las zonas donde previamente han ingresado la tinta penetrante localiza imperfecciones y defectos superficiales, tales como grietas, poros y fisuras superficiales. En la Tabla 2.7 se indica las propiedades de dicho revelador.

Tabla 2.7. Especificaciones del revelador.

Descripción	Especificación	Imagen
Código	D-70	
Clase	2	
Densidad	810 gr/lit	
Corrosión de Acero al Carbono	No	
Inflamable	Si	

(Fuente: Propia).

2.2.3. Procedimiento para el ensayo de líquidos penetrantes

Limpieza superficial con cepillo o grata: Previo a la aplicación sistemática de cada líquido, es necesario dejar todo el cordón de soldadura limpio y libre de toda impureza, por lo que es importante usar un cepillo metálico que ayude a remover impurezas causadas por la chispa de la soldadura o en su defecto por algún óxido encontrado en la superficie producto de la reacción de cordón de soldadura con la humedad del medio.

Limpieza con el limpiador/removedor: Este primer líquido se debe aplicar en toda la zona del cordón de soldadura, e inmediatamente con el uso de una franela se procede a remover el mismo, esto permitirá evacuar el polvo metálico y demás impurezas producto del procedimiento anterior.

Aplicación de la tinta penetrante: De acuerdo a lo que establece la norma ASTM E 165, para el presente caso al ser una zona circular la que se va a examinar, es necesario dividirla en dos partes para su análisis, una vez realizada en la parte superior se giró 180° a la probeta y se repitió el procedimiento normalmente.

Remoción de la tinta penetrante: Como la humedad del ambiente no es relevante para el presente caso, se ha esperado 10 minutos para que la tinta penetre hasta los intersticios más profundos que pueden estar presentes en la soldadura y se ha procedido a remover con un paño adecuado el resto del líquido que no ha alcanzado a fluir más allá de la superficie visible.

Aplicación del revelador: Se logró aplicar el líquido revelador en toda la zona donde inicialmente se colocó la tinta penetrante, se esperó durante 5 minutos según lo estipula la norma ASTM E 165, durante todo este tiempo, el revelador pudo extraer toda la tinta penetrante que se ha incrustado en los defectos superficiales presentes, dejando en descubierto todos los defectos superficiales presentes.

2.3. Ensayo de partículas magnéticas

El ensayo de partículas magnéticas al igual que el ensayo de líquidos penetrantes permite conocer defectos superficiales, para el presente ensayo se han utilizado criterios de la norma ASTM E 709 según lo sugiere la norma API 1104, el tipo de magnetización es continua, longitudinal, inducción indirecta mediante el método húmedo y con ayuda del yugo magnético, con partículas magnéticas blancas en un medio no acuoso donde es necesario emplear la corriente alterna(AC). (ANEXO VII)

2.3.1. Probetas para el ensayo de partículas magnéticas

De igual forma que para el ensayo de líquidos penetrantes, las probetas que se deben utilizar en el presente ensayo son las mismas obtenidas en los dos casos de soldadura, cabe recalcar que la norma API 1104 exige este ensayo para corroborar la veracidad de los resultados de líquidos penetrantes. En la figura 2.5 se ilustran a las probetas de ambos casos.




Figura 2.5. Probetas para el ensayo de partículas magnéticas a) Caso 1 b) Caso 2.
(Fuente: Laboratorio de END-EPN).

2.3.2. Implementos para el ensayo de partículas magnéticas

El yugo magnetizador permite generar un campo magnético longitudinal a lo largo de la tubería, cuyas especificaciones se encuentran en la Tabla 2.8.


Tabla 2.8. Especificaciones del yugo magnético

Descripción	Especificación	Imagen
Marca Amperaje nominal Tipo de corriente Voltaje	Magnaflux 6-110A AC 110V	

(Fuente: Lab. END EPN, 2018).

Las partículas magnéticas se acomodarán en la superficie de análisis en presencia de un campo magnético inducido mediante el yugo magnético, las mismas que son de material ferromagnético cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Especificaciones de las partículas magnéticas.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	Magnaflux	
Estado	Polvo granular blanco	
Densidad	10 g/l (49 lb/pie cuadrado)	
Concentración recomendada	9.7 g/l (1-1/3 oz/gal)	
pH	9.1	

(Fuente: Lab. END EPN, 2018).

2.3.3. Procedimiento para el ensayo de partículas magnéticas

Limpieza superficial: Previo al proceso de ensayo de partículas magnéticas se debe limpiar con ayuda del cepillo metálico o grata.

Magnetización: Con ayuda del yugo magnético se procedió a inducir el campo magnético a lo largo de toda la longitud de la tubería.

Colocar las partículas magnéticas: Durante la magnetización del yugo se va progresivamente añadiendo las partículas, las mismas que se van acomodando y dejando en claro los defectos superficiales que están presentes en la zona analizada.

2.4. Ensayo radiográfico

2.4.1. Probetas para el ensayo radiográfico

Este ensayo no es posible realizar en una tubería en operación, pero para el presente estudio se lo ha ejecutado con ayuda de una obturación en la parte lateral de la tubería para poder colocar la película de modo que se pueda observar defectos y discontinuidades de todo el cordón y de la zona afectada por el calor.

En la Figura 2.6 se pueden observar las probetas para el caso 1 y para el caso 2 respectivamente empleadas para la ejecución del ensayo radiográfico, el presente ensayo se lo realizó en el laboratorio de ensayos no destructivos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.



Figura 2.6. Probeta para el ensayo Radiográfico a) Caso 1 b) Caso 2.
(Fuente: AUMAPROC S.A.).

2.4.2. Equipos empleados para el ensayo radiográfico

El ensayo se lo ha realizado en el laboratorio de ensayos no destructivos de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, en el mismo se dispone el equipo de rayos x cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 2.10.

Para la ejecución del presente ensayo se debe contar con personal altamente calificado, el laboratorio debe cumplir con las respectivas normativas y poseer la respectiva licencia de funcionamiento, la persona quien dirige un centro de esta naturaleza debe tener la preparación referente a los riesgos de radiación por ondas de alta frecuencia.

Tabla 2.10. Especificaciones del equipo de rayos x.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	Baltographe	
Modelo	BF 200/10	
Voltaje	200 Kv	
Amperaje	10mA	
Película Utilizada	Structurix	
Tipo de Película	II-D7	

(Fuente: Lab. END EPN, 2018).

2.4.3. Procedimiento para el ensayo radiográfico

Proceso de corte: Previo al ensayo radiográfico fue necesario ejecutar una obturación similar a la que realiza la máquina de pegado (hot tap), es decir, se realizó un corte en frío conservando las propiedades microestructurales de todo el conjunto soldado, con el propósito de facilitar la colocación de la película radiográfica.

Tomar dimensiones: Sobre la pared que se va a radiar se debe conocer su espesor, así como el material con el que se va a ensayar, con el propósito de seleccionar el radioisótopo y el kilovoltaje más adecuado. Para el presente estudio se ha utilizado 160 Kv y 5mA

Cálculo de la distancia: Una vez conocido el radioisótopo y el kilovoltaje se pudo calcular la distancia entre la probeta a ser radiada y la fuente de radiación, para lo cual es útil emplear la ecuación (1.6), de donde la distancia para el presente estudio es de 31cm.

Cálculo del tiempo de exposición: Con los datos anteriores se procede a estimar el tiempo de exposición basados en tablas gráficas propias del equipo que se va a utilizar. El tiempo estimado en base a la gráfica es de 1 min con 56 seg.

Seleccionar la película: Se ha seleccionado la película marca Structurix tipo II-D7 la misma que resulta idónea para el presente estudio.

Proceso de revelado: Con las películas ya previamente expuestas, y dentro del cuarto oscuro, se procede a revelar la película demorando un tiempo de 5 min un tiempo de parada de 2 min y el tiempo de fijado se 10 min, esto según lo indica la norma ASTM E 94.

2.5. Ensayos metalográficos

2.5.1. Probetas para el ensayo metalográfico

Para el ensayo metalográfico se ha tomado una muestra de cada probeta, para lo cual previamente se ha cortado al conjunto soldado en cuatro partes, como lo especifica la norma API 1104, cuyo corte fue en frío y con el disco especial de corte, el mismo que preserva la microestructura del material base, cordón de soldadura y zonas afectadas por el calor.

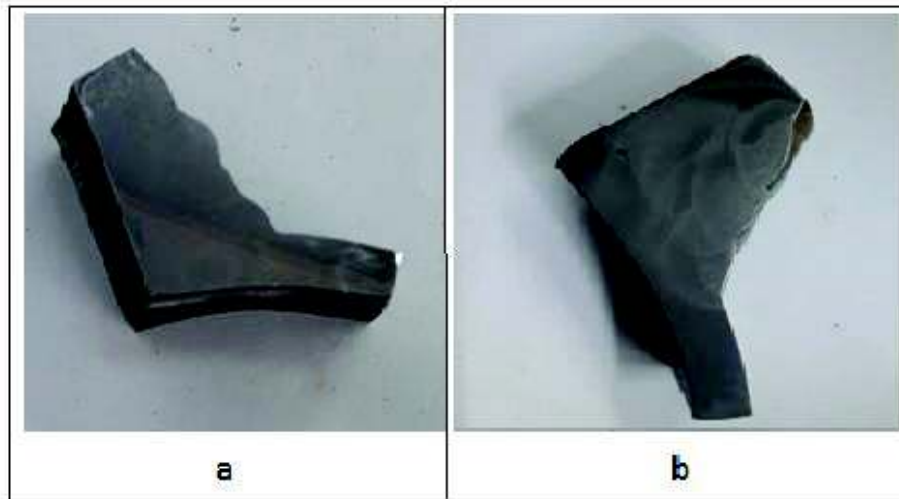


Figura 2.7. Probetas para el ensayo metalográfico a) Caso 1 b) Caso 2.
(Fuente: Propia).

2.5.2. Equipos para el ensayo metalográfico

El presente ensayo se lo ha realizado en el laboratorio de metalografía desgaste y falla de la facultad de ingeniería mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, para obtener las probetas se requiere herramientas de corte tales como discos abrasivos y sierras, además de instrumentos de medición. Los equipos requeridos para la obtención de metalografías se detallan a continuación.

La máquina desbastadora de disco permite igualar las limallas y rebabas dejadas por el corte de sierra, en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Máquina desbastadora de disco.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca:	BUEHLER	
Modelo:	121-0M-84	
Fabricación :	Metalurgical Apparatus	
Voltaje:	220 V.	
Amperaje:	6,2 A	
Núm. Abrasivo :	100 (granos/plg ²)	
Potencia del motor:	1 (HP)	
Dimensiones :	96x67x71 (cm)	

(Fuente: Propia).

La máquina neumática FORCIMAT tiene la capacidad para 6 probetas y es de tipo semiautomático, esta máquina sirve para el pulido y el desbaste fino y sus especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 2.12.


Tabla 2.12. Máquina pulidora y desbastadora FORCIMAT.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca:	FORCIMAT	
Modelo:	FORCIPOL 2V	
Año :	2016	
Serie:	N20161076	
Voltaje:	230 V	
Frecuencia:	50/60 Hz	
Potencia del motor:	0,75 HP	

(Fuente: Propia).

El microscopio metalográfico marca OLYMPUS permite observar y analizar la microestructura, sus especificaciones técnicas se muestra en la Tabla 2.13

Tabla 2.13. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca:	OLYMPUS	
Modelo:	GX41F	
Año :	2016	
Serie:	4D41167	
Voltaje:	100-120 / 230-240 V	
Frecuencia:	50/60 Hz	
Potencia del motor:	85 VA 40 (W)	
Software:	Stream Essentials	

(Fuente: Propia).

2.5.3. Procedimientos para en ensayo metalográfico

Corte de probetas: El corte se va a realizar con herramientas de corte manuales manteniendo una temperatura relativamente baja de modo que la estructura cristalina de la probeta no sufra afectaciones, tomando en cuenta que el largo de las probetas debe ser entre los 15 a 20 mm para que encajen en las capsulas de resina sin dificultad.

Encapsulamiento o montaje: Este paso no se pudo realizar debido a que las probetas superan los 20mm de diámetro por lo que es necesario realizar las pruebas metalográficas sin encapsulamiento.

Desbaste grueso: También se denomina esmerilado y se emplea una lija numero 100 (100 granos/pulg²). Con este desbaste se va a obtener una superficie lo más plana posible ya que se logra remover todas las limallas e impurezas producto del uso de la herramienta de corte.

Desbaste fino: Después del desbaste grueso la probeta se queda con imperfecciones propias del proceso que deben ser removidas por el desbaste fino, en el cual se deben usar progresivamente lijas N° 240, 320, 600 y 1500 con ciclos de 2 minutos por lija. Las condiciones de giro son: cabezal a 125 rpm en sentido horario mientras que el plato debe girar a 250 rpm en sentido contrario al cabezal donde la fuerza aplicada es de 10 N, después de este procedimiento es necesario lavar la superficie con alcohol y secarlas para evitar que se oxide.

Pulido grueso: Durante el presente proceso se debe utilizar pulidoras de paño de 6 micras mientras el lubricante de diamante disminuye la fricción y el aumento de temperatura, el paño se coloca en la misma máquina de pulido fino y se deben hacer en ciclos de 1 minuto, hasta que la superficie alcance uniformidad, las condiciones de operación de la máquina es la misma en la del pulido fino con la única variante que la fuerza aplicada es de 15 N.

Pulido fino: En esta etapa, la superficie de la probeta debe quedar similar a la de un espejo, se debe usar el paño de una micra con ciclos de un minuto ayudados por el lubricante de diamante, luego de esta etapa se lava la superficie con alcohol y secarla inmediatamente para evitar problemas de corrosión.

Ataque químico: Se debe utilizar el nital al 10% con un tiempo de 3 segundos, este agente va a reaccionar con la superficie de la probeta permitiendo observar la microestructura presente con ayuda del microscopio.

Observación microscópica: Después de haber realizado el ataque químico, se expone al microscopio en el que se puede obtener magnificaciones de 100x y 500x.

Análisis de fotografías mediante el software “Stream Essentials”: Con las imágenes capturadas en el ordenador y establecida una calidad y un contraste se procesan en el software con el fin de determinar el porcentaje de fases y el tamaño de grano.

2.6. Ensayo de dureza

A través del presente ensayo se puede conocer la resistencia a la indentación permanente de cualquier material. La escala más utilizada es la Rockwell, el resultado del ensayo va a depender de la carga aplicada por la máquina y del tipo de indentador que se use.

En la Tabla 2.13 se presentan los distintos tipos de dureza Rockwell en función del tipo de indentador y de la carga aplicada.

Tabla 2.14. Características principales del ensayo de dureza Rockwell B y C.

Dureza Rockwell	Indentador	Carga (Kgf)
Rockwell A	Esfera de 1/16 in	60
Rockwell B	Esfera de 1/16 in	100
Rockwell C	Cono de diamante con ángulo de 120°	150

(Fuente: Propia).

La dureza de un acero al carbono permite relacionar otras propiedades mecánicas, la ecuación (2.13), (Groover 2007a) permite estimar la resistencia última a la tracción de la dureza de un acero.

$$S_t = 3.5 * HB \quad (2.13)$$

Previamente para emplear la ecuación (2.3), la dureza debe estar expresada en dureza Brinell (HB) del caso de obtener resultados en escala Rockwell se deben utilizar las tablas de conversión de la norma ASTM E140-12b las mismas que permiten obtener un valor determinado de una escala a otra con facilidad.

2.6.1. Probetas para el ensayo de dureza

En el ensayo de dureza se deben utilizar las mismas probetas del ensayo metalográfico, tomando en cuenta que las dos caras que se van a ensayar deben ser paralelas y sus

superficies deben estar limpias y libre de impurezas, esto ayudará a obtener resultados más exactos. En la Figura 2.8 se ilustran ambas caras de las probetas a utilizarse.

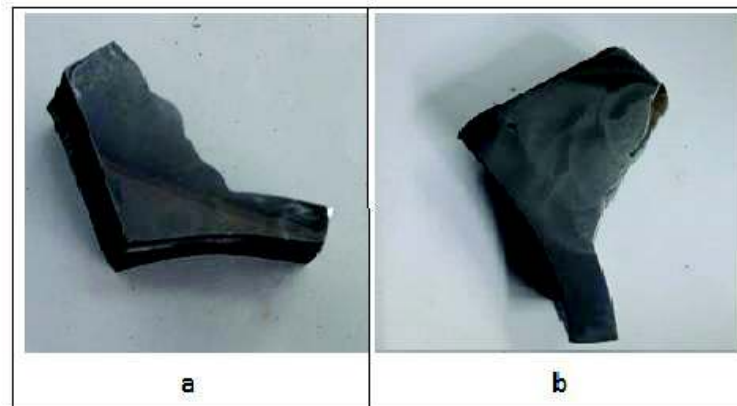


Figura 2.8. Probetas para el ensayo de dureza a) Caso 1 b) Caso 2.
(Fuente: Propia).

2.6.2. Equipos para el ensayo de dureza

El ensayo se lo ha realizado en el laboratorio de metalografía de la facultad de ingeniería mecánica de la Escuela Politécnica Nacional los equipos de ensayo consisten en dos patrones de calibración Qualitest 66.27 +/- 1.0 HRB y Qualitest 47.59 +/- 1.0 HRC y un durómetro Rockwell cuyas especificaciones se detallan en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Especificaciones técnicas del durómetro Rockwell.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca:	HRADROCKER	
Modelo:	150-A	
Carga mínima:	A0 kgf.	
Capacidad de carga:	60; 100; 150 kgf.	
Aplicación de carga:	Sistema hidráulico	
Lectura:	Analógica	
Indentador:	Punta de acero de 1/16 de pulgada	

(Fuente: Propia)

2.6.3. Procedimiento para el ensayo de dureza

El procedimiento se lo ha realizado basando en la norma ASTM E18-16 (Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials) cuyo procedimiento se detalla a continuación:

Desbastar ambas superficies de modo que dichas superficies queden completamente planas y paralelas entre sí, libres de imperfecciones e impurezas.

Seleccionar la escala de dureza en el durómetro HARDROCKER (HRA, HRB, HRC) en función del material que se vaya a ensayar.

Seleccionar el tipo de indentador adecuado según el tipo de dureza (ver Tabla 2.13)

Calibrar el durómetro con el patrón Qualitest 66.27 \pm 1.0 HRB o Qualitest 47.57 \pm 1.0 según se lo requiera.

Colocar la probeta sobre la base del durómetro.

Tocar la probeta con la punta del indentador para luego encerrar al durómetro.

Girar la perilla horizontal hasta que la aguja de tres vueltas completas.

Cargar a la máquina y esperar a que la perilla se estabilice.

Descargar a la máquina y observar el valor indicado en el analógico.

La norma ASTM E 18-16 recomienda 5 ensayos por lo menos en la misma superficie.

2.7. Análisis de composición química

El presente análisis se lo realizó con la cooperación del Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El análisis de composición química se lo ha realizado con el objetivo de determinar la naturaleza de ambos materiales base, es decir de la tubería de acero A 106 Gr B y del aditamento soldable (weldolet) para corroborar la validez del presente estudio.

2.7.1. Probetas para el análisis de composición química

Para el análisis químico se han utilizado dos muestras, es decir se analizó la composición química del aditamento soldable (weldolet) y de la tubería, para lo cual fue necesario extraer dos muestras de cada material con una longitud aproximada de 20 mm de largo y 20 mm de ancho como se puede observar en la figura 2.9.



Figura 2.9. Probetas para el análisis de composición química a) Tubería de acero A 106 Gr, B
b) Aditamento soldable (weldolet) A 105 STD.
(Fuente: Laboratorio de Fundición).

2.7.2. Equipos para el ensayo de composición química

El equipo que se utilizó fue un espectrómetro de chispa cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16. Especificaciones técnicas del espectrómetro de chispa.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	Spectro	
Modelo	Spectro MAXX	
Voltaje	239/115 V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Software	Spectro Spark Analyzer MX	
Peso	60 Kg	

(Fuente: Propia).

2.7.3. Procedimiento para el ensayo de composición química

El principio de funcionamiento es por chispa y consiste en elevar la temperatura a través de un arco eléctrico, donde la muestra emite una radiación de luz, el espectro formado depende cada uno de los componentes de la muestra, la longitud de onda emitida es propia de cada elemento químico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos de los distintos ensayos realizados en cada probeta, los mismos que corroboran la validez del proceso de soldadura realizado, dichos resultados se sustentan en los criterios de aceptación del numeral 9 de la norma API 1104. Posteriormente se discuten los resultados comparativamente de tal manera que se pueda entender desde el punto de vista metalúrgico el comportamiento microestructural de cada probeta. Finalmente se procede a caracterizar la soldadura realizada en base a la norma ASME B 31.3 para juntas en T, donde se tratan temas relacionados con la medida de la pierna de la soldadura, la concavidad y convexidad según sea el caso.

3.1. Resultado del proceso de soldadura

Para el procedimiento de soldadura, así como para el criterio de selección de los ensayos no destructivos se ha basado en los lineamientos de la norma API 1104 y para analizar los criterios de aceptación de posibles fallas o defectos se ha basado en los parámetros del código ASME IX. Por lo cual el resultado del proceso de soldadura global se ha estimado en función de los resultados de todos los ensayos realizados, el análisis metalográfico no está contemplado en ninguna de las dos normas antes mencionadas, pero este aporte nos va a servir para un estudio metalúrgico de la junta soldada y poder garantizar trabajos futuros.

3.1.1. Comportamiento térmico del material base sometido al precalentamiento continuo

El precalentamiento continuo es una técnica que permite precalentar progresivamente al material base mediante un mechero, dicha técnica está únicamente basada en la experiencia de los técnicos de AUMAPROC S.A., para lo cual fue necesario someter al conjunto a soldarse, a dicho precalentamiento, antes, durante y después del proceso de soldadura. Durante el presente proceso se debe tomar las diferentes mediciones de las temperaturas que va alcanzando en el transcurso del tiempo, este procedimiento se lo ha implementado como caso 1 para posteriormente comparar futuros resultados con el procedimiento estándar, el cual únicamente considera un precalentamiento normal del material base hasta una temperatura de 130°C y se lo ha denotado como caso 2.

En la Tabla 3.1 se presentan los datos de las temperaturas en el transcurso del tiempo, a través de la cual se puede conocer la etapa que atraviesa el proceso y el tiempo que se tarda en la misma.

Tabla 3.1. Datos referentes al precalentamiento continuo.

Etapa	Tiempo min.	Temperatura °C
Precalentamiento previo al proceso de soldadura	0	19
	4	36
	8	65
	12	107
	16	153
	20	203
Proceso de Soldadura	22	300
	24	401
limpieza	25	283
Proceso de Soldadura	28	364
	30	423
limpieza	31	310
Proceso de Soldadura	34	292
	36	376
limpieza	38	265
Proceso de Soldadura	42	322
	45	391
limpieza	48	276
Proceso de Soldadura	50	300
	54	431
Enfriamiento progresivo	58	300
	62	220
Enfriamiento progresivo	70	203
	80	170
Enfriamiento progresivo	90	148
	120	100
Enfriamiento progresivo	150	72
	220	20

(Fuente: Propia).

La Figura 3.1 indica el comportamiento térmico durante todo el proceso de soldadura.



Figura 3.1. Comportamiento térmico durante todo el proceso de soldadura.


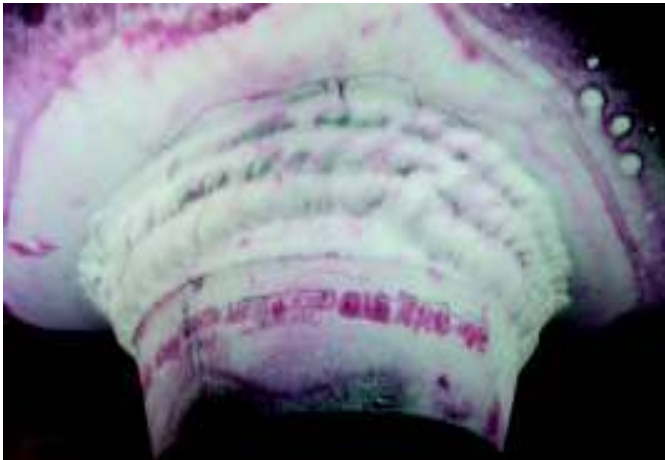
(Fuente: Propia).

3.1.2. Ensayo de líquidos penetrantes

Las probetas a examinar tienen una geometría circular divididas en dos zonas con 180° cada una, el cordón de soldadura es la zona central del análisis, los criterios de aceptación de los resultados del ensayo de líquidos penetrantes se evaluarán en base al numeral 5 de la sección 9 de la norma API 1104.

Los resultados del ensayo de líquidos penetrantes del caso 1, se detallan en la Tabla 3.2.

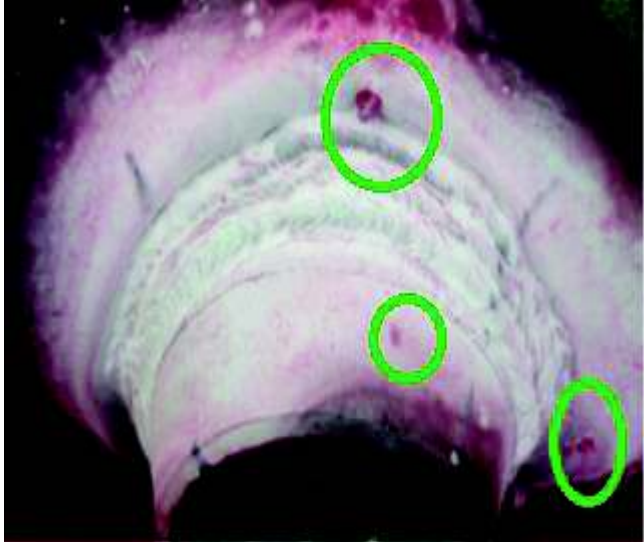
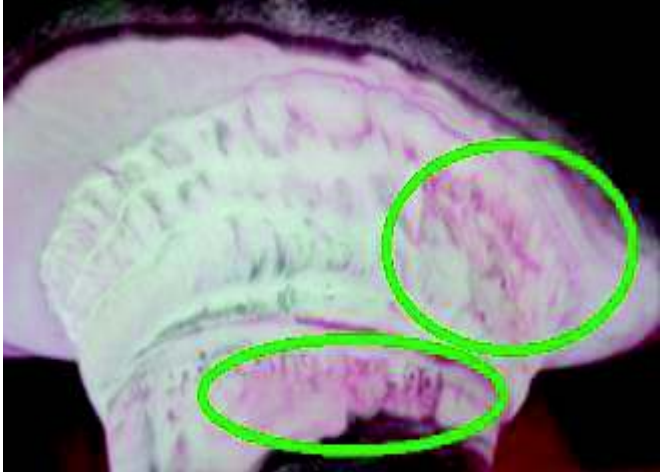
Tabla 3.2. Resultados del ensayo de líquidos penetrantes para el procedimiento implementado en AUMAPROC S.A.

DENOMINACION	IMAGEN	RESULTADO
2018-R-04-LP-03-0002_1		No se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés
2018-R-04-LP-03-0002_2		No se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés

(Fuente: Lab. END,2018)

Los resultados del ensayo de líquidos penetrantes del caso 2 se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados del ensayo de líquidos penetrantes del caso 2 (procedimiento convencional).



DENOMINACION	IMAGEN	RESULTADO
2018-R-04-LP-03-0001_1		Se observan porosidades, sin embargo no se consideran discontinuidades relevantes
2018-R-04-LP-03-0002_2		Se observan porosidades, sin embargo no se consideran discontinuidades relevantes

(Fuente: Lab. END, 2018).

3.1.3. Partículas magnéticas

Los resultados del ensayo de partículas magnéticas del caso 1 (Procedimiento con precalentamiento continuo) se detallan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Resultados del ensayo de partículas magnéticas caso1 (Procedimiento con calentamiento continuo).

DENOMINACION	IMAGEN	RESULTADO
2018-R-05-PM-01-0001_1		No se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés
2018-R-05-PM-01-0001_2		No se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés

(Fuente: Lab. END, 2018).

Los resultados del ensayo de partículas magnéticas del caso 2 (procedimiento convencional) se detallan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Resultados del ensayo de partículas magnéticas caso2 (Procedimiento convencional).




DENOMINACION	IMAGEN	RESULTADO
<p>2018-R-05-PM-01-0002_1</p>		<p>No se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés</p>
<p>2018-R-05-PM-01-0002_2</p>		<p>No se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés</p>

(Fuente: Lab. END,2018).

3.1.4. Ensayo radiográfico

Para realizar el presente ensayo, las probetas circulares se dividen en tres secciones de análisis, cada una de ellas delimitada 120° para facilitar la radiación según lo estipula la norma ASTM E 94. Los resultados del caso 1 (Procedimiento con precalentamiento continuo) se detallan en la Tabla 3.6.

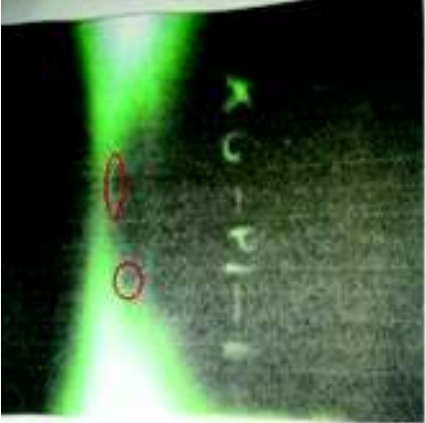
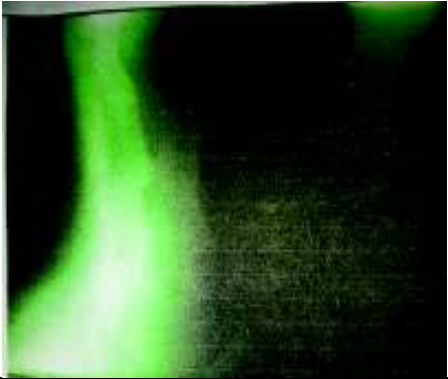

Tabla 3.6. Resultados del ensayo de radiografía industrial para el caso 1 (Procedimiento con precalentamiento continuo).

Designación	Imagen	Observaciones
Toma 1 2018-R07-Rx03-002-1		No se observan defectos
Toma 2 2018-R07-RX03-002-2		No se observan defectos
Toma 2 2018-R07-RX03-002-3		No se observan defectos

(Fuente: Lab. END,2018).

Los resultados del ensayo de radiografía industrial para el caso 2 (Procedimiento convencional) se detallan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Resultados del ensayo de radiografía industrial para el caso 2 (Procedimiento convencional).

Designación	Imagen	Observaciones
Toma 1 2018-R07-Rx03-001-1		Se observan inclusiones de 6,3 y 2 mm
Toma 2 2018-R07-RX03-001-2		No se observan defectos
Toma 2 2018-R07-RX03-001-3		No se observan defectos

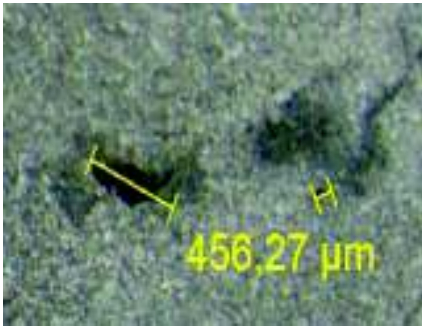
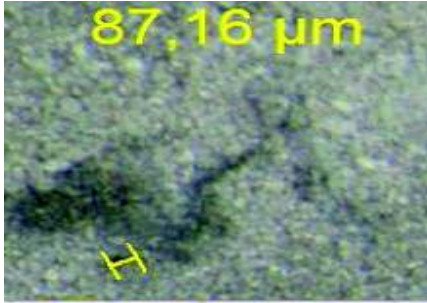
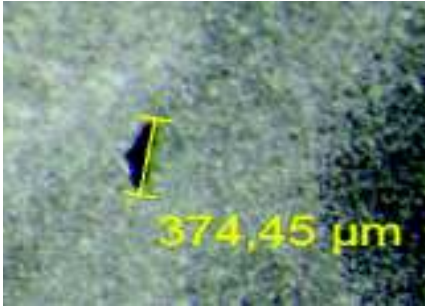
(Fuente: Lab. END,2018).

3.1.5. Ensayo metalográfico

Los resultados del ensayo metalográfico se han obtenido gracias a la colaboración del laboratorio de metalografía desgaste y falla de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional tanto para el caso 1 en la Tabla 3.8 y para el caso 2 en la Tabla 3.9.

Caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo)

Tabla 3.8. Discontinuidades presentes en la probeta del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).

Zona de Análisis	Designación	Imagen	Observaciones
Cordón de soldadura E 6010	CS-6010		Porosidad producida por la falta de fusión en los primeros pases
Cordón de soldadura E 6010 periférico	CS-6010P		Porosidad producida en el cordón de soldadura
Zona afectada por el calor en la tubería	ZAC-T		Porosidad entre el cordón de soldadura y el metal base

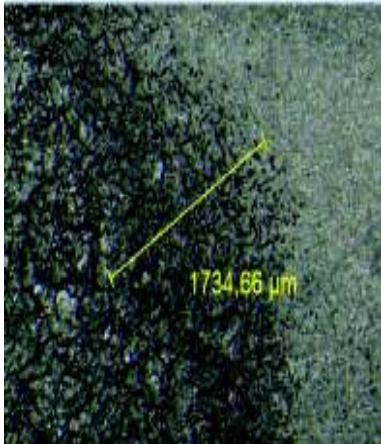
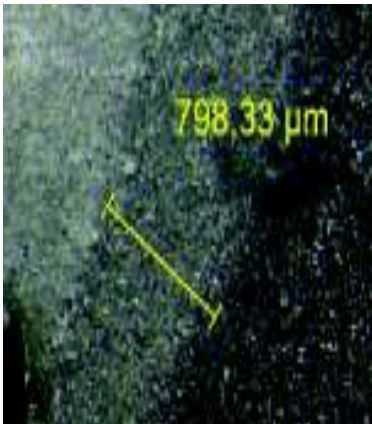
(Fuente: LMDF, 2018).

Tabla 3.9. Tamaño de discontinuidades en la probeta del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).

Designación	Tamaño (mm)
CS-6010	0,456
CS-6010P	0,087
ZAC-T	0,375
SUMA	0,456
PROMEDIO	0,152

(Fuente: Propia).

Tabla 3.10. Zona afectada por el calor caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).

Zona de Análisis	Designación	Imagen	Observaciones
Zona afectada por el calor entre el cordón y el aditamento (weldolet)	ZAC-WELD		La longitud de la zona afectada por el calor entre el cordón de soldadura y el aditamento (weldolet) es de 1.7 mm aproximadamente
Zona afectada por el calor entre el cordón y la tubería	ZAC-T		La longitud de la zona afectada por el calor entre el cordón de soldadura y la tubería de acero A 106 Gr. B es de 0.8 mm aproximadamente

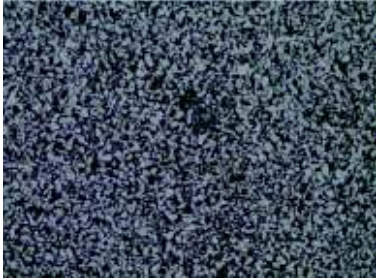
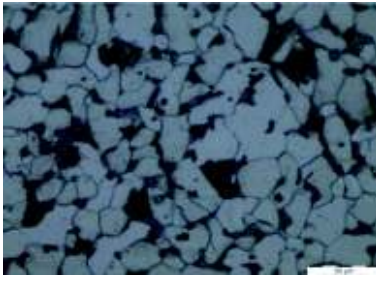

(Fuente LMDF 2018).

Tabla 3.11. Dimensiones de la zona afectada por el calor en la probeta del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).

Zona	Longitud de la ZAC (mm)
ZAC-WELD	1,73
ZAC-T	0,798
SUMA	2,528
Promedio	0,842

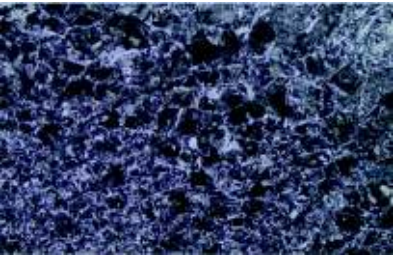


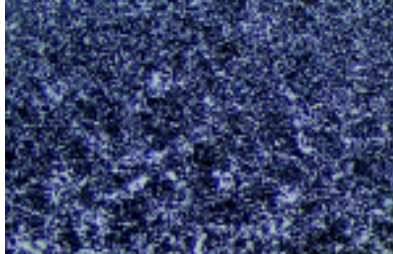

(Fuente: Propia).

Tabla 3.12. Resultados metalográficos con ataque químico caso 1 (Probeta realizada con precalentamiento continuo).

Zona de Análisis	Designación	Imagen	Observaciones
Tubería Acero A 106 Gr B a 100x	MAT-BAS 100x		Perlita fina laminar (parte negra) en matriz ferrítica (Parte blanca)
Tubería Acero A106 Gr B a 500x	MAT-BAS 500x		
Zona Afectada por el calor en la tubería 100x	T-ZAC 100x		Perlita en matriz Ferrítica

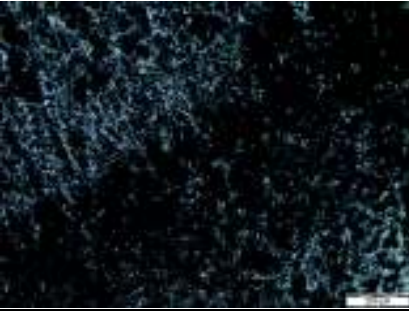



Continúa.

Continuación Tabla 3.12.

Zona de Análisis	Designación	Imagen	Observaciones
Zona Afectada por el calor en la tubería 500x	T-ZAC 500x		Acero enfriado rápidamente sin llegar a la austenización completa
Cordón de soldadura periférico 7018 100x	CS-7018 100x		Acero enfriado rápidamente Ferrita Widmanstätten
Cordón de soldadura periférico 7018 500x	CS-7018 500x		Acero enfriado rápidamente Ferrita Widmanstätten
Cordón de soldadura interno 6010 100x	CS-6010 100x		Acero enfriado rápidamente Ferrita Columnar
Cordón de soldadura interno 6010 500x	CS-6010 500x		Acero enfriado rápidamente Ferrita Columnar

Continúa.

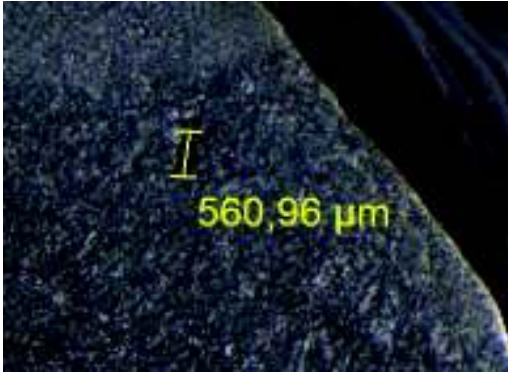


Continuación Tabla 3.12.

Zona de Análisis	Designación	Imagen	Observaciones
Zona afectada por el calor en el aditamento (Weldolet) 100x	ZAC-WELD 100x		Acero hipoeutectoide presenta desintegración de perlita
Zona afectada por el calor en el aditamento (Weldolet) 500x	ZAC-WELD 500x		
Weldolet 100x	WELD-A105 100x		Perlita y ferrita proeutectoide cuyo grano está orientado en dirección longitudinal
Weldolet 500x	WELD-A105 500x		

(Fuente: LMDF 2018).

Caso 2 (Probeta soldada con el procedimiento convencional)

Tabla 3.13. Discontinuidades presentes en la probeta del caso 2 (Probeta con procedimiento estándar).

Zona de Análisis	Designación	Imagen	Observaciones
Cordón de soldadura 7018 Periférico	CS-7018P		Porosidad en el cordón de soldadura de 0.56 mm de longitud aproximadamente
Zona afectada por el calor en la tubería	ZAC-T1		Porosidad de 1.8mm de longitud aproximadamente provocada por la falta de fusión entre el cordón de soldadura y el metal base
Zona afectada por el calor en la tubería	ZAC-T2		Porosidad de 0.417 mm aproximadamente en la zona afectada por el calor

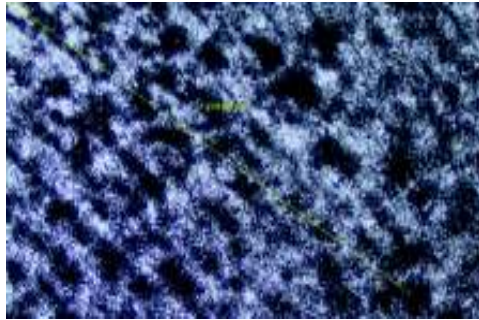
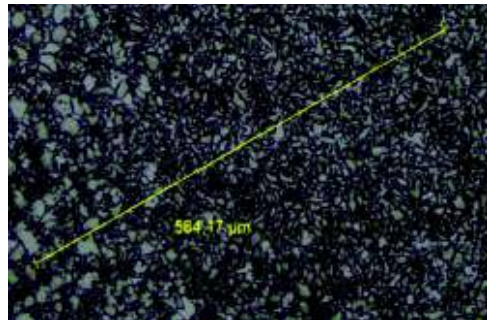
(Fuente: LMDF 2018).

Tabla 3.14. Tamaño de discontinuidades en la probeta del caso 2 (Probeta con procedimiento convencional).

Designación	Tamaño (mm)
CS-7018P	0,56
ZAC-T1	1,78
ZAC-T2	0,416
SUMA	0,56
PROMEDIO	0,19

(Fuente: Propia).

Tabla 3.15. Zona afectada por el calor caso 2 (Probeta con el procedimiento estándar).

Zona de Análisis	Designación	Imagen	Observaciones
Zona afectada por el calor entre el cordón y el aditamento (weldolet)	ZAC-WELD		Se visualiza la longitud de la ZAC en 1.12 mm aproximadamente en el aditamento soldable (weldolet) Acero A 105 STD
Zona afectada por el calor entre el cordón y la tubería	ZAC-T		Se visualiza la longitud de la ZAC en 0.58 mm aproximadamente en la tubería de Acero A 106 Gr B



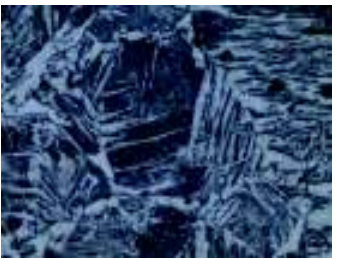
(Fuente: LMDF 2018).

Tabla 3.16. Dimensiones de la zona afectada por el calor en la probeta del caso 2 (Probeta con procedimiento convencional).

Zona	Longitud (mm)
ZAC-WELD	1,12
ZAC-T	0,58
SUMA	1,7
Promedio	0,567

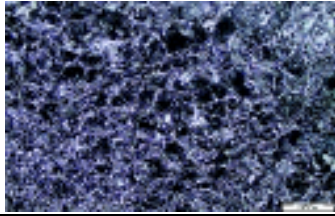




(Fuente: Propia).

Tabla 3.17. Resultados metalográficos con ataque químico caso 2 (Probeta realizada siguiendo el procedimiento convencional).

Zona de Análisis	Designación	Imagen	Observaciones
Tubería Acero A106 Gr B a 100x	MAT-BAS 100x		Microestructura Ferrítica perlítica en la zona de transición se puede notar la presencia de perlita desintegrada
Tubería Acero A106 Gr B a 500x	MAT-BAS 500x		
Zona Afectada por el calor en la tubería 100x	T-ZAC 100x		Ferrita Widmansttaten

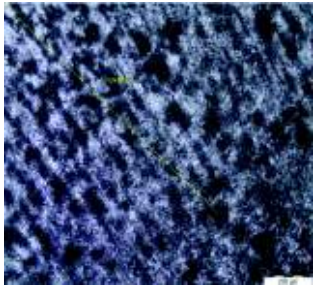
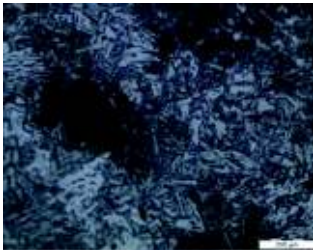
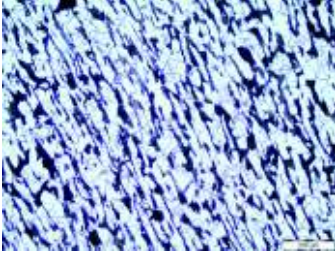
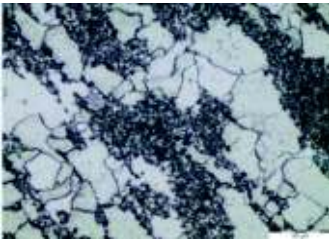
Continúa.

Continuación Tabla 3.17.

Zona de Análisis	Designación	Imagen	Observaciones
Zona Afectada por el calor en la tubería 500x	T-ZAC 500x		Acero enfriado rápidamente sin llegar a la austenización completa
Cordón de soldadura periférico 7018 100x	CS-7018 100x		Acero enfriado rápidamente Presencia de ferrita Widmanstatten
Cordón de soldadura periférico 7018 500x	CS-7018 500x		
Cordón de soldadura interno 6010 100x	CS-6010 100x		Acero templado Ferrita Widmanstatten
Cordon de soldadura interno 6010 500x	CS-6010 500x		

Continúa.

Continuación Tabla 3.17.

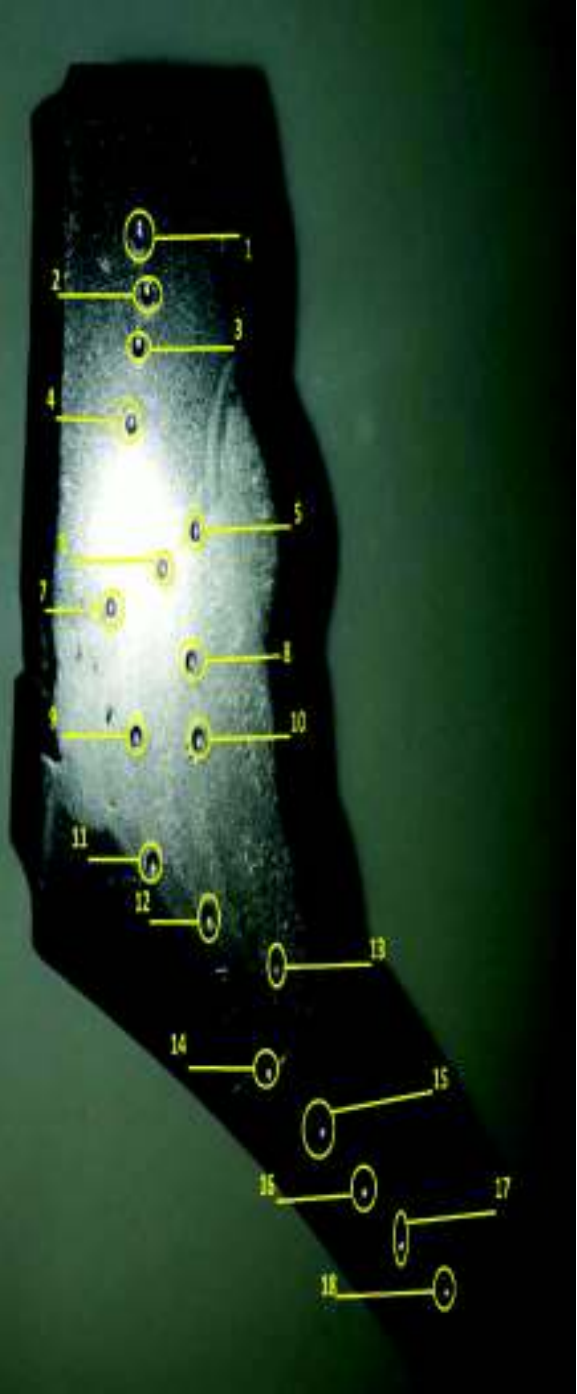
Zona de Análisis	Designación	Imagen	Observaciones
Zona afectada por el calor en el aditamento (Weldolet) 100x	ZAC-WELD 100x		Acero hipoeutectoide presenta desintegración de perlita
Zona afectada por el calor en el aditamento (Weldolet) 500x	ZAC-WELD 500x		
Aditamento soldable (Weldolet) 100x	WELD-A105 100x		Perlita y ferrita proeutectoide cuyo grano está orientado en dirección longitudinal
Aditamento soldable (Weldolet) 500x	WELD-A105 500x		

(Fuente: LMDF 2018).

3.1.6. Ensayo de dureza

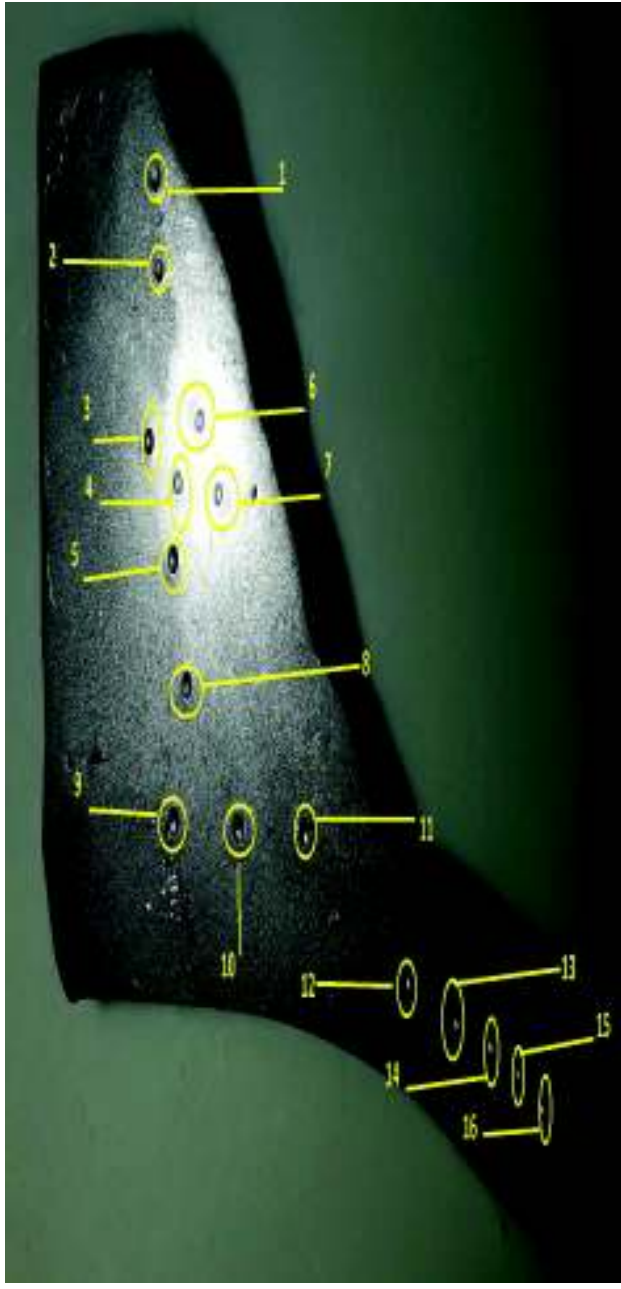
Se han tomado las durezas de 5 diferentes zonas de las juntas soldadas y los resultados del ensayo para el caso 1 se presenta en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Resultados del ensayo de dureza en la probeta del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).

Zona	Número de Medida	Dureza HRB	Imagen
Material Base del Aditamento Soldable (weldolet)	1	92	
	2	93	
	3	87	
	4	92	
Zona Afectada Por el Calor en el Aditamento (weldolet)	5	87	
	6	86	
	7	80	
Cordón De Soldadura	8	95	
	9	93	
	10	90	
Zona afectada por el Calor en la Tubería	11	91	
	12	89	
	13	95	
Tubería de Acero A-106 Grado B	14	85	
	15	81	
	16	75	
	17	71	
	18	72	
Promedio		86,33	

(Fuente: Propia).

Tabla 3.19.Resultados del ensayo de dureza en la probeta del caso 2 (Probeta obtenida con el procedimiento convencional).

Zona	Número de Medida	Dureza HRB	Imagen
Material Base del Aditamento Soldable (weldolet)	1	92	
	2	93	
Zona Afectada Por el Calor en el Aditamento (weldolet)	3	79	
	4	76	
	5	71	
Cordón De Soldadura	6	91	
	7	95	
	8	93	
Zona afectada por el Calor en la Tubería	9	88	
	10	85	
	11	86	
Tubería de Acero A-106 Grado B	12	76	
	13	68	
	14	70	
	15	67	
	16	66	
Promedio		81,00	

(Fuente: Propia).

3.1.7. Composición química del material base

Los resultados obtenidos acerca del ensayo de composición química del material base, tanto de la tubería de acero A 106 Gr B y del aditamento soldable (weldolet) A 105 STD se presentan en la Tabla 3.20 y en la Tabla 3.21 respectivamente.

Tabla 3.20. Composición química de la tubería de Acero A 106 Gr B.

Elemento		Valor en %
Silicio	Si	0,277
Hierro	Fe	99,14
Cobre	Cu	0,0027
Manganeso	Mn	0,382
Carbono	C	0,134
Cromo	Cr	0,02
Níquel	Ni	0,011
Cobalto	Co	0,005
Molibdeno	Mo	0,005
Fosforo	P	0,023
Vanadio	V	0,003
Aluminio	Al	0,002
Wolframio	W	0,002
Total		100

(Fuente: Propia).

Tabla 3.21. Composición química del aditamento soldable (weldolet).

Elemento		Valor en %
Carbono	C	0,173
Silicio	Si	0,201
Manganeso	Mn	0,901
Azufre	S	0,051
Cromo	Cr	0,04
Níquel	Ni	0,044
Cobre	Cu	0,045
Aluminio	Al	0,019
Hierro	Fe	98,56
Total		100

(Fuente: Propia).

3.2. Discusión de resultados

3.2.1. Defectos revelados por el líquido penetrante

Caso 1:

Para la probeta soldada con el procedimiento implementado, los resultados de los ensayos de líquidos penetrantes no revelan ninguna discontinuidad, por lo tanto, según la norma API 1104 sección 9 numeral 5, el presente procedimiento cumple satisfactoriamente con el estándar mencionado. (Anexo VI)

Caso 2:

Para la probeta soldada con el procedimiento estándar, los resultados de los líquidos penetrantes revelan porosidades inferiores a los 2 mm de longitud, no obstante, a este defecto se considera irrelevante, según la sección 9 de la norma API 1104, el presente procedimiento cumple con el estándar mencionado, según lo indica la Tabla 3.3. (Anexo VI)

3.2.2. Defectos encontrados por las partículas magnéticas

Los resultados obtenidos en el ensayo de partículas magnéticas no muestran ningún defecto y/o discontinuidad en ambos casos, corroborándose los resultados de las tintas penetrantes. En el caso 2, sí se encontraron porosidades. La norma API 1104 exige ejecutar ambos ensayos en cada probeta debido a que es necesario comparar los resultados obtenidos con el fin de garantizar el buen estado de la soldadura. No obstante, a pesar de los defectos encontrados la norma API 1104 sección 9 califica a dichas porosidades como defectos no relevantes.

3.2.3. Aceptación o rechazo en el ensayo de radiografía industrial

Caso 1:

La probeta realizada con el proceso de calentamiento continuo se acepta debido a que no presenta ninguna discontinuidad y cumple con los criterios de aceptación de la norma API 1104 sección 9. (Anexo IX).

Caso 2:

La probeta realizada con el procedimiento estándar se rechaza debido a que presenta inclusiones de escoria cuyas longitudes superan los 1.6 mm, por lo tanto, según la

sección 9.3.8.2 literal c de la norma API 1104, establece esta discontinuidad como un defecto no aceptable. (Anexo IX)

3.2.4. Comportamiento Metalúrgico

Analizar el comportamiento metalúrgico para el presente proyecto es de gran importancia debido a que gracias a esto se pueden determinar las fases existentes en cada una de las zonas descritas en la Tabla 3.12 para el caso 1 y Tabla 3.17 para el caso 2.

Caso 1 (Probeta sometida al precalentamiento continuo)

Se acepta debido a que resultados de las macrografías para este caso indican discontinuidades con una longitud máxima de 0,456 mm, razón por la cual la norma API 1104 sección 9 considera a esta discontinuidad irrelevante. Figura 3.3

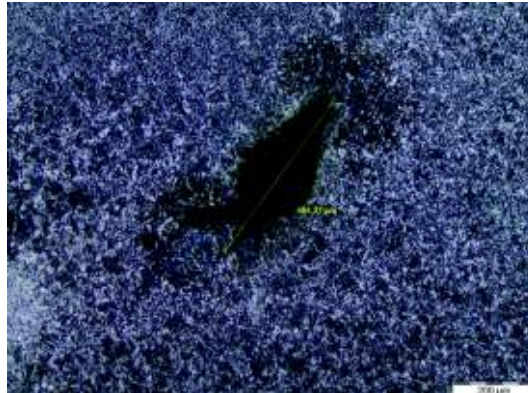


Figura 3.2. Discontinuidad presente en la probeta del caso 1 (Probeta realizada con el procedimiento de precalentamiento continuo).

(Fuente: Propia) .

Para el análisis micrográfico de la probeta del caso 1, se ha centrado en 6 zonas de la soldadura, las mismas que se puede ver en la Figura 3.4 y se las detalla en la Tabla 3.22. y corresponden a los resultados presentados en la Tabla 3.12.

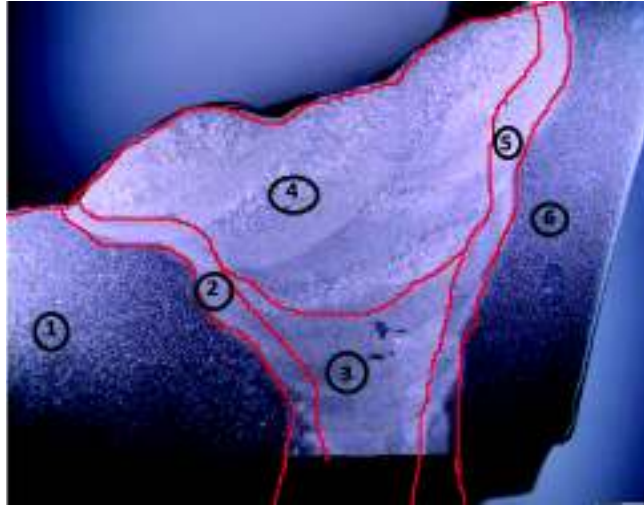


Figura 3.3. Zonas de análisis metalográfico caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).
(Fuente: Propia).

Tabla 3.22. Detalle de las zonas de análisis metalográfico caso 1.

Zona #	Designación	Especificación
1	WELD-A105	Aditamento soldable (Weldolet)
2	ZAC-WELD	Zona afectada por el calor en el aditamento (weldolet)
3	CS-6010	Primeros pases del cordón de soldadura (Electrodo E 6010)
4	CS-7018	Pases periféricos del cordón de soldadura (Electrodo E 7018)
5	T-ZAC	Zona afectada por el calor en la tubería
6	MAT-BAS	Tubería de acero A 106 Gr B

(Fuente: Propia).

Zona 1:

La estructura del material base del aditamento soldable (weldolet) obtenida se representa en la Figura 3.5b. El porcentaje de cada fase contenida y el tamaño de grano se puede visualizar en la Tabla 3.23.

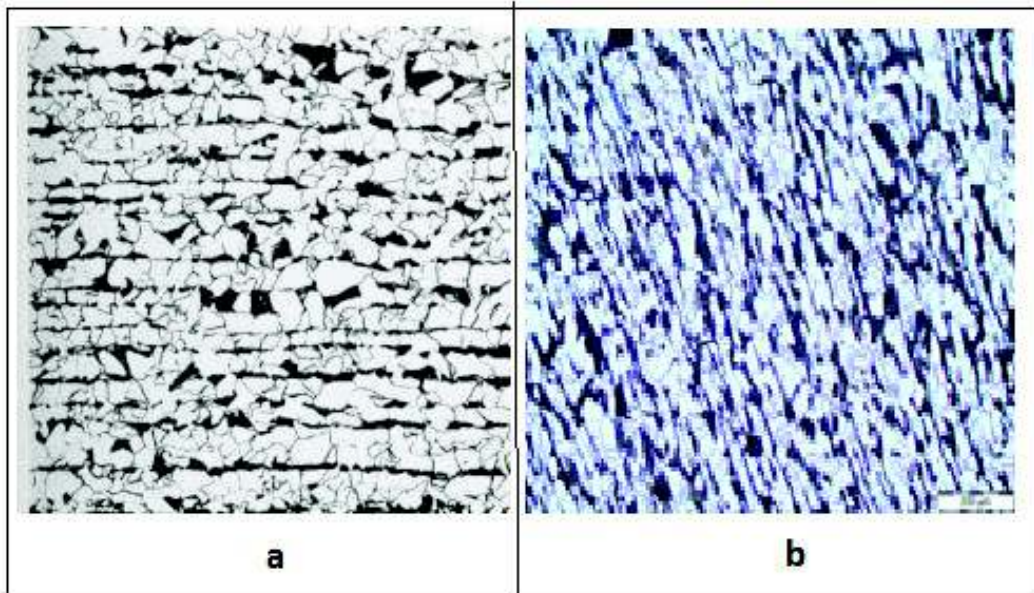


Figura 3.4. a) Micrografía mostrando la estructura típica de un acero hipoeutectoide laminado en caliente [27] b) Perlita y ferrita proeutectoide encontrada en la zona del aditamento soldable (weldolet) (zona 1).
(Fuente: Propia).

Tabla 3.23. Fases y tamaño de grano para la tubería de acero A 106 Gr B.

Designación	Tamaño de grano (No. ASTM)	% Fase	
		Perlita	Ferrita
WELD- A105	10	62	38

(Fuente: Propia).

El aditamento soldable (weldolet) A 105 STD presenta una microestructura con granos de perlita en las zonas oscuras y ferrita en las zonas claras, debido a la orientación del grano se puede decir que este elemento fue obtenido mediante un proceso de forja.

Zona 2:

La estructura metalográfica de la zona afectada por el calor en el aditamento soldable (weldolet) se la puede ver en la Figura 3.6b, el porcentaje de fase y el tamaño de grano se puede conocer mediante la Tabla 3.24.

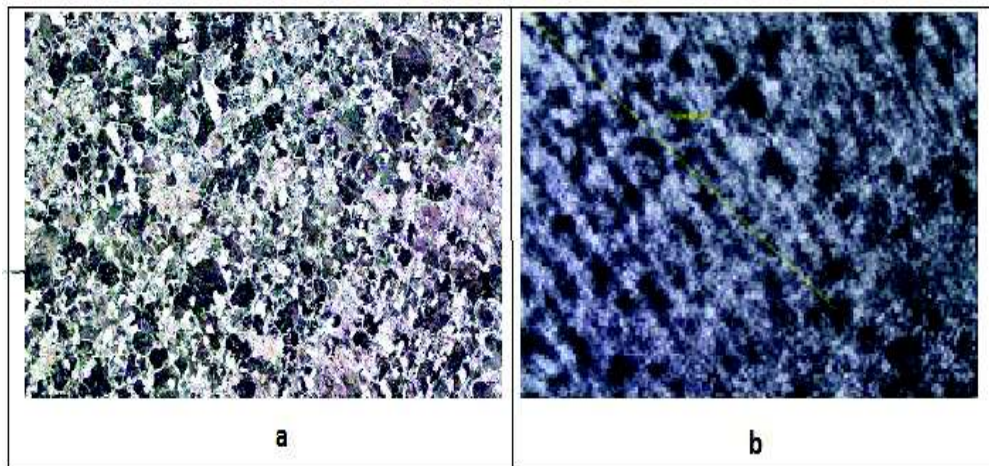


Figura 3.5. a) Micrografía mostrada de un acero hipoeutectoide recocido [27] b) Desintegración de perlita producida en la zona afectada por el calor en el aditamento soldable (weldolet) (Zona 2).
(Fuente: Propia).

Tabla 3.24 Fases y tamaño de grano de la zona afectada por el calor entre la tubería y el cordón de soldadura.

Designación	Tamaño de grano (No. ASTM)	% Fase	
		Perlita	Ferrita
ZAC-WELD	9	55	45

(Fuente: Propia).

Se exhibe una sección de estructuras del tipo ferrita Widmanstätten y granos bien definidos de perlita. En la Figura 3.6(b) se observa que al aplicar en el cordón un tratamiento térmico posterior, las fases presentes son del tipo ferrita, de perlita, con zonas claras y oscuras, respectivamente.

La desintegración de perlita que se observa se debe al proceso de soldadura multipase que está actuando como un tratamiento térmico de recocido con el electrodo E 6010 y posteriormente con el electrodo E 7018.

Esta estructura es característica de un acero hipoeutectoide que ha sufrido un enfriamiento lento, dicho enfriamiento lento es ocasionado por el precalentamiento continuo implementado en la empresa AUMAPROC S.A.

Zona 3:

Esta zona corresponde a la parte interna del cordón de soldadura realizado con el electrodo E 6010, la estructura metalográfica se la puede ver en la Figura 3.7 y sus propiedades metalográficas se las puede conocer mediante la Tabla 3.25

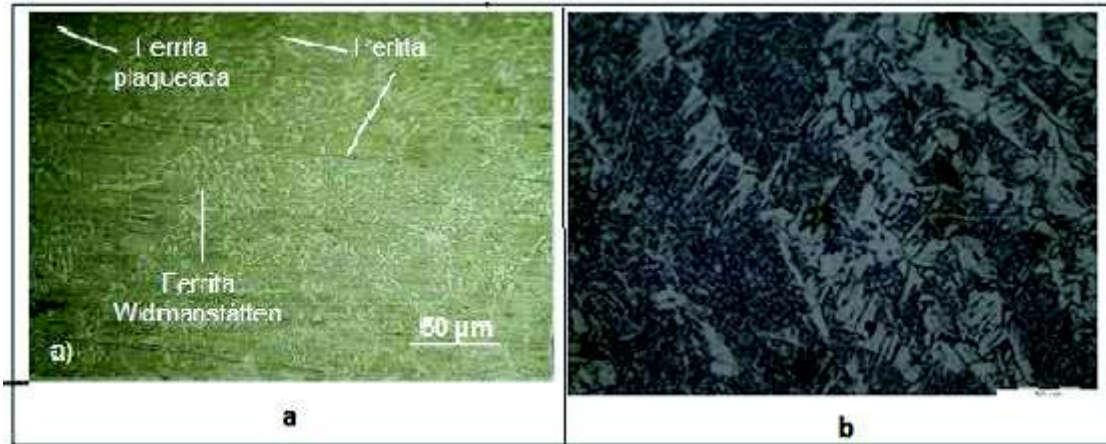


Figura 3.6. a) Micrografía típica del cordón de soldadura soldado con el electrodo E 6010 en acero hipoeutectoide,[24] b) Ferrita columnar presente en la zona interna del cordón de soldadura (Zona 3).
(Fuente: Propia).

Tabla 3.25.Fases y tamaño de grano para el cordón de soldadura periférico.

Designación	Tamaño de grano (No. ASTM)	% Fase	
		Perlita	Ferrita
CS-6010	10	55	45

(Fuente: Propia).

Se muestra un detalle de la intercara del cordón en zona afectada por el calor, donde se puede apreciar una variación morfológica local, la cual está compuesta por una sección de estructuras del tipo ferrita columnar y la perlita se encuentra en pequeñas cantidades.

Zona 4:

La presente zona corresponde a la parte periférica del cordón de soldadura, en donde se ha empleado al electrodo E 7018 como metal de aporte, su estructura metalográfica se la puede observar en la Figura 3.8b y sus principales características metalúrgicas se detallan en la Tabla 3.26.

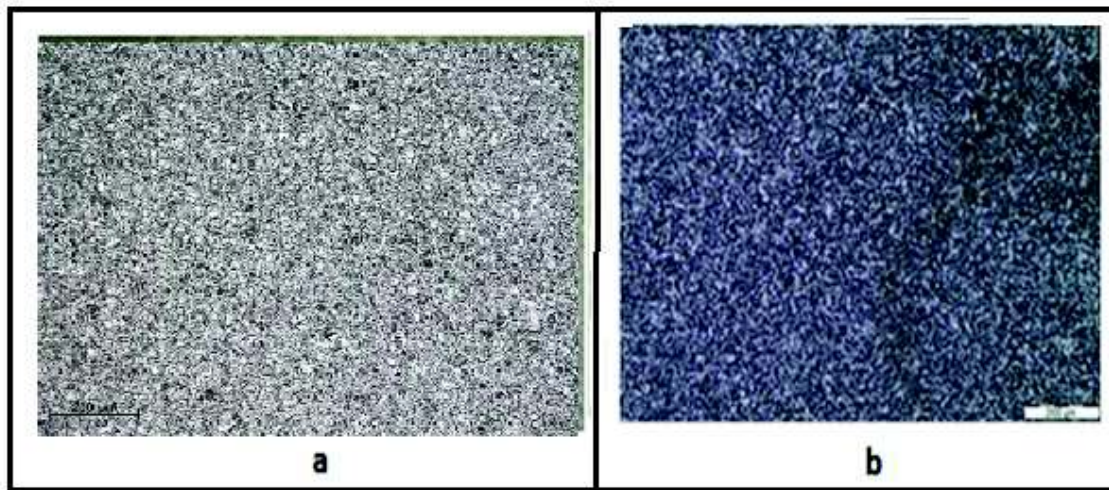


Figura 3.7. a) Micrografía típica del cordón de soldadura soldado con el electrodo E 7018 en un acero hipoeutectoide. b) Presencia de perlita intergranular en una matriz de ferrita columnnar, presente en la zona periférica del cordón de soldadura. (Zona 4).

(Fuente:

https://www.researchgate.net/publication/322799355_Soldadura_con_los_electrodos_revestidos_E_6010_y_E_7018_en_acero_AISI_1025).

Tabla 3.26. Fases y tamaño de grano del cordón de soldadura interior.

Designación	Tamaño de grano (No. ASTM)	% Fase	
		Perlita	Ferrita
CS-7018	9	65	35

(Fuente: Propia).

La zona fundida obtenida del depósito con el electrodo E 7018, se puede observar la presencia de perlita intergranular en color más oscuro sobre una matriz de ferrita columnar (representada por las zonas blancas).

Para el último cordón y por la influencia térmica que este ejerce sobre el metal depositado, que se convierte en un tratamiento térmico, se observa en la Figura 3.8(b) una transformación estructural compuesta por una pequeña cantidad de ferrita distribuida por la frontera de los granos y de pequeñas dimensiones.

Las variaciones, tanto del gradiente térmico como de la velocidad de solidificación local al desplazarse sobre la línea de fusión desde el lateral hacia la línea central del cordón, causan un cambio progresivo en la subestructura de solidificación al cruzar un cordón de soldadura. A las velocidades de soldadura normalmente utilizadas se ha observado

un gradual aumento de la naturaleza dendrítica al acercarse hacia la línea central del cordón (Susmel 2012).

Zona 5:

La presente zona corresponde a la zona afectada por el calor de la tubería de acero A 106 grado B su estructura metalográfica se puede observar en la Figura 3.9b y sus propiedades se dan a conocer en la Tabla 3.27.

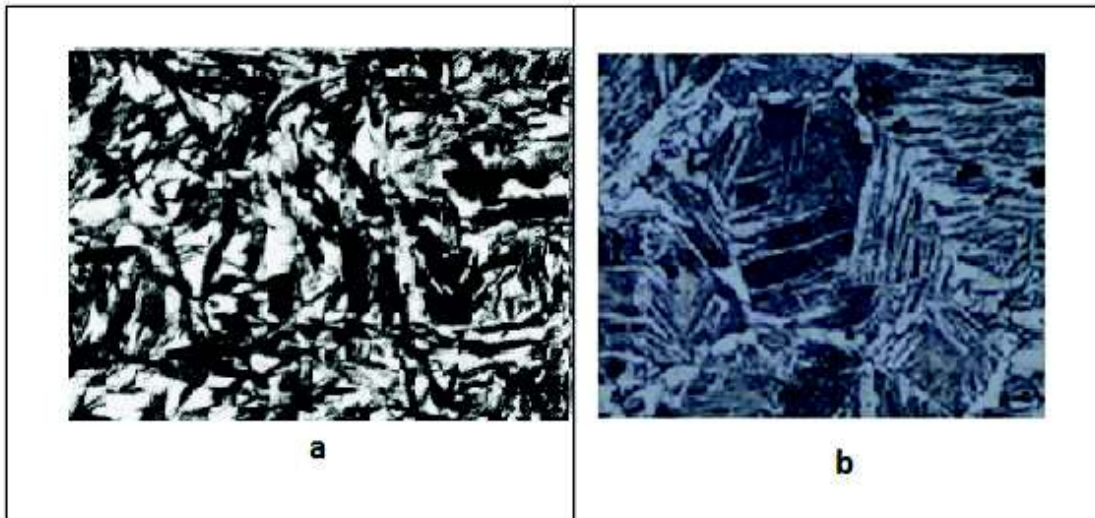


Figura 3.8. a) Micrografía típica de un acero hipoeutectoide enfriado rápidamente. [27] b) Acero templado se observa ferrita widmanstatten en la zona afectada por el calor de la tubería de acero A 106 grado B (Zona 5).
(Fuente: Propia).

Tabla 3.27. Fases y tamaño de grano de la zona afectada por el calor en el aditamento soldable (weldolet).

Designación	Tamaño de grano (No. ASTM)	% Fase	
		Perlita	Ferrita
T-ZAC	11.41	40.33	59.67

(Fuente: Propia).

Se trata de un acero de bajo contenido de carbono, su enfriamiento es rápido debido al contacto con el agua que se encuentra en el interior de la tubería. Este rápido enfriamiento no permite que se separe la ferrita proeutectoide ni que se produzca la reacción eutectoide, ya que ambas necesitan procesos de nucleación y crecimiento que no se producen durante el temple. Zona 6:

La presente zona de estudio se refiere a la estructura metalográfica encontrada en la tubería de acero A 106 grado B que se puede visualizar en la Figura 3.10b y también se pueden conocer sus propiedades metalúrgicas mediante la Tabla 3.28.

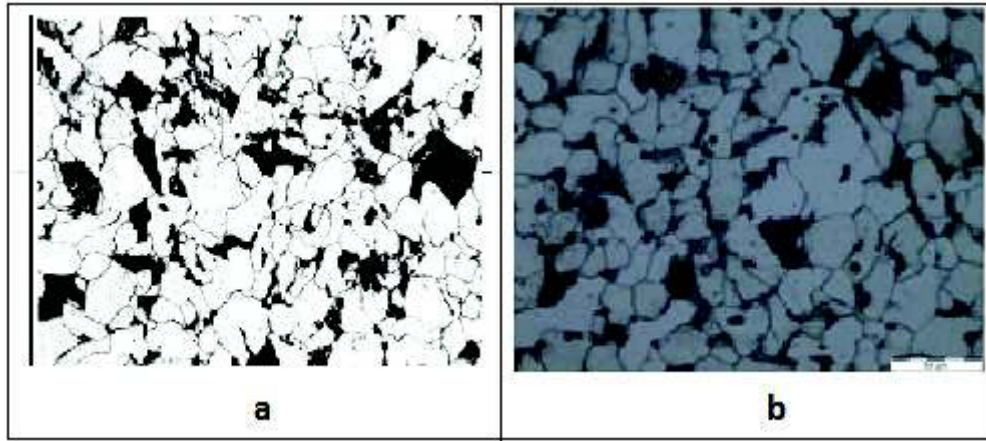


Figura 3.9. a) Metalografía típica de un acero de bajo contenido de carbono $< 0.8\%C$ b) Perlita fina laminar en matriz ferrítica presente en la tubería de acero A 106 grado B (Zona 6).
(Fuente: Propia).

Tabla 3.28. Fases y tamaño de grano del aditamento soldable (weldolet).

Designación	Tamaño de grano (No. ASTM)	% Fase	
		Perlita	Ferrita
MAT-BAS	10	38	62

(Fuente: Propia).

Caso 2 (Probeta soldada con el procedimiento convencional)

En el presente caso se ha encontrado con una discontinuidad ocasionada por la falta de penetración que ha ocurrido durante el proceso de soldadura, lo cual indica un incumplimiento al criterio de aceptación de la sección 9.3.1 de la norma API 1104, además la longitud de dicha discontinuidad es aproximadamente 1,8 mm lo cual supera el límite permitido por la sección 9.3.8.1 literal c de la norma antes mencionada, por lo tanto, se debe recalcar que la probeta del caso 2 (procedimiento convencional), no acredita su validez de acuerdo a los criterios de aceptación de la norma API 1104



Figura 3.10. Discontinuidad presente en la probeta del caso 2 (probeta con procedimiento estándar).
(Fuente: Propia).

Para el presente caso se han analizado 6 zonas con igual designación que la del caso 1, con el propósito de comparar los respectivos resultados metalográficos, en la Figura 3.12. se puede conocer dichas zonas de estudio, las mismas que están homologadas con las zonas correspondientes del caso detalladas en la Tabla 3.17.



Figura 3.11. Zonas de análisis metalográfico caso 2 (Probeta con procedimiento convencional).
(Fuente: Propia).

Tabla 3.29. Detalle de las zonas de análisis metalográfico de la probeta del caso 2.

Zona #	Designación	Especificación
1	WELD-A105	Aditamento soldable (Weldolet)
2	ZAC-WELD	Zona afectada por el calor en el aditamento (weldolet)
3	CS-6010	Primeros pases del cordón de soldadura (Electrodo E 6010)
4	CS-7018	Pases periféricos del cordón de soldadura (Electrodo E 7018)
5	T-ZAC	Zona afectada por el calor en la tubería
6	MAT-BAS	Tubería de acero A 106 Gr B

(Fuente: Propia)

Al observar las diferentes estructuras metalográficas encontradas en la Tabla 3.12 correspondiente al caso 1 y la Tabla 3.17 correspondiente al caso 2 se han encontrado grandes similitudes en cada zona respectivamente, pero existe un caso en particular donde ha cambiado la estructura metalográfica, alterando sus propiedades metalúrgicas. Así se tiene que en el material base constituido por la tubería de acero A 106 Gr B zona (zona # 6) ha sufrido dicho cambio. La metalografía encontrada en la tubería de acero A 106 Gr B se la puede observar en la Figura 3.13.b y sus propiedades se las puede conocer a través de la Tabla 3.30.

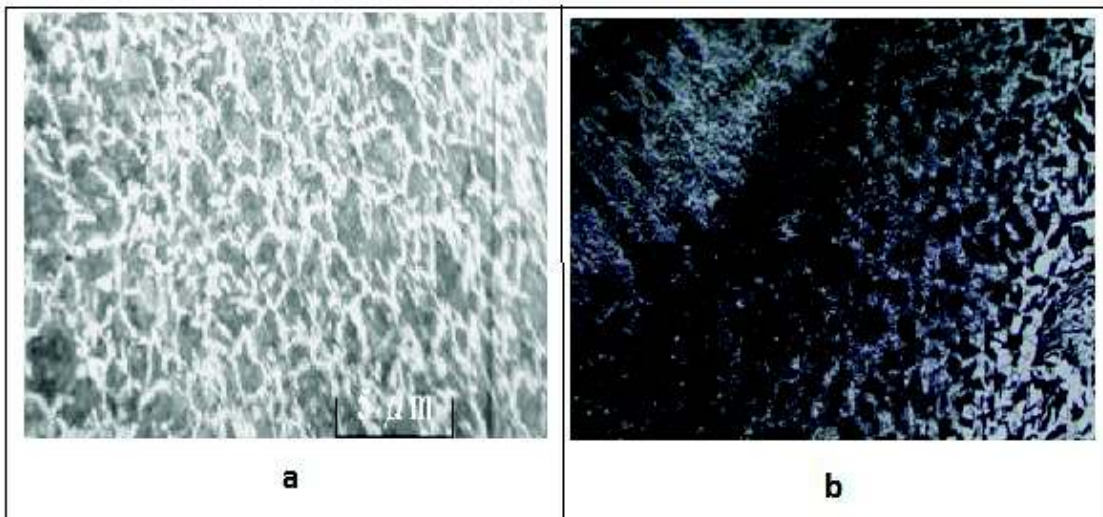


Figura 3.12. a) Metalografía típica de la tubería de acero de bajo contenido de carbono con recocido [27] b) Desintegración de perlita presente en la tubería de acero A 106 grado B (Zona 6).
(Fuente: Propia).

Tabla 3.30. Fases y tamaño de grano de la tubería de acero A 106 Gr B.

Designación	Tamaño de grano (No. ASTM)	% Fase	
		Perlita	Ferrita
MAT-BAS	12	30	70

(Fuente: Propia).

Esta zona ha sufrido un tratamiento térmico de recocido, debido a los cambios térmicos sucedidos en el momento de la soldadura multipase. Como consecuencia de un mayor subenfriamiento en el normalizado se ven favorecidos los procesos de nucleación frente a los de crecimiento durante la transformación perlítica, obteniéndose láminas muy finas y alternas de ferrita que apenas se distinguen en las micrografías.

3.2.5. Ensayo de dureza

Para estudiar el comportamiento de la dureza en las juntas soldadas, se ha dividido en 5 zonas de estudio detalladas en la Tabla 3.18, dichos valores se han promediado y se los ha ubicado a una distancia específica referente a cada zona como se puede ver en la Tabla 3.31 que son referentes a los resultados de las durezas obtenidas en diferentes zonas detalladas en la Tabla 3.18 para el caso 1 y la Tabla 3.19 para el caso 2.

Tabla 3.31. Durezas presentes en la junta soldada.

Zona	Distancia (mm)	Dureza HRB Caso 1	Dureza HRB Caso 2
Material base del aditamento soldable (Weldolet)	5	91	92,5
Zona Afectada por el Calor en el aditamento soldable(weldolet)	15	84,33	81,33
Cordón de soldadura	22,8	92,67	93
Zona Afectada por el Calor en la tubería	27,5	91,67	87,33
Tubería de acero A 106 grado B	35	76,8	69,4

(Fuente: Propia).

El comportamiento de las durezas para ambos casos a lo largo de las juntas soldadas se lo puede visualizar en la Figura 3.14 donde se nota la variación de la misma debido a fenómenos térmicos evidenciados mediante las respectivas metalografías de la Tabla 3.12 para el caso 1 y la Tabla 3.17 para el caso 2.

Caso 1:

El aditamento soldable (weldolet), el cual presenta una dureza promedio de 91 HRB, dureza que es característica del acero hipoeutectoide laminado en caliente como se puede evidenciar en la Figura 3.5. La dureza en la zona afectada por el calor del aditamento soldable (weldolet) sufre una disminución hasta un valor promedio de 84.33 HRB debido a un proceso de recocido ocasionado por el calor entrante proveniente del proceso de soldadura multipase y un posterior enfriamiento consecutivo y controlado, lo que ha generado la formación de ferrita Widmanstätten y granos de perlita bien definidos como lo indica la Figura 3.6. La zona correspondiente al cordón de soldadura tiene una dureza promedio de 92.67 HRB, esta zona ha sufrido un proceso de temple ocasionado por el calor entrante proveniente del electrodo durante el proceso de soldadura y un posterior enfriamiento a temperatura ambiente, esto a su vez a dado lugar a la formación de ferrita columnar como lo indican las Figuras 3.7 y 3.8 respectivamente.

La zona afectada por el calor en la tubería tiene una dureza promedio de 91.67 HRB, dureza que se ha conseguido mediante un proceso de enfriamiento rápido, propio de la soldadura, donde se ha generado la formación de perlita en matriz de ferrita tipo Widmanstätten (Figura 3.9). El material base de la tubería de acero A 106 grado B posee una dureza promedio de 76.8 HRB con fase ferrítica y presencia de perlita fina de tipo laminar.

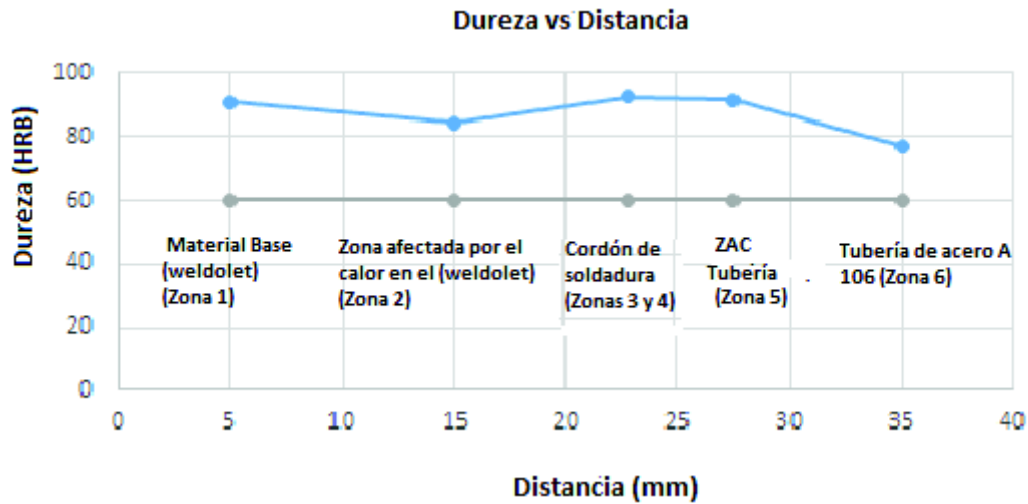


Figura 3.13. Resultados de las durezas obtenidas en diferentes zonas para la probeta del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).
(Fuente: Propia).

Caso 2:

Al observar los datos obtenidos respecto a las durezas en cada zona respectivamente, se ha notado concordancia en los valores tanto para el caso 1 como en el caso 2, excepto para el valor de la dureza obtenida en la zona 6 correspondiente a la tubería de acero A 106 grado B, la cual, para el caso 2 desciende notablemente hasta el valor de 69.4 HRB, esto se debe al enfriamiento sufrido a temperatura ambiente generando un tratamiento térmico de recocido, lo cual se evidencia en la metalografía de la zona 6 del caso 2 mostrada en la Figura 3.13. En esta imagen se denota una disminución en el valor de la dureza, generada por la velocidad de enfriamiento en el momento del recocido, generado por el proceso de soldadura multipase realizado.

La Figura 3.15 relaciona el comportamiento de la dureza para el caso 1 y caso 2 respectivamente a lo largo de la junta soldada, en la cual se puede notar concordancia con sus valores y cuyo patrón de durezas es el mismo en ambos casos. Se puede observar el efecto del tratamiento térmico que ejerce el pase de relleno sobre la raíz y entre pase; esto origina un acomodamiento columnar típico de la solidificación del metal. Ha sido planteado por Burgos y García (2003) que el tipo de proceso, las variables de proceso utilizadas y las características térmicas del metal base controlan el valor del gradiente térmico crítico; mientras que la velocidad de crecimiento del cristal es controlada por la velocidad de soldadura y la dirección de crecimiento relativa a la dirección de soldadura, parámetros que definen la geometría del cordón. (Figura 3.13)

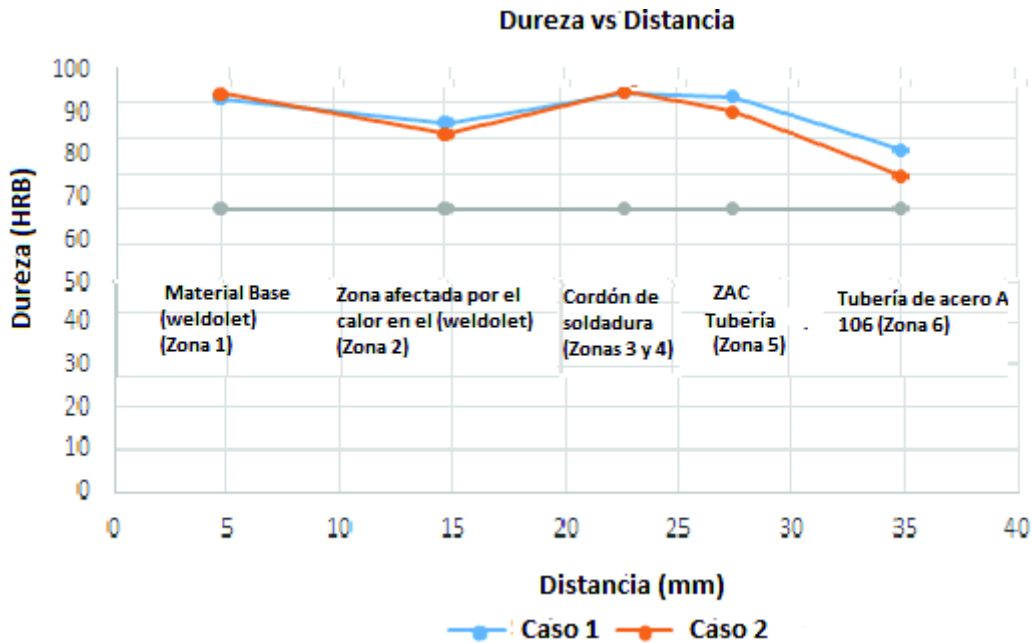


Figura 3.14. Resultados de las durezas obtenidas en diferentes zonas para la probeta del caso 1 y caso 2. (Fuente: Propia).

3.2.6. Composición química, carbono equivalente y soldabilidad

Al comparar los resultados entre la Tabla 3.20 referente al análisis de composición química emitido por el laboratorio de fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, y la Tabla 1.5 de la composición química de la ASTM para la designación de aceros se puede ratificar que el metal base de la tubería es un acero al carbono A 106 grado B según lo estipula la ASTM.

El carbono equivalente para la presente tubería es de 0,204 y un porcentaje de carbono de 0,134% lo cual mediante el diagrama de Graville indica que este material se encuentra en la zona de aceros tradicionales (zona II), por lo cual el proceso de soldadura debe ser cuidadoso y con temperaturas de precalentamiento superiores a 150°C para disminuir el riesgo de fisuras.

El aditamento soldable (weldolet) posee un carbono equivalente de 0,337% y un porcentaje de carbono de 0,173%, por lo tanto, al usar el diagrama de Graville indica que este material recae en la zona de aceros tradicionales (Zona II) al igual que la tubería de Acero A 106 Gr B, por lo tanto, estos dos elementos a soldarse deben ser sometidos a las mismas condiciones de precalentamiento.

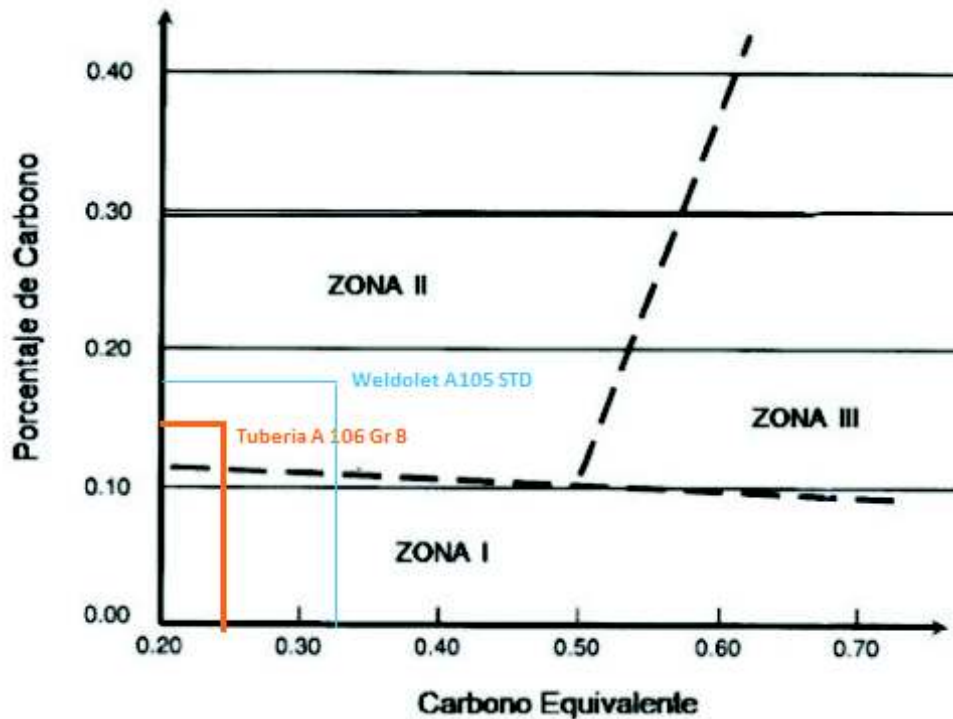


Figura 3.15. Diagrama de Graville para identificar la zona de soldabilidad del conjunto soldado. (Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/820992207043395174/>).

3.2.7. Caracterización de la soldadura

La caracterización de las juntas soldadas se las ha realizado en base a la norma ASME B31.3 para soldadura en filete de juntas en T para procesos de soldadura en tuberías, ésta norma exige tomar la respectiva medición del tamaño del cordón, concavidades y convexidades, valores de garganta efectiva, estos parámetros son fundamentales debido a que una excesiva concavidad o convexidad van a generar concentradores de tensión.

La norma ASME B31.3 establece la relación entre el espesor de la tubería t la longitud de pierna de la soldadura como lo indica la ecuación 3.6, además ambas piernas deben tener longitudes aproximadas con un error máximo del 30% entre sí.

$$cx = 1.09 Tw \quad (3.6)$$

Donde:

Cx: es la longitud mínima de la pierna de la soldadura

Tw: representa el espesor de la tubería.

La norma ASME B31.3 establece que el valor máximo permitido para la convexidad y concavidad del cordón de soldadura no debe exceder el 20% del valor de su garganta efectiva,

Caso 1 (Probeta realizada con el procedimiento de precalentamiento continuo)

La Figura 3.17 representa al cordón de soldadura en la probeta del caso 1 en la cual se puede observar que la pierna en la tubería tiene una longitud de 12 mm y la longitud de la pierna en el aditamento (weldolet) es de 1.8 mm, este cordón de soldadura presenta una convexidad máxima de 1.2 mm y su garganta efectiva tiene un valor de 9.7mm y se la puede ver en la Figura 3.18

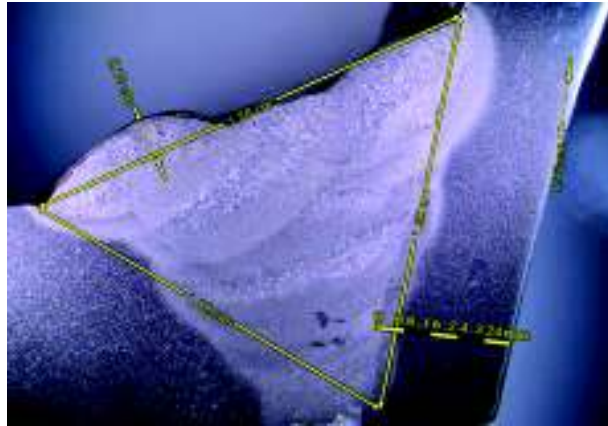


Figura 3.16. Dimensiones principales del cordón de soldadura (Longitud de pierna, convexidad y altura del cordón)
(Fuente: Propia)

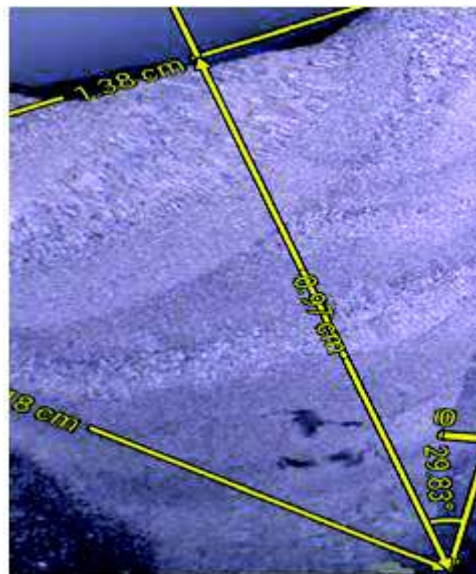


Figura 3.17. Garganta efectiva.
(Fuente: Propia).

Caso 2 (Probeta realizada con el procedimiento estándar)

La Figura 3.19 representa al cordón de soldadura en la probeta del caso 2 en la cual se puede observar que la pierna entre el cordón y la tubería tiene una longitud de 17.4 mm, la longitud de la pierna entre el cordón y el aditamento (weldolet) es de 14,6 mm,

presenta una concavidad máxima de 1,6 mm y su garganta efectiva tiene un valor de 12.4mm como se puede ver en la Figura 3.20.

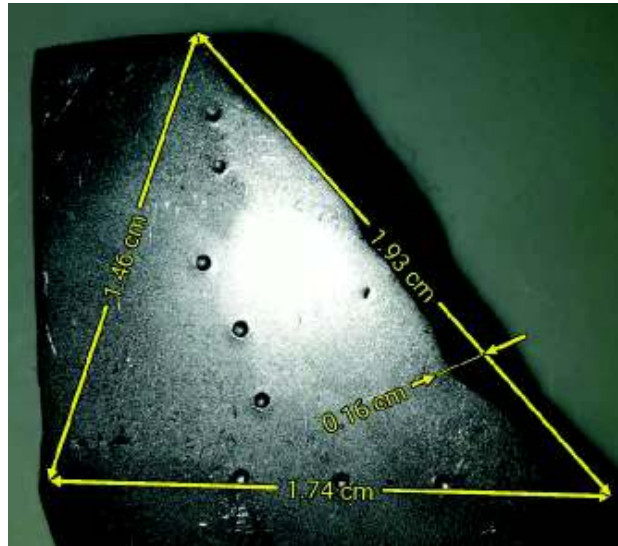


Figura 3.18. Dimensiones principales del cordón de soldadura (Longitud de pierna, convexidad y altura del cordón).
(Fuente: Propia).

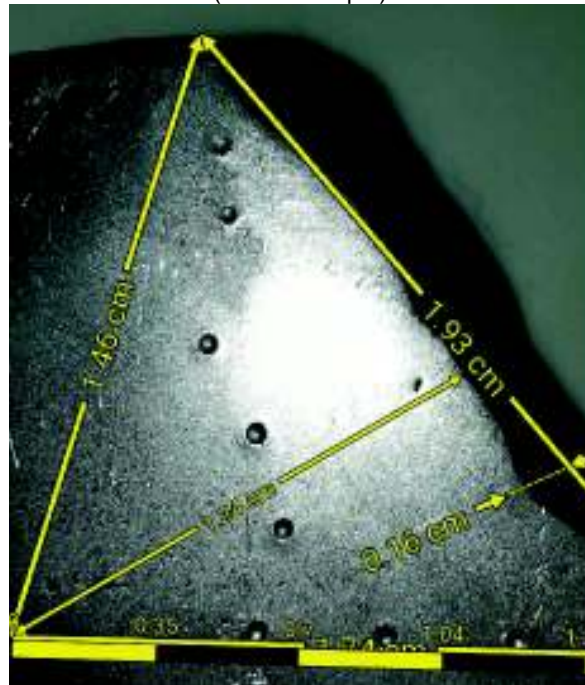


Figura 3.19. Garganta efectiva.
(Fuente: Propia).

En base a las longitudes del tamaño de pierna, concavidad, convexidad y garganta efectiva analizadas, se puede decir que las dimensiones del cordón de soldadura de la probeta del caso 1 y del caso 2 cumplen con las exigencias acerca de la inspección visual de la norma ASME B31.3.

3.2.8. Parámetros de Influencia del proceso de pegado en caliente (Hot Tapping)

Se ha demostrado que la probeta del caso 1 (probeta con precalentamiento continuo) cumple completamente con las exigencias de la norma API 1104 y con el código ASME IX, debido al nivel superior de exigencia de la segunda, el proceso implementado es aplicable a las especificaciones de ambos estándares según lo exija la empresa contratante. Este óptimo resultado se ha logrado conseguir en base a las especificaciones de los siguientes parámetros para el proceso de soldadura.

Selección del soldador. La persona quien va a realizar el procedimiento debe estar estrictamente calificado según exigencias del código ASME IX, esta calificación es necesaria para garantizar óptimos resultados en futuros trabajos en donde se emplee el código mencionado y la norma API 1104.

Selección del aditamento soldable (weldolet). El aditamento seleccionado en base al criterio del número P 1 y grupo 1 especificado en el código ASME IX indica que, para el presente caso, se debe seleccionar un aditamento (weldolet) A105 estándar (STD) debido a que la tubería tiene una cedula estándar (4 mm de espesor). Este criterio se lo ha corroborado mediante el diagrama de Graville y es válido también para la selección del aditamento según la norma API 1104.

Selección del material de aporte. La norma API 1104 establece que el diámetro del electrodo no debe ser superior al espesor del material base, por lo tanto, el electrodo máximo permitido para el presente caso debe tener un diámetro máximo de 3.175 mm (1/8 de pulgada), se selecciona un electrodo de 2.4 mm (3/32 de pulgada) para evitar problemas de quemaduras en la soldadura.

Las dos primeras pasadas se las realiza con el electrodo E 6010, debido a que éste brinda mejor penetración, y los siguientes pases se efectúa empleando el electrodo E 7018 previamente precalentado hasta los 130°C para eliminar la humedad presente en los mismos.

Características eléctricas. Esta variable tiene relación directa con el espesor de la tubería, La norma API 1104 establece que para una tubería con cedula estándar en el primer pase se debe utilizar un amperaje que esté dentro del rango de 80A a 120 A. La segunda pasada deberá lograr la coalescencia entre el metal base y el pase anterior, por lo tanto, el amperaje también deberá ser mayor y va estar dentro del rango de 90A a 130A. Los posteriores pases la corriente debe tener valores entre 100 A a 140 A.

La norma API 1104 establece que al emplear electrodos de alta celulosa como es el caso del E 6010 se debe utilizar corriente continua con polaridad directa (DC+) para obtener mejor rendimiento, estabilidad en el arco y obtener transferencia de gota suave. El amperaje es el responsable de la entrada de calor, por lo tanto, es también el responsable directo de la variación de temperatura que dan lugar a cambios micro estructurales afectando de esta manera las propiedades mecánicas de la soldadura.

El voltaje para los dos primeros pases debe estar comprendido en el rango de 25 a 30 voltios y para los siguientes entre valores de 20 a 25 voltios esto permite obtener un ancho homogéneo y adecuado para cada pase.

Temperatura de precalentamiento y entre pasadas. El precalentamiento es un requisito primordial para obtener resultados óptimos en la soldadura, La norma API 1104 recomienda elevar la temperatura de precalentamiento y entre pasadas hasta 130°C pero para el presente caso, fue necesario elevar la temperatura hasta los 150°C, tomando en cuenta que se trata de un proceso en operación, es decir, durante el proceso de soldadura, en el interior de la tubería se encuentra agua a temperatura ambiente, esto ha permitido ejecutar la soldadura dentro de la región ferrítica perlítica y conservar las propiedades metalúrgicas del material base.

Precalentamiento continuo. El comportamiento térmico del material base registrado en la Tabla 3.1 indica que durante todo el proceso de soldadura se registraron temperaturas entre los 250°C y los 423°C, la velocidad de enfriamiento debe ser lenta a fin de favorecer la velocidad de nucleación y recuperación de las propiedades metalúrgicas (Figura 3.1).

3.2.9. Validación del proceso de soldadura con precalentamiento continuo

Caso 1:

Para validar el proceso del caso 1 (proceso con precalentamiento continuo), es necesario evaluar la probeta obtenida en base a las normativas utilizadas en el presente proyecto. La norma API 1104 exige ensayos sustentados en normas ASTM E 165 para el ensayo de líquidos penetrantes, la norma ASTM E 709 para las partículas magnéticas no destructivos, el ensayo de dureza y metalográfico se lo ha realizado en base a la norma ASTM E 112 y la caracterización de la soldadura se lo ha hecho en base a criterios del código la norma ASME B 31.3 referentes al cordón de soldadura de la junta en T realizada. La Tabla 3.32 indica la validación del proceso de soldadura en base a

los ensayos realizados y posteriormente calificados con la norma API 1104 y el código ASME IX.

Los resultados obtenidos en el caso 1 se pueden visualizar en la Tabla 3.32 y 3.33.

Tabla 3.32. Hoja de validación para el proceso de soldadura del caso 1 (Probeta con precalentamiento continuo).

Ensayo	Norma Aplicada	Norma API 1104		Código ASME IX	
		Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple
Líquidos penetrantes	ASTM E 165	X		X	
Partículas magnéticas	ASTM E 709	X		X	
Ensayo Radiográfico	ASTM E94	X		X	

(Fuente: Propia).

Tabla 3.33. Ensayos adicionales para el caso 1 (procedimiento con precalentamiento continuo).

Ensayo	Norma Aplicada	Cumple	No cumple
Ensayo de dureza	ASTM E 18-16	x	
Composición Química	ASTM A 106	x	
Inspección visual de la soldadura	ASME B 31.3	x	

(Fuente: Propia).

Caso 2:

El proceso de validación del caso 2 se rige a las mismas condiciones del caso 1, para el presente caso se han realizado ensayos contemplados en la norma API 1104 y se han utilizado criterios de aceptación de dicha norma, así como criterios del código ASMEIX, con el propósito de garantizar su validez. El ensayo de la dureza, inspección visual y el ensayo metalográfico no se exige el código ASME IX ni en la norma API 1104, pero estos ensayos resultan de gran importancia para el presente estudio.

Los resultados de la validación del proceso de soldadura del caso 2 se pueden ver en la Tabla 3.34 y 3.35 respectivamente.

Tabla 3.34. Hoja de validación del proceso de soldadura caso 2 (Probeta con procedimiento convencional).

Ensayo	Norma Aplicada	Norma API 1104		Código ASME IX	
		Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple
Líquidos penetrantes	ASTM E 165	X		X	
Partículas magnéticas	ASTM E 709	X		X	
Ensayo Radiográfico	ASTM E94		X		X

(Fuente: Propia).

Tabla 3.35. Ensayos adicionales para el caso 2 (procedimiento convencional).

Ensayo	Cumple	No cumple
Ensayo de dureza	x	
Composición Química	x	
Inspección visual de la soldadura	x	

(Fuente: Propia).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

En el presente trabajo se ha logrado cumplir con los objetivos específicos previamente planteados, los mismos que son: Caracterizar la soldadura efectuada en probetas de acero A 106 grado B para el proceso de pegado en caliente (Hot Tapping), determinar los parámetros adecuados para la correcta ejecución del proceso de pegado en caliente (Hot Tapping) en una tubería de acero A106 Grado B. y establecer las propiedades micro estructurales de la soldadura y la zona afectada por el calor.

El precalentamiento continuo es un parámetro vital para el presente proceso de soldadura, en el cual ha elevado inicialmente la temperatura hasta los 200°C, y se la ha mantenido por encima de este valor durante todo el proceso, esto ha permitido obtener una soldadura libre de grietas y fisuras.

La velocidad de enfriamiento ha tardado alrededor de 60 minutos, tiempo en el cual la velocidad de nucleación ha sido lenta y se ha conseguido mantener la microestructura de ambos metales base para el caso 1.

Las características eléctricas del proceso de soldadura se han regido a la norma API 1104, así se tiene que el amperaje utilizado está entre 80 y 140 A acompañado de polaridad directa para obtener un cordón ancho cuya penetración sea limitada y no afecte a la pared de la tubería.

El criterio para seleccionar el aditamento soldable (weldolet) en base al grupo y el número P (P number) queda ratificado como válido según lo corrobora el diagrama de Graville en el cual se indica que la tubería de acero A 106 grado B y el aditamento soldable (weldolet) se encuentran en la zona de aceros con soldabilidad limitada (zona II), en donde, se puede decir que el precalentamiento es necesario para este caso.

No se ha encontrado ningún defecto relevante que incurra en contra de los criterios de aceptación de la Norma API 1104 en lo concerniente a los resultados de líquidos penetrantes y de partículas magnéticas para ambos casos.

Se ha logrado cumplir con los criterios de aceptación de la norma API 1104 y con el código ASME IX en lo referente al ensayo radiográfico para la probeta del caso 1 (procedimiento con precalentamiento continuo), no obstante, para el caso 2 no se ha logrado obtener resultados favorables debido a que se han encontrado inclusiones de escoria con longitudes superiores a 1.6mm y falta de fusión en la tubería de acero A 106

grado B, razón por la cual la probeta del caso 2 no cumple con los criterios de aceptación de ambos estándares antes mencionados.

La microestructura de la tubería de acero A 106 grado B y del aditamento (weldolet) presentan presencia de perlita en matriz ferrítica, lo cual es característico de un acero hipoeutectoide, dicha microestructura se ve afectada por el cambio térmico con anchos de banda que se aproximan a 1.8 mm lo cual es deseable tomando en cuenta que el espesor de la tubería es de 4 mm, estos cambios térmicos han generado la formación de ferrita widmanstatten la cual es de naturaleza frágil y no deseable para esta zona, sin embargo la dureza no se ve afectada considerablemente por este fenómeno.

La dureza de la tubería de acero A 106 grado B disminuye notablemente en la probeta del caso 2 con relación a la probeta del caso 1, debido a la afectación del calor en la misma y se ha producido desintegración de perlita, este efecto se atribuye a la alta velocidad de enfriamiento.

4.2. Recomendaciones

Es recomendable utilizar el electrodo E 6010 y el E7018 de 3/32 de pulgada de diámetro, se puede usar el de 1/8 de pulgada, pero con este electrodo existe más probabilidad de que se produzca un quemón (Burn Through) durante el proceso de soldadura en especial en las primeras pasadas, lo óptimo según los técnicos de AUMAPROC S.A. es utilizar en las primeras pasadas electrodos con diámetro menor y para la últimas pasadas utilizar electrodos de diámetro mayor, tomando en cuenta que el diámetro del electrodo no debe ser mayor a la dimensión del espesor de la tubería.

Para seleccionar el aditamento soldable la norma ASME IX se basa en el criterio de materiales cuyo grupo y P number coinciden, por lo tanto, para el presente trabajo se ha usado dicho criterio, cabe recalcar que, si la tubería es estándar, el aditamento también debe ser estándar y si la tubería es de cedula 80 el aditamento también debe ser de cedula 80, usar un aditamento incorrecto puede generar problemas de coalescencia en la unión soldada

Se recomienda de manera estricta precalentar el metal base hasta una temperatura de 200°C, mantener esta temperatura con un precalentamiento continuo, es decir para un proceso de soldadura en operación de una tubería de acero A106 Gr B de cualquier dimensión por cuyo interior circula cierto fluido a bajas temperaturas, es necesario someter al precalentamiento con mechero de GLP antes durante y después del procedimiento de soldadura, con el propósito de controlar la estabilidad de la

temperatura y la velocidad de enfriamiento, además, esto servirá para eliminar la humedad del metal base y evitar porosidades durante el proceso de soldadura.

Se debe realizar el ensayo de líquidos penetrantes y de partículas magnéticas necesariamente, si bien es cierto estos dos ensayos pueden detectar los mismos tipos de defectos superficiales, no necesariamente ambos van a arrojar los mismos resultados, por lo tanto, es importante seguir los parámetros de las normas ASTM E 165 y ASTM E 709 respectivamente y utilizar los criterios de aceptación de la norma API 1104 sección 9.

En el corte de probetas para el ensayo metalográfico es necesario utilizar el disco de corte marca multivaukee de endurece, debido a que este disco permite absorber todo el calor producido por el proceso de corte, dejando a la probeta libre de cualquier cambio micro estructural por variaciones térmicas, no se debe utilizar discos abrasivos de corte a menos que se tenga una refrigeración adecuada que sustituya la labor del disco de corte mencionado. El corte longitudinal se lo debe practicar con total confianza debido a que la tubería de acero A 106 Gr B tiende a abrirse seguido la costura longitudinal de corte.

Se recomienda realizar el análisis de composición química de la tubería de acero A106 grado B así como del aditamento soldable (weldolet) que se pretende utilizar con el propósito de obtener información acerca del carbono y del carbono equivalente de ambos materiales y poder definir de una manera más idónea la soldabilidad del conjunto y posteriormente elegir una temperatura de precalentamiento adecuada.

Se debe necesariamente desbastar las probetas para el análisis de composición químico hasta dejar al menos una superficie completamente plana ya que esta característica geométrica es de vital importancia para realizar el proceso, además se debe dar una limpieza superficial previa al análisis con un disco de desbaste de zirconio, debido a que en desbastes anteriores se pueden quedar impurezas en la superficie y éstas pueden alterar significativamente el resultado final de la composición química.

Referencias Bibliográficas

- [1] El Universo. (2013). En Ecuador hay un derrame petrolero por semana. 05/09/2017, de:El.Universo.Sitioweb:<https://www.eluniverso.com/noticias/2014/06/11/nota/1026781/ecuador-hay-derrame-petrolero-semana>
- [2] American Petroleum Institute. (July 2003). API RECOMMENDED PRACTICE 2201. Safe Hot Tapping Practices in the Petroleum & Petrochemical Industries, 1, 4
- [3] American Society Mechanical Engineer (1999) Sistema de tubería para el transporte y distribución de gas. B31.8
- [4] P.T. Houldcroft. (1973). Tecnología De Los Procesos De Soldadura. España: CEAC.
- [5] American Petroleum Institute. (September 1999). API Standard 1104. Welding of Pipelines and Related Facilities, 1
- [6] H. N. Patel, Chair J. G. Hungerbuhler, Jr.. (January 1, 2010). Welding and Brazing Qualifications. IX Qualification Standard for Welding and Brazing Procedure J Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators,
- [7] EXSA OERLIKON. (2007). Metales de Aporte para Soldadura. Manual de Soldadura & Catalogo de Productos , 1, 41-89.
- [8] Quality Assurance Certification. (2000). Electrodo Infra. Manual
- [9] Efraín Amaya Venegas. (2011). Calificación e Implementación De Un Procedimiento De Soldadura FCAW Para Soldaduras En Servicio. Bogotá: Universidad Libre De Colombia.
- [10] Mark A. McClure. (2001). Hot Tapping Tool . 30/07/2017, de USPTO, Cesión de USPTO, Espacenet Sitio web: <https://www.google.com/patents/US6640827>
- [11] Charles Michael Buchanan, Norma Lindsey Buchanan, Michael Eugene Donelson, Maryna Grigorievna Gorbunova, Thauming Kuo, Bin Wang. (2008). Regioselectively substituted cellulose esters produced in a halogenated ionic liquid process and products produced therefrom. U.S.A.: ASTM.
- [12] Berhsa. (2007). Artículo 7. Recuperado el 5 de Julio de 2017, de scribd: <http://es.scribd.com/doc/98388337/Articulo-7-Ensayo-Particulas-Magneticas>
- [13] AEND. (2002). Particulas Magneticas Nivel II (End: Ensayos No Destructivos) (Vol. 1). Madrid, España: FUND. CONFEMETAL.

- [14] ASTM E1444 / E1444M. (2012). ASTM E1444 / E1444M - 12 Standard Practice for Magnetic Particle Testing. Normas técnicas, ASTM International, EEUU.
- [15] HYeriberto Munry, Enrique Niebles. (2009). Diseño para la Fabricacion y Ensamble de productos Soldados. Bogota : Edinorte.
- [16] Pere Molera Sola. (1992). Soldadura Industrial Clases y Aplicaciones. España: Marcombo.
- [17] Zalazar Mónica, Solari Mario. (2015). Evaluación de la microestructura en la zaeffecto de las "LBZ" sobre la soldadura de unión de aceros de poliductos. Quito: UPS.
- [18] Grace M. Davidson, Cheryl L Powers, Steve Lampman. (July 1997). Weld Integrity and Performance. United States Of America: ASM International.
- [19] C Edeleanu. (1964). Materials Technology In Steam Reforming Process. London: PegamonPress.
- [20] Velastegui Gabriel, Díaz Carlos,. (2015). Análisis comparativo de diferentes procesos de soldadura en una tubería de acero A 106 grado B. Quito-Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- [21] : I N G . N A J A R A N Y R E N A U D . G A B R I E L O R T I Z. (2014). Defectos y discontinuidades de la soldadura. 17/11/2017, de UNIVERSIDAD FERMIN TORO ESCUELA DE MANTENIMIENTO MECANICO Sitio web: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/38339806/Defectos_y_discontinuidades_de_la_soldadura.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1510929899&Signature=10EjBEFUV7mi9aLGNy1OdyKNAs0%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DDefectos_y_discontinuidades_de_la_soldad.pdf
- [22] Larry Jefuz. (2009). Soldadura Principios y aplicaciones. España: CESOL.
- [23] Villamarin-Morales. (2017). Estudio y caracterización de una varilla de acero para la empresa Ideal Alambrec. Quito-Ecuador: E.P. N.
- [24] C Guzman. (2013). Análisis de aceros por microscopía óptica. México D.F.: E.S. Ingeniería Mecánica Y Eléctrica.
- [25] Héctor Sanzi y Eduardo Asta. (2011). Procedimiento de Evaluación para Verificar la Integridad Estructural de una Columna Presión durante el Servicio. 10/06/2018, de

Asociación Argentina de ensayos no destructivos y estructurales Sitio web:
<http://www.aaende.org.ar/CORENDE2011/trabajos/16-Sanzi-Asta-columna-comp.pdf>

[26] A.W.S. (11/03/2010). Código de Soldadura Estructural Acero. U.S.A.: American Welding Society.

[27] ASM. (2004). Metals Handbook. USA: ASM International.

Anexos

Anexo I. Carta de auspicio de AUMAPROC S.A.



AU-OTR-2017-057

QUITO, JUNIO 30 DE 2017

Doctor:

Víctor Hugo Guerrero Barragán
Decano Facultad de Ingeniería Mecánica Escuela Politécnica Nacional

Asunto: Auspicio alumno Klever Abdón Garzón Mejía

Por medio de la presente certifico que Klever Abdón Garzón Mejía identificado con C.I. 1804207494 quien es estudiante de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, se ha desempeñado como pasante en nuestra empresa cumpliendo un tiempo total de 300 horas, las mismas que se encuentran especificadas en el documento de registro de prácticas pre profesionales (documento adjunto). El estudiante antes mencionado ha demostrado puntualidad, honestidad y compromiso durante su permanencia en nuestra empresa.

Aumaproc S.A. es una empresa ecuatoriana que se dedica a la prestación de servicios en el campo industrial abarcando las áreas mecánica, instrumentación y eléctrica. En los trabajos realizados en el proceso de soldadura de tubería de acero A106 Grado B para la realización de Hot Tapping, se han presentado problemas de agrietamiento y presencia de fisuras en el cordón de soldadura y la zona afectada por el calor; problema que ha sido reincidente y cuyas causas no han sido conocidas ni controladas.

Dado lo anterior, hemos considerado que el estudiante Klever Abdón Garzón Mejía es la persona apta e idónea para solucionar el problema antes descrito y puede usar la situación y su solución como su proyecto de titulación. Sus habilidades y conocimientos serán reconocidos en nuestra empresa y recibirá todo el apoyo necesario para la realización de dicho proyecto. AUMAPROC S.A. compromete en brindar al estudiante la facilidad de acceso a nuestras instalaciones, asesoría técnica, capacitación necesaria y acceso al personal necesario y capacitado para desarrollar las actividades correspondientes hasta culminar de manera satisfactoria su proyecto de titulación.

Cordialmente:

Ing. Lenin Santiago Urrutia
Gerente General AUMAPROC S.A.
Catalina de Jesús Herrera Oe6171 y Nela Martínez
lenin.urrutia@aumaproc.com

AUMAPROC S.A.



Anexo II. Procedimiento de soldadura WPS.

	FIM-EPN-TGK- AUMAPROC WELDING INSPECTION	
	ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA WPS No. FIM-EPN-TGK-AUMAPROC 001	
PROYECTO: ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE INFLUENCIA DEL PROCESO DE PEGADO EN CALIENTE (HOT TAPPING) EN TUBERÍA DE ACERO A-106 GRADO B BASADO EN LAS NORMAS API 1104 Y ASME IX		

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)
WPS No. FIM-EPN-TGK-AUMAPROC 001

Nombre Compañía: AUMAPROC S.A. PQR de Soporte No.: GSKV - AUMAPROC - 002 Según norma : API 1104 - 2013 "WELDING OF PIPELINES AND RELATED FACILITIES".	Revisión : 1.0 Fecha Revisión: 03/02/2018 Realizado por: Ing. Gabriel E. Velasteguí INSPECTOR DE SOLDADURA "CWI" CERTIFICADO POR LA AWS.
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA		ARTÍCULO V. POSICIÓN DE SOLDADURA	
Tipo de junta:	En T	Proceso de soldadura:	SMAW (SHIELDED METAL ARC WELDING)
Abertura raíz (e):	1,0 +/- 0,5 mm	Soldadura de:	FILETE
Talón (c):	1,0 +/- 0,5 mm	Posición de Soldadura:	6F (FUA A 45°)
Angulo de ranura (β):	45° +/- 10°	Progresión:	Descendente/Ascendente
Placa de respaldo:	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Técnica:	Un pase <input type="checkbox"/> Varios pases <input checked="" type="checkbox"/>
Preparar bisel:	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		

ARTÍCULO II. METAL BASE		ARTÍCULO VI. PRECALENTAMIENTO	
Especificación:	ASTM A 106 Gr. B	ASTM A 105 Gr A	Temperatura: N/A
Diámetro:	152,4 mm. (6" inch)	762,0 mm. (24" inch)	Temperatura entre pases máx: N/A
Espeor (t):	4,0 mm.	32,8 mm.	Tiempo entre pases : N/A
P No.	1	1	
Grupo No.	1	1	

ARTÍCULO III. METAL DE APORTE / ELECTRODO		ARTÍCULO VII. TÉCNICA DE SOLDADURA	
Especificación (SFA) No.	5.1	5.1	Proceso de soldadura:
Denominación AWS:	E 6010	E7018	Tipo de Soldadura:
Diámetro (mm):	(3/32")	(3/32")	SMAW Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática Automática
Marca :	LINCOLN	LINCOLN	Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/>
Denominación comercial:	5P+	Excalibur	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Grupo No.	1	3	Múltiples <input type="checkbox"/>
			Recto / Oscilante <input type="checkbox"/>

ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN		Soldadura por: Cordón de respaldo: Pases simples ó múltiples (por lado) Electrodo Único ó Múltiples Cordón Recto u Oscilante Limpieza: Primer pase Pases siguientes :	
Tipo:	N/A		Disco <input type="checkbox"/>
Caudal:	N/A		Grata <input type="checkbox"/>

REALIZADO Y APROBADO POR:	REVISADO POR:	REVISADO POR:
Ing. Gabriel E. Velasteguí INSPECTOR DE SOLDADURA CERTIFICADO "CWI" CERTIFICADO POR LA AWS	Ing. Lenin Urrutia GERENTE GENERAL AUMAPROC S.A.	Kléver Garzón
Firma: Fecha:	Firma: Fecha:	Firma: Fecha:



FIM-EPN-TGK-AUMAPROC

WELDING INSPECTION

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

WPS No. FIM-EPN-TGK-AUMAPROC 001

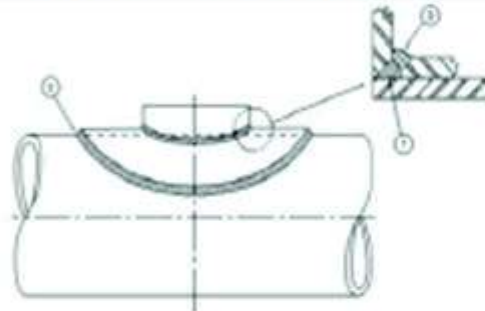


PROYECTO: ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE INFLUENCIA DEL PROCESO DE PEGADO EN CALIENTE (HOT TAPPING) EN TUBERÍA DE ACERO A-106 GRADO B BASADO EN LAS NORMAS API 1104 Y ASME IX

ARTÍCULO VIII. NOTAS

- Asegurar limpieza de las partes.
- Verificar perpendicularidad de la junta.

ARTÍCULO IX. DETALLE DE LA JUNTA



ARTÍCULO X. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

No. de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm.)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)				Oscilado	Recto
1	E6010	0,94 (3/32")	DC +	80 - 120	25-30	60 - 80	Descendente		X
2	E6010	0,94 (3/32")	DC +	90 - 130	25-30	80 - 100	Descendente	X	
3-5	E7018	0,94 (3/32")	DC +	100 - 140	20 - 25	60 - 80	Ascendente	X	

REALIZADO Y APROBADO POR:	REVISADO POR:	REVISADO POR:
<p>Ing. Gabriel E. Velastegui INSPECTOR DE SOLDADURA CERTIFICADO "CWI" CERTIFICADO POR LA AWS</p> <p>Firma: Fecha:</p>	<p>Ing. Lenin Urrutia GERENTE GENERAL AUMAPROC S.A.</p> <p>Firma: Fecha:</p>	<p>Kléver Garzon M.</p> <p>Firma: Fecha:</p>



HOW TO ORDER BRANCH CONNECTIONS

1. Specify Size

- Outlet size
- Run or Header (or Run Size Combination, see pages 38 - 40)

2. Specify Style

Olet®

- Butt-weld (Weldolet®)
- Threaded (Thredolet®)
- Socket-weld (Sockolet®)
- Other (Elbolet®, Latrolet®, Sweepolet®, Insert Weldolet®, Nipolet®, etc.)

Flexolet™

- Butt-weld
- Threaded
- Socket-weld

3. Indicate Class or Schedule/Pipe Wall

- Class 3000, 6000 - Threaded or Socket-weld
- STD, XSTG, S160, etc. - Butt-welded

4. Select Material

- Carbon Steel - SA/A105, SA/A105N - SA/A350-LF2, etc.
- Stainless Steels
- Other

5. Specify Design Code (if available)

Examples - Quantity - Description - Material

- 10 pieces - 8 x 4 Weldolet® - STD Wt. SA/A105
- 5 pieces - 36 - 6 x 1-1/2 Flexolet™ - 3M Threaded - SA/A105

HOW TO SPECIFY BONNEY FORGE BRANCH CONNECTIONS

Generally the schedules of the run pipe and branch pipe are identical and thus specification of the equivalent schedule Weldolet assures the proper fitting being used.

Example:

16" Standard weight x 6" Standard weight is specified as a 6" standard weight fitting.

Where the schedule of the run is greater or less than the schedule of the branch, it is essential that both schedules be specified since: (a) The Weldolet's reinforcing characteristics are a function of the run pipe wall thickness, which in turn designates the schedule of the basic Weldolet® fitting to be used; (b) The wall thickness of the outlet or branch end must match the wall thickness of the branch pipe.

Example:

16" Extra strong x 6" Standard weight.

16" Standard weight x 6" Extra strong.

Special care is suggested to avoid confusing schedule 40 and standard weight as being identical (above 10" schedule 40 is heavier) and schedule 80 and extra strong (above 8" schedule 80 is heavier).

Example:

8" Schedule 80 x 4" Schedule 80 fitting or extra strong fitting.

18" Schedule 80 x 4" Schedule 80 is a considerably heavier fitting, because the reinforcement is for 18" schedule 80 pipe with a wall thickness of approximately 1".

The Weldolet® is available in standard code designs for all combinations of run wall thicknesses up through 3 1/2" thickness and branch wall thicknesses up through double extra strong. Designs for thicknesses greater than these can be developed on request.

HOW TO SPECIFY BONNEY FORGE BRANCH CONNECTIONS WITH SPECIAL BORES

When run size is standard weight and the branch is standard weight - specify as standard weight. When run is standard weight and branch size is bored for a schedule less than standard weight - specify and price as standard weight plus special bore. When run size is extra strong weight and the branch is extra strong weight - specify and price as extra strong. When run size is extra strong weight and the branch is bored for a schedule less than extra strong weight - specify as extra strong plus special bore. When run size is schedule 160 weight and the branch is schedule 160 weight - specify and price as schedule 160. When the run size is schedule 160 weight and the branch is bored for a schedule less than schedule 160 - specify as schedule 160 plus special bore. For 12" and larger run sizes with wall thicknesses heavier than schedule 160 - specify Heavy Wall Weldolets as shown on page 14.

When ordering include the following information:

Examples:

Quantity	Size	Description	Material
30	6 x 6	Weldolet®, Standard Weight	Carbon Steel
2	16 x 4	Weldolet® Sch 100 x Sch 40	F22
30	2 x 2	Socket® Class 3000	304 S.S.
25	10-3 x 3/4	Thredolet® Class 6000	Carbon Steel

Note - Material of Outlet™ Fittings should be the same as material of header.



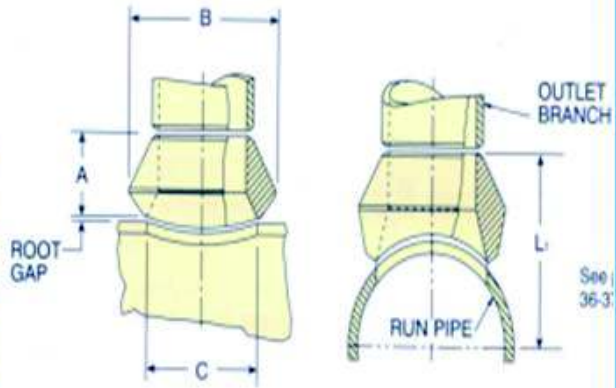
WELDOLET®

BONNEY FORGE

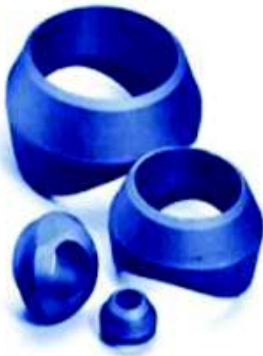
REDUCING AND FLAT SIZE

STANDARD WEIGHT, RUN AND BRANCH

FORGED



See 36-3

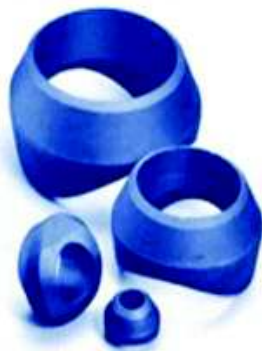
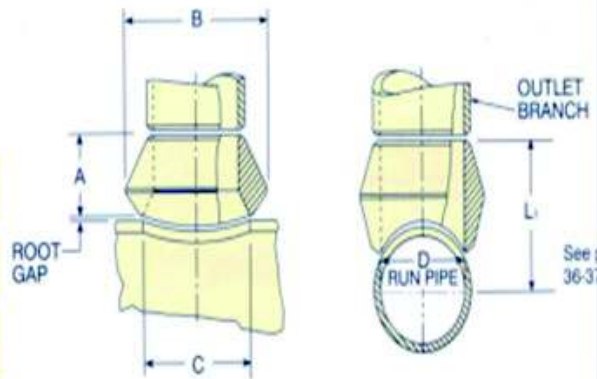


Outlet Size Inches	Dimensions			Appx. Weight Pounds
	A	B	C	
1/8	5/8	1	5/8	.10
1/4	5/8	1	5/8	.10
3/8	3/4	1-1/4	3/4	.15
1/2	3/4	1-3/8	15/16	.20
3/4	7/8	1-3/4	1-3/16	.25
1	1-1/16	2-1/8	1-7/16	.50
1-1/4	1-1/4	2-9/16	1-3/4	.80
1-1/2	1-5/16	2-7/8	2	1.00
2	1-1/2	3-1/2	2-9/16	1.75
2-1/2	1-5/8	4-1/16	3	2.50
3	1-3/4	4-13/16	3-11/16	4.00
3-1/2	1-7/8	5-5/8	4	5.50
4	2	6	4-3/4	6.30
5	2-1/4	7-1/16	5-9/16	10.25
6	2-3/8	8-1/2	6-11/16	12.00
8	2-3/4	10-3/8	8-11/16	23.00
10	3-1/16	12-11/16	10-13/16	36.00
12	3-3/8	14-7/8	12-13/16	59.00
14	3-1/2	16-1/8	14-1/16	66.00
16	3-11/16	18-1/4	16-1/16	75.00
18	3-13/16	20-1/2	18-1/16	97.00
20	4	22-1/2	20	118.00
24	4-9/16	27-1/8	24-3/16	220.00
26	4-11/16	29-1/16	26-1/4	265.00
30	5-3/8	34-1/16	30-7/16	430.00
36	5-3/8	34-1/16	36-1/2	900.00

SIZE ON SIZE

STANDARD WEIGHT, RUN AND BRANCH

FORGED



Outlet Size Inches	Dimensions				Appx. Weight Pounds
	A	B	C	D	
1/2	3/4	1-3/8	15/16	5/8	.15
3/4	7/8	1-5/8	1-3/16	13/16	.25
1	1-1/16	2	1-7/16	1-1/32	.40
1-1/4	1-1/4	2-3/8	1-3/4	1-3/8	.70
1-1/2	1-5/16	2-7/8	2	1-5/8	.80
2	1-1/2	3-1/2	2-9/16	2-1/16	1.50
2-1/2	1-5/8	4-1/16	3	2-7/16	2.25
3	1-3/4	4-13/16	3-11/16	3-1/16	3.75
3-1/2	2	5-3/8	3-7/8	3-9/16	5.00
4	2	6	4-3/4	4	6.70
5	2-1/4	7-1/8	5-9/16	5-1/16	8.50
6	2-3/8	8-1/2	6-11/16	6-1/16	14.00
8	2-3/4	10-3/8	8-11/16	7-15/16	28.00
10	3-1/16	12-9/16	10-13/16	10	39.00
12	3-3/8	14-7/8	12-13/16	12	65.00
14	3-1/2	16-1/8	14-1/16	13-1/4	70.00
16	3-11/16	18-1/4	16-1/16	15-1/4	92.00
18	4-1/16	20-3/4	18-5/8	17-1/4	125.00
20	4-5/8	23-1/16	20-1/16	19-1/4	175.00
24	5-3/8	27-7/8	25-1/8	23-1/4	280.00
30	5-3/8	34-1/16	30-7/16	29-1/4	440.00
36	5-3/8	34-1/16	36-1/2	35-1/4	1180.00

Footnotes apply to pages 8 & 9.

Each outlet size listed is available to fit any run curvature.

Larger Outlet Sizes Available on Application.

Design per MSS-SP-97. BW ends per B16.9 and B16.25.

Electrodos Celulósicos para Aceros al Carbono			
FLEETWELD® 5P	3060141 3060142 3060143 3060144 3060171 3060172 3060173 3060174	3/32" (2.4) 1/8" (3.2) 5/32" (4.0) 3/16" (4.8) 3/32" (2.4) 1/8" (3.2) 5/32" (4.0) 3/16" (4.8)	5C (20CM) 5C (20CM) 5C (20CM) 5C (20CM) 23L 23L 23L 24.5L
FLEETWELD® 5P+	3060271 3060272 3060273 3060274	3/32" (2.4) 1/8" (3.2) 5/32" (4.0) 3/16" (4.8)	22L 22L 23L 24L
CHAMPION® 6010	3060342 3060343	1/8" (3.2) 5/32" (4.0)	5C (20CM) 5C (20CM)
FLEETWELD® 35	3061141 3061142 3061143 3061172 3061173	3/32" (2.4) 1/8" (3.2) 5/32" (4.0) 1/8" (3.2) 5/32" (4.0)	5C (20CM) 5C (20CM) 5C (20CM) 22L 22.5L
LINCOLN® 6010 AS	503203 503204 503205	3/32" (2.4) 1/8" (3.2) 5/32" (4.0)	5C (20CM) 5C (20CM) 5C (20CM)

DESCRIPCIÓN GENERAL	AWS	POLARIDAD
Es un electrodo diseñado para alta penetración para soldar en todas posiciones; ampliamente recomendado en aplicaciones verticales y sobre-cabeza, en la soldadura para paso de raíz en tubería y oleoductos. Normas aplicables API y ASME grado X-42 a X52. Su transferencia "spray" lo hace ser el electrodo que más han tratado de imitar en todo el mundo.	E6010	CD (+)
Es un electrodo de revestimiento celuloso para la soldadura en aceros al carbono. El tipo de arco está diseñado para proporcionar un arco fuerte y estable; lo suficiente para obtener una penetración profunda con mínima salpicadura. El depósito presenta un enfriamiento rápido, lo que da como resultado una menor tendencia a socavar. Aplicaciones típicas se encuentra en la soldadura de tubería y placa en toda posición; ya sea vertical ascendente, descendente o sobre-cabeza.	E6010	CD (+)
Es un electrodo diseñado para alta penetración y solidificación rápida para soldar en todas posiciones. Muy utilizado en la soldadura de tuberías.	E6010	CD (+)
Es un electrodo con revestimiento celuloso, de mediana penetración. Diseñado para usarse tanto con corriente directa o con corriente alterna. Presenta un arco muy estable; facilitando el encendido y reencendido. Las características de este electrodo lo hacen especialmente apropiado en aplicaciones por punteo y sujeción de estructura ligera.	E6011	CD (+) / CA
Electrodo celulósico de buena penetración y escoria suave con mínima interferencia de arco.	E6010	CD (+)
Este electrodo posee un recubrimiento ligeramente más grueso, cualidad que hace que su arco sea más suave y con menor chisporroteo que otros electrodos de este tipo, obteniéndose excelentes resultados al soldar, tanto con corriente alterna como con corriente directa.	E6011	CD (+) / CA

Electrodos de Bajo Hidrógeno para Aceros al Carbono

NOMBRE DE PRODUCTO	CÓDIGO	Diámetro pulg (mm)	Peso Kg Empaque
LINCOLN® 7018-1	3078771	3/32" (2.4)	18L
	3078772	1/8" (3.2)	17.5L
	54066	5/32" (4.0)	18L
	307808733	5/32" (4.0)	24L
	307808734	3/16" (4.8)	22L
JET-LH® 78RH	3078131	3/32" (2.4)	4C (16CM)
	3078132	1/8" (3.2)	4C (16CM)
	3078133	5/32" (4.0)	4C (16CM)
	3078134	3/16" (4.8)	4C (16CM)
	3078171	3/32" (2.4)	18L
	3078172	1/8" (3.2)	18L
	3078173	5/32" (4.0)	18.5L
	3078174	3/16" (4.8)	18L
	3078152	1/8" (3.2)	10C (20CM)
	3078153	5/32" (4.0)	10C (20CM)
	3078154	3/16" (4.8)	10C (20CM)
	3078162	1/8" (3.2)	23.5L
	3078163	5/32" (4.0)	25L
LINCOLN® 7018AC	307816031	3/32" (2.4)	4C (16CM)
	307816032	1/8" (3.2)	4C (16CM)
	307816033	5/32" (4.0)	4C (16CM)
¡NUEVA PRESENTACIÓN!	501558	1/8" (3.2)	SK1/CM20LB
LM E7018 H4R™	52201	3/32" (2.4)	18L
	52202	1/8" (3.2)	18L
	52203	5/32" (4.0)	18L
	52369	3/16" (4.8)	18L
LINCOLN® B10 PRO	55109	1/8" / 3.2	10C (20CM)
	55110	5/32" / 4.0	10C (20CM)
	55761	3/16 (4.8)	10C (20CM)
LINCOLN® 78	55008	1/8" / 3.2	10C (20CM)
	55009	5/32" / 4.0	10C (20CM)
	55875	3/16 (4.8)	10C (20CM)
	55816	1/4" (6.4)	10C (20CM)
CHAMPION® 7018	3078331	3/32" (2.4)	4C (16CM)
	3078352	1/8" (3.2)	10C (20CM)
	3078353	5/32" (4.0)	10C (20CM)
	3078354	3/16 (4.8)	10C (20CM)

DESCRIPCIÓN GENERAL	AWS	POLARIDAD
Es un electrodo con revestimiento básico para la soldadura de calidad radiográfica en acero al carbono y baja aleación. Presenta una estabilidad de arco y rápida solidificación de la escoria que lo hace fácil de manipular en todas posiciones. Los depósitos presentan un contenido de hidrógeno difusible \leq a 0.4mL/100gr; adecuados para equipos que requieran elevada tenacidad al impacto a bajas temperaturas (hasta -45°C).	E7018	CD (+)
Es un electrodo con revestimiento bajo hidrógeno para la soldadura aceros bajo y mediano carbono. El revestimiento presenta un contenido de polvo de hierro aumentando el porcentaje de metal depositado. Presenta una estabilidad de arco y rápida solidificación de la escoria que lo hace fácil de manipular en distintas posiciones. Excelente para la unión en aceros estructurales de alta resistencia.	E7018	CD (+)
Es un electrodo con revestimiento básico bajo contenido de hidrógeno diseñado para usarse con corriente alterna; incluso con máquinas que presentan bajo voltaje en circuito abierto. Fácil encendido y reencendido del arco. Presenta una estabilidad de arco y rápida solidificación de la escoria que lo hace fácil de manipular en distintas posiciones. Excelente para la unión en aceros estructurales de alta resistencia.	E7018	CD (+)(-) / CA
Es un electrodo con revestimiento básico con extra bajo contenido de hidrógeno \leq a 0.4mL/100gr. Diseñado para usarse con corriente directa incluso con máquinas que presentan bajo voltaje en circuito abierto. Fácil encendido y reencendido del arco. Presenta una estabilidad de arco y rápida solidificación de la escoria que lo hace fácil de manipular para todas posiciones. Excelente para la unión en aceros que requieran elevada tenacidad al impacto a bajas temperaturas.	E7018H4R	CD (+)
Es un electrodo para soldar aceros de alta resistencia y de baja aleación en todas las posiciones. Se puede utilizar con corriente directa. Es de fácil y rápido encendido; su transferencia tipo "spray" le otorga un gran control sobre el charco de soldadura. Produce un cordón de buena apariencia. Diseñado especialmente para profesionales.	E7018	CD (+)

REPORTE DE INSPECCIÓN POR LIQUIDOS PENETRANTES ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEPARTAMENTO DE MATERIALES	
DATOS GENERALES	
Cliente: Garzón Mejía Klever Abdón, Estudiante titulación	Reporte N°: LABEND-EPN-2018-R-04-LP-03
Fecha: 09-03-2018	Lugar: Quito-Ecuador
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA	
Descripción: 2018-R-04-LP-03-0001: Tubería de acero soldada de L: 560 mm y Dext: 70 mm 2018-R-04-LP-03-0002: Tubería de acero soldada de L: 560 mm y Dext: 70 mm	Identificación: 2018-R-04-LP-03-0001 2018-R-04-LP-03-0002
Material: Acero ASTM A 106 GR B	Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material
ESQUEMA DE LA PIEZA	
	
2018-R-04-LP-03-0001	
	
2018-R-04-LP-03-0002	

MATERIALES Y EQUIPOS

Líquidos:	Emulsificador:
Limpiador / removedor: Met-L-check E-59A	Revelador: Met-L-check D-70
Penetrante: Met-L-check VP-30	
Accesorios: N/A	

CONDICIONES DE TRABAJO



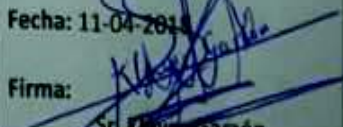
Procedimiento: basado en ASTM E 165, Tipo II método A Se divide la zona de inspección en 2 partes iguales para su ensayo.	Limpieza: Con solvente
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------


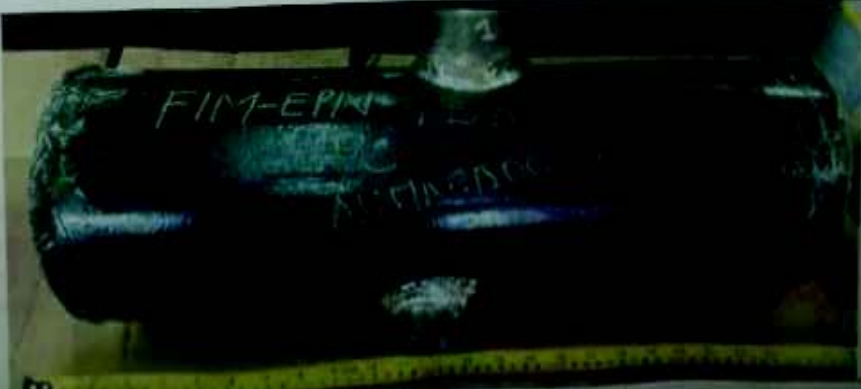
Tiempos:	Revelador: 5 minutos
Penetrante: 10 minutos	Emulsificador: N/A
Luz de observación: Visible (sobre los 1700 lux)	Tiempo:

Normas de Aceptación / Rechazo
API 1104

RESULTADOS

IDENTIFICACIÓN	IMAGEN	OBSERVACIONES
2018-R-04-LP-03-0001_1		Se observan porosidades, sin embargo no se consideran discontinuidades relevantes
2018-R-04-LP-03-0001_2		No Se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés

<p>2018-R-04-LP-03-0002_1</p>		<p>No Se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés</p>
<p>2018-R-04-LP-03-0002_2</p>		<p>Se observan porosidades, sin embargo no se consideran discontinuidades relevantes</p>
<p>OPERADOR: Verónica Sotomayor</p>		
<p>Nivel: LÍQUIDOS PENETRANTES –ASNT NIVEL II, REGISTRO ICC-132</p>	<p>Firma:</p>	
<p>Laboratorio de Ensayos No Destructivos LAB-END</p> <p>Fecha: 11-04-2018</p> <p>Firma:  Ing. Verónica Sotomayor JEFE LAB-END</p> 		<p>Solicitante</p> <p>Fecha: 11-04-2018</p> <p>Firma:  Sr. Klaus Garzón Estudiante titulación</p>

REPORTE DE INSPECCIÓN POR PARTICULAS MAGNÉTICAS ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEPARTAMENTO DE MATERIALES	
DATOS GENERALES	
Cliente: Garzón Mejía Klever Abdón, Estudiante titulación	Reporte N°: LABEND-EPN-2018-R-05-PM-01
Fecha:	Lugar: Quito-Ecuador
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA	
Descripción: 2018-R-01-PM-05-0001: Tubería de acero soldada de L: 560 mm y Dext: 70 mm 2018-R-01-PM-05-0002: Tubería de acero soldada de L: 560 mm y Dext: 70 mm	Identificación: 2018-R-05-PM-01-0001 2018-R-05-PM-01-0002
Material: Acero ASTM A 106 GR.B	Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material
ESQUEMA DE LA PIEZA	
	
2018-R-05-PM-01-0001	
	
2018-R-05-PM-01-0002	

MATERIALES Y EQUIPOS

Equipo de magnetización: Yugo magnético

Tipo:

Marca: Magnaflux

Amperaje nominal: 6-110A

Accesorios: Partículas magnéticas en medio no acuoso

CONDICIONES DE TRABAJO

Método de magnetización: Continua

Técnica: Magnetización longitudinal, inducción indirecta.
Método Húmedo, Contraste blanco



Tipo de corriente: AC

Voltaje: 110V

Amperaje: 6A

Normas de Aceptación / Rechazo
API 1104

RESULTADOS

IDENTIFICACIÓN	IMAGEN	OBSERVACION
<p>2018-R-05-PM-01-0001_1</p>		<p>No se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés</p>
<p>2018-R-05-PM-01-0001_2</p>		<p>No se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés</p>

2018-R-05-PM-01-0002_1



No se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés

2018-R-05-PM-01-0002_2



No se observan discontinuidades relevantes en la zona de interés

OPERADOR:

Verónica Sotomayor

Laboratorio de Ensayos No Destructivos

LAB-END



Fecha: 11-04-2018

Firma:



Ing. Verónica Sotomayor
JEFE LAB-END

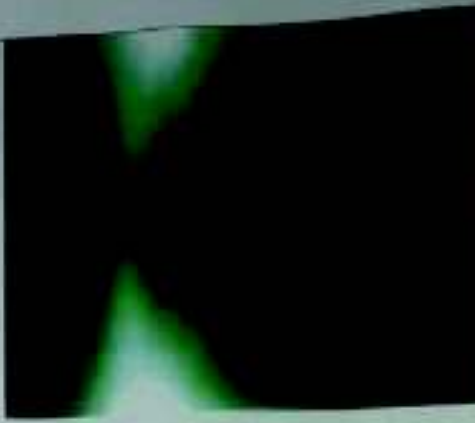
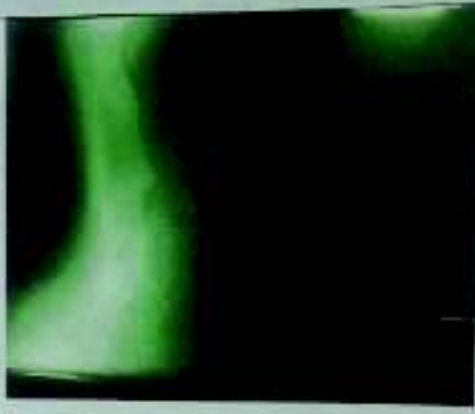
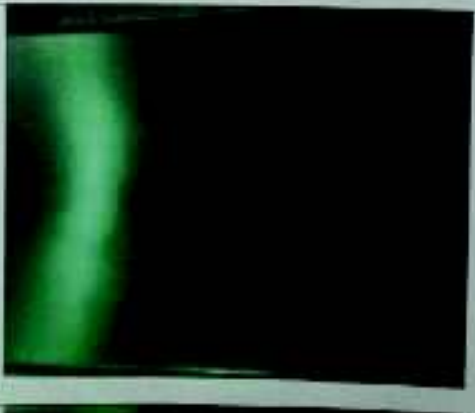

Cliente

Fecha: 11-04-2018

Firma:

SA Klever Garzón
Estudiante titulación

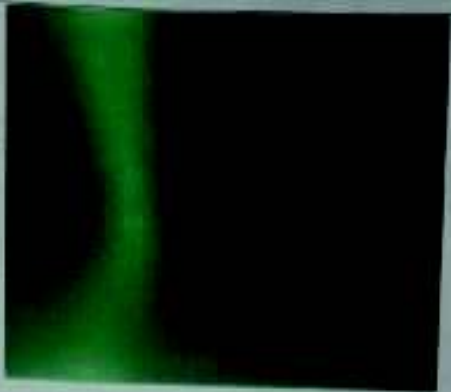
REPORTE DE INSPECCION RADIOGRÁFICA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEPARTAMENTO DE MATERIALES			
Información General			
Cliente: Kiever Garzón, Estudiante titulación		Reporte N°: LABEND-EPN-2018-RD7-RX-03	
Fecha de Inspección: 27 de abril de 2018		Lugar: Quito - EPN	
Identificación de la Pieza			
Descripción: 2018-R-07-RX-03-0001: Tuberia de acero soldada de L: 560 mm y Dext: 170 mm 2018-R-07-RX-03-0002: Tuberia de acero soldada de L: 560 mm y Dext: 170 mm Material: Acero ASTM A106		Identificación: 2018-RD7-RX03-0001 2018-RD7-RX03-0002	
		Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material	
Componente(s) a Inspeccionar			
2018-RD7-RX03-0001		2018-RD7-RX03-0002	
			
Equipos y Materiales			
Equipo de RX			
Marca: Seltographe	Modelo: BF 200/10	kV: 200 kV	mA: 30 mA
Película		Tipo: II - D7	
Condiciones de Trabajo			
Normas de Referencia: API 1104			
Pieza: 2018-RD7-RX03-0001			
Tomas: 3	Kv: 160 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 1 min 56 s	Distancia a la Fuente: 31 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones: IQI Tipo IB			
Pieza: 2018-RD7-RX03-0002			
Tomas: 3	Kv: 160 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 1 min 56 s	Distancia a la Fuente: 31 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones: IQI Tipo IB			
Procesamiento de Película			
Temp. Ambiente: 20 °C	T. Revelado: 5 min	T. Parado: 2 min	T. Fijado: 10 min
Baño de Parada: 5 min	T. Lavado Final: NA	T. Lav. Deshumectante: NA	T. de Secado: 30 min
Imágenes Radiográficas			

<p>TOMA 1 2018-R07-RX03- 0001-1</p>			
<p>TOMA 2 2018-R07-RX03- 0001-2</p>			
<p>TOMA 3 2018-R07-RX03- 0001-3</p>			
<p>TOMA 1 2018-R07-RX03- 0002-1</p>			

TOMA 2
2018-R07-RX03-
0002.2



TOMA 2
2018-R07-RX03-
0002.3



Interpretación Radiográfica

Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades									
	Toma 1 2018-R07-RX03-0001		Toma 2 2018-R07-RX03-0001		Toma 3 2018-R07-RX03-0001		//		//	
	X (mm)	Den. (mm)	X (mm)	Den. (mm)	X (mm)	Den. (mm)				
Falta de Penetración	---	---	---	---	---	---	//	//	//	//
Fusión Incompleta	---	---	---	---	---	---	//	//	//	//
Penetración excesiva	---	---	---	---	---	---	//	//	//	//
Inclusiones de Escoria	27	6								
	38	3								
	44	2					//	//	//	//
	49	2								
Porosidad			---	---			//	//	//	//
Grietas	---	---	---	---	---	---	//	//	//	//
Mordeduras	---	---	---	---	---	---	//	//	//	//
Escoria Alargada	---	---	---	---	---	---	//	//	//	//
Otros	---	---	---	---	---	---	//	//	//	//

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa

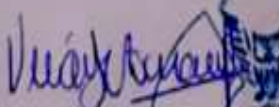


Interpretación Radiográfica


Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades									
	Toma 1 2018-R07-RX03-0002		Toma 2 2018-R07-RX03-0002		Toma 3 2018-R07-RX03-0002		//		//	
	X (mm)	Den. (mm)	X (mm)	Den. (mm)	X (mm)	Den. (mm)				
							//	//	//	//

Página 3 de 3

Falta de Penetración	----	----	----	----	----	----	//	//	//	//
Fusión Incompleta	----	----	----	----	----	----	//	//	//	//
Penetración excesiva	----	----	----	----	----	----	//	//	//	//
Inclusiones de Escoria	----	----	----	----	----	----	//	//	//	//
Porosidad	----	----	----	----	----	----	//	//	//	//
Grietas	----	----	----	----	----	----	//	//	//	//
Mordeduras	----	----	----	----	----	----	//	//	//	//
Escoria Alargada	----	----	----	----	----	----	//	//	//	//
Otros: Grieta transversal	----	----	----	----	----	----	//	//	//	//

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa

<p style="text-align: center;">Laboratorio de E.N.D</p> <p>Firma: </p> <p>Ing. Verónica Sotomayor Jefe de Laboratorio de Ensayos no destructivos</p> <p>Fecha: 03 de mayo de 2018</p> 	<p style="text-align: right;">Solicitante</p> <p>Firma: </p> <p>Nombre: <u>Klover Garzon</u></p> <p>Cargo: Estudiante titulación FIM Contacto: 0995447313 Correo: Klover.garzon@epn.edu.ec Fecha: 03/05/2018</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Carlos Wime Díaz Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 24 de mayo del 2018

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor M. Sc / Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Muestra de fundición.


1. ANTECEDENTES.


Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una probeta de material fundido.

Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en la muestra entregada.

2. IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA.

La probeta para el análisis correspondiente es identificada como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta	Imagen
Steel Pipe A106 GR.B	M 23.02.18	



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

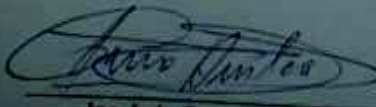
3.1 Limpieza superficial: Según la norma ASTM E634-12 Standard Practice for Sampling of Zinc and Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry


3.2 Método: Fe 110 Fe Low Alloy


4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se toman mínimo 3 mediciones por muestra promediando su valor.

		Probeta Acero
Elemento		Valor [%]
Silicio	Si	0,277
Hierro	Fe	99,14
Cobre	Cu	0,0027
Manganeso	Mn	0,382
Carbono	C	0,134
Cromo	Cr	0,020
Niquel	Ni	0,011
Cobalto	Co	0,0045
Molibdeno	Mo	<0,005
Fósforo	P	0,023
Vanadio	V	<0,003
Aluminio	Al	<0,002
Wolframio	W	<0,002
Total		99,99


Ing. Luis Gustavo Huilca
Técnico Responsable


Ing. Oscar Solomayor
Jefe del Laboratorio de Fundición



Analysis Report

Sample: Muestra 23.02.18

Analysis Time: 23.05.2018 18:02:57

Method: Fe110

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
Ø	0,134	0,277	0,382	0,023	0,0041
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
Ø	0,020	<0,0050	0,011	0,0027	<0,0020
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	W [%]
Ø	0,0045	<0,0050	<0,0020	<0,0030	<0,020
	B [%]	Sn [%]	Fe [%]		
Ø	0,0012	<0,0020	99,14		

A.



 **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN 

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Carlos Wime Diaz Mec.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 05 de junio del 2018

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor M. Sc / Ing. Luis G. Hulica

Descripción: Probeta para estudio de tema de tesis.

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una muestra para ensayo.

Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en la muestra entregada.

2. IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA.

La probeta para el análisis correspondiente es identificada como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la muestra	Fotografía
Muestra de acero	M. Hot Tapping	





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN



3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. **Limpieza Superficial:** Según norma ASTM E634 – 12 Standard Practice for Sampling of Zinc and Zinc Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry

3.2. **Método:** Fe 110 Low Alloy

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se toman mínimo 3 mediciones por muestra promediando su valor.

Elemento	Muestra
	Hot Tapping
Elemento	Valor (%)
Carbono [C]	0.173
Silicio [Si]	0.201
Manganeso [Mn]	0.901
Azufre [S]	0.051
Cromo [Cr]	0.040
Níquel [Ni]	0.044
Cobre [Cu]	0.045
Aluminio [Al]	0.019
Hierro [Fe]	98.56
Total	100.03

Ing. Luis G. Huíca

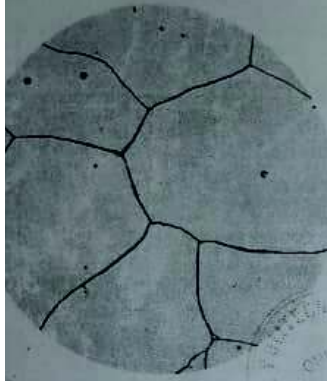
Técnico Responsable



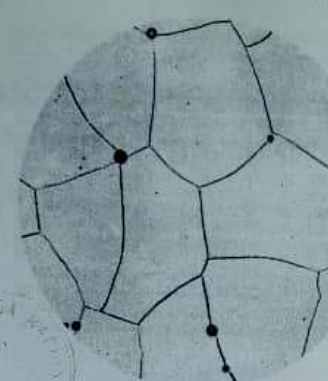
Ing. Óscar Sotomayor

Jefe del Laboratorio de
Fundición.

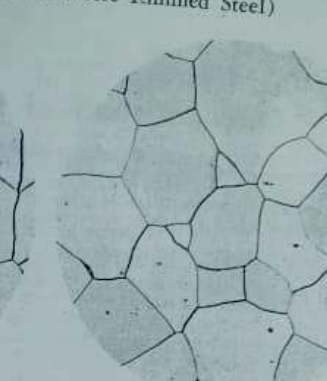
Common Grain Sizes of Low-Carbon Sheet Steel (Specimens Are Rimmed Steel)



Nital 100×
Nominal ASTM grain size No. 1
(specimen shown has a calculated grain size of 1.17)



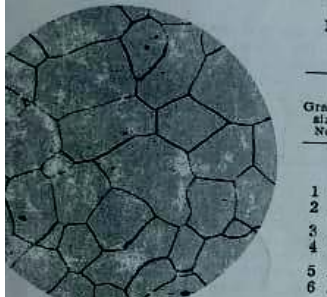
Nital 100×
2 Nominal ASTM grain size No. 2
(specimen shown has a calculated grain size of 2)



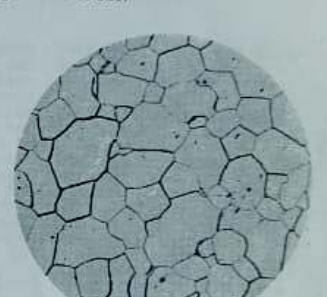
Nital 100×
3 Nominal ASTM grain size No. 3
(specimen shown has a calculated grain size of 2.95)

Nominal Number of Grains per Square Millimeter (at 1×) and per Square Inch (at 100×) for the Ten Grain Sizes Shown


Grain-size No.	Nominal number of grains		Grain-size No.	Nominal number of grains	
	Per sq mm at 1×	Per sq in. at 100×		Per sq mm at 1×	Per sq in. at 100×
ASTM Grain Sizes (ASTM E112)					
1	15.5	1.0	Calculated Grain Sizes Shown		
2	31.0	2.0	1.17	17.4	1.13
3	62.0	4.0	2	31.0	2.00
4	124	8.0	2.95	59.9	3.86
5	248	16.0	4.04	128	8.23
6	496	32.0	4.98	245	15.3
7	992	64.0	6.08	524	33.8
8	1980	128	7.13	1090	70.0
9	3970	256	8.03	2030	131
10	7940	512	8.97	3890	251
			10	7940	512




Nital 100×
Nominal ASTM grain size No. 4
(specimen shown has a calculated grain size of 4.04)




Nital 100×
5 Nominal ASTM grain size No. 5
(specimen shown has a calculated grain size of 4.98)




Nital 100×
Nominal ASTM grain size No. 6
(specimen has a calculated grain size of 6.08)




Nital 100×
7 Nominal ASTM grain size No. 7
(specimen has a calculated grain size of 7.13)



Nital 100×
8 Nominal ASTM grain size No. 8
(specimen has a calculated grain size of 8.03)

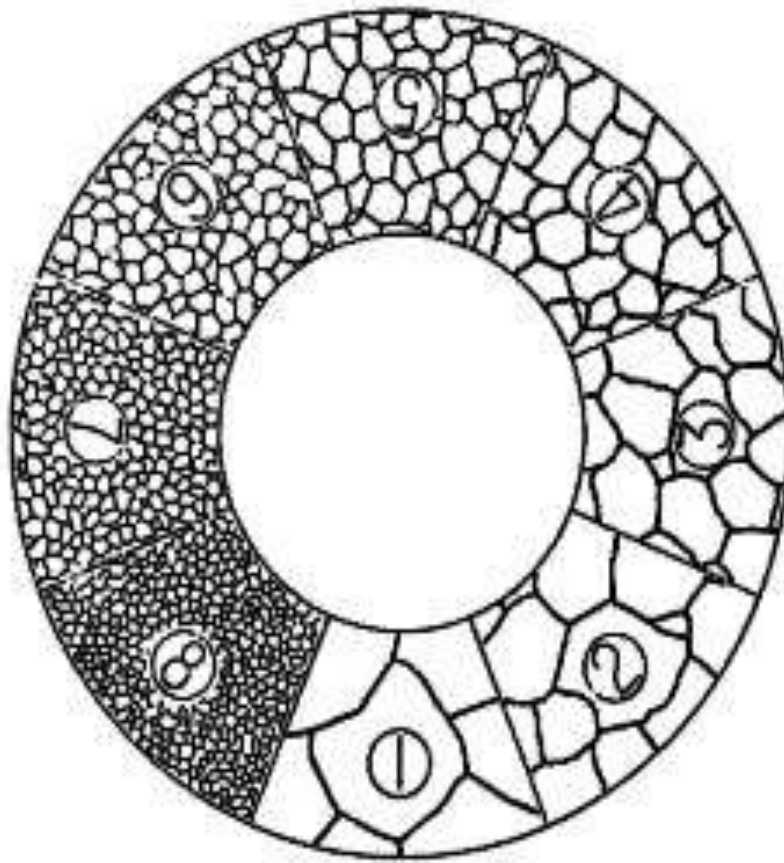


Nital 100×
9 Nominal ASTM grain size No. 9
(specimen has a calculated grain size of 8.97)



Nital 100×
10 Nominal ASTM grain size No. 10
(specimen has a calculated grain size of 10)

Standard methods for estimating the average grain size of metals are presented in ASTM E112, together with formulas for calculating grain size and a table of size relationships for all ASTM grain-size numbers (00 to 14.0, with half sizes).



Anexo XI. Diagrama Hierro Carbono.

2/12/diagrama-hierro-carbono.html

