

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**SOLDABILIDAD DEL ACERO CORRUGADO ASTM A 615 Grado 60
EN RELACIÓN AL ACERO CORRUGADO ASTM A 706 Grado 60.**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER:
DÍAZ PEREGRINO CARLOS EDUARDO**

ASESOR

Dr. Ing. MIGUEL MOSQUEIRA MORENO

**CAJAMARCA - PERÚ
2014**

DEDICATORIA

Dedico ésta Tesis a mis padres y hermanos que se han esforzado incondicionalmente por ayudarme a llegar a esta etapa de mi vida por eso que agradezco a Dios por darme tan linda familia y bueno espero no defraudar sus esperanzas puestas en mí por verme un buen profesional, honesto y al servicio de la sociedad.

CONTENIDO

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	3
2.2 BASES TEÓRICAS.....	5
2.2.1 Soldabilidad de barras corrugadas de acero.....	5
2.2.1.1 La soldadura.....	5
2.2.1.2 Contenido de Carbono y Carbono Equivalente.....	5
2.2.1.3 Influencia de los elementos del acero sobre la soldabilidad.....	8
2.2.1.4 Procesos de soldadura.....	9
2.2.1.4.1 Soldadura por Arco con Electrodo Revestido (SMAW).....	10
2.2.1.5 Electrodos.....	12
2.2.2 Propiedades del material base.....	14
2.2.2.1 Acero corrugado ASTM A 615.....	14
2.2.2.2 Acero corrugado ASTM A 706.....	18
2.2.3 Soldabilidad del material base.....	21
2.2.3.1 Soldabilidad del acero corrugado ASTM A 615.....	22
2.2.3.1.1 Procesos de Soldadura.....	22
2.2.3.1.2 Cálculo del Carbono Equivalente (CE) de las barras corrugadas.....	22
2.2.3.1.3 Material de Aporte.....	23
2.2.3.2 Soldabilidad del Acero corrugado ASTM A 706.....	24
2.2.3.2.1 Procesos de Soldadura.....	24
2.2.3.1.2 Cálculo del Carbono Equivalente (CE) de las barras corrugadas.....	24
2.2.3.1.3 Material de Aporte.....	24
2.2.4 Factores fundamentales para obtener una buena soldadura.....	24
2.2.4.1 Electrodos apropiados para el trabajo.....	24
2.2.4.2 Amperaje correcto para soldar.....	25
2.2.4.2.1 Un amperaje insuficiente.....	25
2.2.4.2.2 Un amperaje excesivo.....	25
2.2.4.3 Longitud adecuada del arco.....	26
2.2.4.3.1 Una longitud muy corta.....	26
2.2.4.3.2 Una longitud muy larga.....	26

2.2.4.4 Apropiado ángulo de inclinación del electrodo.....	26
2.2.4.4.1 Un ángulo demasiado cerrado.....	26
2.2.4.4.2 Un ángulo demasiado abierto.....	26
2.2.4.5 Apropiaada velocidad de avance.....	27
2.2.4.5.1 Una velocidad muy lenta.....	27
2.2.4.5.2 Una velocidad excesiva.....	27
2.2.5 Recomendaciones de la Norma AWS (American Welding Society) para soldaduras.....	28
2.2.5.1 Esfuerzo en la soldadura.....	28
2.2.5.1.1 Esfuerzos Admisibles.....	28
2.2.5.2 Áreas, Longitudes, Gargantas y Dimensiones Efectivas de Soldadura.....	28
2.2.6 Evaluación de la soldadura.....	29
2.2.6.1 Inspección de la soldadura por líquidos penetrantes.....	29
2.2.6.1.1 Características de los líquidos penetrantes.....	29
2.2.6.1.2 Definiciones.....	30
2.2.6.2 Líquidos penetrantes visibles removibles con solvente.....	31
2.2.6.2.1 Penetrante eliminable con disolvente.....	32
2.2.6.2.2 Revelador con base disolvente.....	32
2.2.6.2.3 Técnica de aplicación de los líquidos penetrantes del tipo eliminable con disolvente.....	33
2.2.6.3 Interpretación de los resultados de la inspección.....	36
2.2.6.4 Tipos de discontinuidades en la soldadura.....	37
2.2.6.4.1 Porosidad.....	37
2.2.6.4.2 Inclusiones.....	39
2.2.6.4.3 Fusión incompleta.....	39
2.2.6.4.4 Penetración incompleta o falta de penetración.....	39
2.2.6.4.5 Fisuras.....	40
2.2.6.4.6 Socavadura / mordedura.....	41
2.2.6.4.7 Laminaciones.....	42
2.2.6.4.8 Fisuras laminares.....	42
2.2.6.4.9 Desalineación.....	42
2.2.6.4.10 Salpicaduras.....	43
2.2.6.2 Inspección de la soldadura por ensayo de resistencia a la tracción.....	45

CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....	47
3.1 ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA.....	47
3.1.1 Especificaciones del proceso de soldadura - barra corrugada ASTM A615.....	47
3.1.1.1 Procedimiento de Soldadura para Barra de 1/2".....	48
3.1.1.1.1 Soldadura con electrodo E6011.....	49
3.1.1.1.2 Soldadura con electrodo E7018.....	49
3.1.1.2 Procedimiento de Soldadura para Barra de 5/8".....	50
3.1.1.2.1 Soldadura con electrodo E6011.....	51
3.1.1.2.2 Soldadura con electrodo E7018.....	52
3.1.1.3 Procedimiento de Soldadura para Barra de 3/4".....	52
3.1.1.3.1 Soldadura con electrodo E6011.....	53
3.1.1.3.2 Soldadura con electrodo E7018.....	54
3.1.2 Especificaciones del proceso de soldadura - barra corrugada ASTM A706.....	55
3.1.2.1 Procedimiento de Soldadura para Barra de 1/2".....	55
3.1.2.1.1 Soldadura con electrodo E6011.....	56
3.1.2.1.2 Soldadura con electrodo E7018.....	56
3.1.2.2 Procedimiento de Soldadura para Barra de 5/8".....	57
3.1.2.2.1 Soldadura con electrodo E6011.....	57
3.1.2.2.2 Soldadura con electrodo E7018.....	58
3.1.2.3 Procedimiento de Soldadura para Barra de 3/4".....	59
3.1.2.3.1 Soldadura con electrodo E6011.....	59
3.1.2.3.2 Soldadura con electrodo E7018.....	60
3.1.3 Ensayos de Calificación según Código ANSI/AWS D1.4-2005.....	61
3.1.3.1 Inspección por líquidos penetrantes.....	61
3.1.3.1.1 Identificación del elemento.....	61
3.1.3.1.2 Prelimpieza.....	62
3.1.3.1.3 Aplicación del penetrante.....	63
3.1.3.1.4 Tiempo de penetración.....	64
3.1.3.1.5 Limpieza del exceso de penetrante.....	65
3.1.3.1.6 Aplicación del revelador.....	65
3.1.3.1.7 Tiempo de revelado.....	66
3.1.3.1.8 Interpretación y presentación del ensayo.....	66

3.1.3.2 Ensayo de tracción	68
3.1.3.2.1 Esquema de barras a ensayar	69
3.1.3.2.2 Medición de la probeta	69
3.1.3.2.3 Registro	70
3.2 TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	71
3.2.1 Resultados de la prueba por Líquidos Penetrantes	71
3.2.1.1 Prueba de Líquidos Penetrantes en la barra corrugada ASTM A 615	71
3.2.1.1.1 Prueba con Líquidos Penetrantes en soldaduras con el electrodo E6011	71
3.2.1.1.2 Prueba con Líquidos Penetrantes en soldaduras con el electrodo E7018	73
3.2.1.2 Prueba de Líquidos Penetrantes en la barra corrugada ASTM A 706	75
3.2.1.2.1 Prueba con Líquidos Penetrantes en soldaduras con el electrodo E6011	75
3.2.1.2.2 Prueba con Líquidos Penetrantes en soldaduras con el electrodo E7018	77
3.2.2 Resultados de la prueba a Tracción	79
3.2.2.1 Resultados del ensayo a tracción de la barra corrugada ASTM A 615	80
3.2.2.1.1 Resultados de ensayo tracción de barras de Ø 1/2"	80
3.2.2.1.2 Resultados de ensayo tracción de barras de Ø 5/8"	82
3.2.2.1.3 Resultados de ensayo tracción de barras de Ø 3/4"	84
3.2.2.2 Resultados del ensayo a tracción de la barra corrugada ASTM A 706	87
3.2.2.2.1 Resultados de ensayo tracción de barras de Ø 1/2"	87
3.2.2.2.2 Resultados de ensayo tracción de barras de Ø 5/8"	89
3.2.2.2.3 resultados de ensayo tracción de barras de Ø 3/4"	91
CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	94
4.1 INTERPRETACION DE RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES	94
4.1.1 Interpretación de resultados en barras ASTM A 615	94
4.1.1.1 Barras soldadas con electrodo E6011	94
4.1.1.2 Barras soldadas con electrodo E7018	94
4.1.2 Interpretación de resultados en barras ASTM A 706	95
4.1.1.1 Barras soldadas con electrodo E6011	95
4.1.1.2 Barras soldadas con electrodo E7018	95
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS A TRACCIÓN	96
4.2.1 Efectos del uso de electrodo para la barra corrugada ASTM A 615	99

4.2.2 Efectos del uso de electrodo para la barra corrugada ASTM A 706	101
4.2.3 Comparación de resultados obtenidos de los ensayos a tracción según el tipo de acero y electrodo utilizado	103
4.2.3.1 Comparación en cuanto al alcance de una deformación unitaria máxima	103
4.2.3.2 Comparación en cuanto al alcance de Relación máxima F_{su} / F_y	104
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	106
CONCLUSIONES.....	106
RECOMENDACIONES.....	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Características especiales del electrodo	13
Tabla 2.2: Presentación, Dimensiones y Pesos Nominales de Aceros ASTM A615; SIDERPERU	14
Tabla 2.3: Propiedades Mecánicas de Aceros ASTM A615; SIDERPERU	16
Tabla 2.4: Longitud Total Mínima de Probeta de Tracción de Barra Corrugada	17
Tabla 2.5: Presentación, Dimensiones y Pesos Nominales de Aceros ASTM A706, BELGO 60	18
Tabla 2.6: Propiedades Mecánicas de Aceros ASTM A706, BELGO 60	19
Tabla 2.7: Máxima Composición Química de la Barra Corrugada (Análisis de Producto)	20
Tabla 2.8: Amperaje mínimo y máximo para el electrodo E6011	25
Tabla 2.9: Amperaje mínimo y máximo para el electrodo E7018	25
Tabla 2.10: Comparación de propiedades de los líquidos penetrantes	29
Tabla 3.1: Desalineamiento Máximo Permitido en Juntas a Tope.	47
Tabla 3.2: Composición química de la barra \varnothing 1/2".	48
Tabla 3.3: Composición química de la barra \varnothing 5/8".	51
Tabla 3.4: Composición química de la barra \varnothing 3/4".	53
Tabla 3.5: Composición química de la barra \varnothing 1/2".	55
Tabla 3.6: Composición química de la barra \varnothing 5/8".	57
Tabla 3.7: Composición química de la barra \varnothing 3/4".	59
Tabla 3.8: Resultados de ensayo a tracción de barras soldadas \varnothing 1/2" – Electrodo E6011	81
Tabla 3.9: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas \varnothing 1/2" – Electrodo E7018	81
Tabla 3.10: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas \varnothing 5/8" – Electrodo E6011	82
Tabla 3.11: Resultados de ensayo a tracción de barras soldadas \varnothing 5/8" – Electrodo E7018	83
Tabla 3.12: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas \varnothing 3/4" – Electrodo E6011	84

Tabla 3.13: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas Ø3/4 – Electrodo E7018	85
Tabla 3.14: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldada Ø1/2” – Electrodo E6011	88
Tabla 3.15: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldada Ø1/2” – Electrodo E7018	89
Tabla 3.16: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldada Ø5/8” – Electrodo E6011	90
Tabla 3.17: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldada Ø5/8” – Electrodo E7018	91
Tabla 3.18: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas Ø3/4” – Electrodo E6011	92
Tabla 3.19: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas Ø3/4” – Electrodo E7018	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama del contenido de Carbono contra el Carbono Equivalente	7
Figura 2.2: Esquema de soldadura al arco	10
Figura 2.3: Codificación del electrodo según AWS.	13
Figura 2.4: Probeta para Ensayo de Tracción de Barra Corrugada.	16
Figura 2.5: Soldadura con borde o bisel en “V” y el número de pasadas “n”.	21
Figura 2.6: Ángulos adecuados para la inclinación del electrodo.	27
Figura 2.7: Tipos de Porosidad en la soldadura	38
Figura 2.8: Tipos de inclusiones de escoria, fusión incompleta y falta de penetración.	40
Figura 2.9: Tipos de fisuras en la soldadura según su forma.	41
Figura 2.10: Discontinuidades y defectos en la soldadura de junta a tope directo.	43
Figura 2.11: Diagrama estándar de Esfuerzo - Deformación de barra ensayada a tracción.	46
Figura 3.1: Detalle de corte en miembros de probeta para soldadura a tope directo con borde en “V” en barra de $\varnothing 1/2$ ”	48
Figura 3.2: Detalle de terminado de soldadura a tope directo de barra de $\varnothing 1/2$ ”.	50
Figura 3.3: Detalle de corte en miembros de probeta para soldadura a tope directo con borde en “V” en barra de $\varnothing 5/8$ ”	50
Figura 3.4: Detalle de terminado de soldadura a tope directo de barra de $\varnothing 5/8$ ”.	52
Figura 3.5: Detalle de corte en miembros de probeta para soldadura a tope directo con borde en “V” en barra de $\varnothing 3/4$ ”	53
Figura 3.6: Detalle de terminado de soldadura a tope directo de barra de $\varnothing 3/4$ ”.	55
Figura 3.7: Equipo y materiales necesarios para la elaboración de la prueba por líquidos penetrantes.	61
Figura 3.8: Probeta identificada mediante un código, el cual indica, el número de probeta, diámetro, tipo de acero, y tipo de electrodo.	62
Figura 3.9: Proceso de limpieza de escoria de soldadura con escobilla con cerdas de acero.	62
Figura 3.10: Proceso de limpieza aplicando en primer lugar el solvente (SKC-S) al trapo industrial.	63
Figura 3.11: Proceso de aplicación del líquido penetrante (SKL-SP2)	64
Figura 3.12: Tiempo de penetración de líquido.	64

Figura 3.13: Proceso de limpieza de exceso de penetrante.	65
Figura 3.14: Proceso de aplicación del revelador (SKD-S2)	65
Figura 3.15: Tiempo de revelado, aparecimiento de las discontinuidades de la soldadura.	66
Figura 3.16: proceso de interpretación de resultados de la prueba de tintes o líquidos penetrantes.	67
Figura 3.17: Maquina universal, para ensayo a tracción.	68
Figura 3.18: Esquema de barra para ensayo a tracción.	69
Figura 3.19: Determinación de la medida de la probeta (Lp).	70
Figura 3.20: Registro cargas y deformaciones de la probeta.	70
Figura 3.21: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A615 de \varnothing 1/2" en soldaduras con electrodo E6011	71
Figura 3.22: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A615 de \varnothing 5/8" en soldaduras con electrodo E6011	72
Figura 3.23: Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A615 de \varnothing 3/4" en soldaduras con electrodo E6011	72
Figura 3.24: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A615 de \varnothing 1/2" en soldaduras con electrodo E7018	73
Figura 3.25: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A615 de \varnothing 5/8" en soldaduras con electrodo E7018	74
Figura 3.26: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A615 de \varnothing 3/4" en soldaduras con electrodo E7018	74
Figura 3.27: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A706 de \varnothing 1/2" en soldaduras con electrodo E6011	75
Figura 3.28: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A706 de \varnothing 5/8" en soldaduras con electrodo E6011	76
Figura 3.29: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A706 de \varnothing 3/4" en soldaduras con electrodo E6011	76
Figura 3.30: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A706 de \varnothing 1/2" en soldaduras con electrodo E7018	77
Figura 3.31: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A706 de \varnothing 5/8" en soldaduras con electrodo E7018	77

Figura 3.32: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A706 de \varnothing 3/4" en soldaduras con electrodo E7018	78
Figura 3.33: Probeta soldada para ensayo a tracción de la soldadura.	79
Figura 3.34: Diagrama esfuerzo – deformación de barra ASTM A615 sin soldadura de \varnothing 1/2"	80
Figura 3.35: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 1/2" con electrodo E6011.	81
Figura 3.36: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 1/2" con electrodo E7018.	82
Figura 3.37: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 5/8" con electrodo E6011.	83
Figura 3.38: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 5/8" con electrodo E7018.	84
Figura 3.39: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 3/4" con electrodo E6011.	85
Figura 3.40: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 3/4" con electrodo E7818.	86
Figura 3.41: Diagrama esfuerzo – deformación de barra ASTM A706 sin soldadura \varnothing 1/2"	87
Figura 3.42: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 1/2" con electrodo E6011.	88
Figura 3.43: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 1/2" con electrodo E7018.	89
Figura 3.44: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 5/8" con electrodo E6011.	90
Figura 3.45: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 5/8" con electrodo E7018.	91
Figura 3.46: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 3/4" con electrodo E6011.	92
Figura 3.47: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas \varnothing 3/4" con electrodo E7018.	93
Figura 4.1: Diagrama esfuerzo – deformación de barras testigo sin soldadura \varnothing 1/2", de barras ASTM A 615 y ASTM A 706	96

Figura 4.2: Diagrama esfuerzo – deformación de la comparación de barras de Ø 1/2”, de la normativa ASTM A 615 con soldadura y sin soldadura.	97
Figura 4.3: Diagrama esfuerzo – deformación de la comparación de barras de Ø 1/2”, de la normativa ASTM A 706 con soldadura y sin soldadura.	98
Figura 4.4: Comparación de las deformaciones unitarias máximas alcanzadas, en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso de electrodo.	99
Figura 4.5: Comparación resultados máximos obtenidos de la relación F_{su}/F_y , en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso de electrodo.	100
Figura 4.6: Comparación de las deformaciones unitarias máximas alcanzadas, en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso de electrodo.	101
Figura 4.7: Comparación resultados máximos obtenidos de la relación F_{su}/F_y , en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso de electrodo.	102
Figura 4.8: Comparación de las deformaciones unitarias máximas alcanzadas, en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso del tipo de acero con el electrodo E6011.	103
Figura 4.9: Comparación de las deformaciones unitarias máximas alcanzadas, en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso del tipo de acero con el electrodo E7018.	104
Figura 4.10: Comparación resultados máximos obtenidos de la relación F_{su}/F_y , en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso del tipo de acero con el electrodo E6011.	104
Figura 4.11: Comparación resultados máximos obtenidos de la relación F_{su}/F_y , en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso del tipo de acero con el electrodo E7018.	105

Siglas

ASTM: American Section of the International Association for Testing Materials

NTP: Norma Técnica Peruana

AWS: American Welding Society

SMAW: Shielded Metal Arc Welding

ASM: American Society for Metals

CE: Carbono equivalente

ANSI: American National Standards Institute

END: Ensayo No Destructivo

SAW: Submerged Arc Welding

ZAC: Zona afectada por el Calor

RESUMEN

Se estudia la soldabilidad de las barras de refuerzo producidas de acuerdo con la normativa ASTM A615 (NTP. 341.031) en relación a la soldabilidad del acero corrugado de refuerzo de la normativa ASTM A706 (NTP. 339.186). Se ensayaran a tensión a la falla en una máquina Universal un total de 50 muestras de diámetros de Ø1/2" (# 4), Ø5/8" (# 5) y Ø3/4" (# 6). Las variables consideradas son: tipo de acero, tipos de electrodo, y los tipos de discontinuidades de la soldadura (se evaluara por la prueba de Líquidos Penetrantes). La soldadura de las barras se llevará a cabo siguiendo procedimientos usuales de campo, sin precalentamiento de la barra, sin resecado de los electrodos, sin esmerilar las superficies a unir, etc., así como los establecidos por normativas específicas que aquí se describen. Con los resultados de los ensayos de las barras soldadas y de los valores obtenidos en las curvas esfuerzo-deformación para estas barras se evalúan sus modos de falla y los principales parámetros que definen estas curvas.

Palabras clave: soldabilidad, Acero ASTM A615 y ASTM A706

ABSTRACT

The study of weld ability of the reinforcing bars produced according with the standard ASTM A615 NTP 341 031 in relation with the weld ability of steel rebar strengthening rules NTP. 339,186 (ASTM A706). A total of 50 samples with diameters of # 4, # 5 and # 6 will be tested and because of the tension in a Universal machine they will fail.

The variables considered are: type of steel, type of electrode, and the degree of porosity of the weld (this will be evaluated by the liquid penetrant testing). Welding rods will be developed by following common methods of the field, without preheating of the bar, without resection of the electrodes, without grinding the mating surfaces, etc., as well as those established by specific regulations that are described in the study. With the results of the tests of the welded rods and the values obtained from the stress-strain curves for these bars, it will be evaluated by failure modes and the main parameters that define these curves.

Key words: Weldability, Steel ASTM A615 and ASTM A706

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción, el acero corrugado ASTM A615 Grado 60 (NTP.341.031 G60) es muy utilizado específicamente para las estructuras de concreto armado, el cual se ha fabricado para trabajar conjuntamente con el concreto por su contextura, propiedades físicas, mecánicas y composición química. Sin embargo en nuestro medio también se los utiliza a gran escala en aquellas construcciones donde trabaja en acero puro, siendo este tipo de estructuras como armaduras de grandes vigas o tijerales abovedados y triangulares de techos o coberturas de coliseos, campos deportivos y otros tipos de construcciones.

El problema fundamental que tiene el acero corrugado ASTM A615 Grado 60, radica en su baja capacidad para ser soldado, debido a que cuenta con un alto porcentaje de contenido de carbono; la composición química de la barra y sobre todo el contenido de carbono es importante para lograr que la región soldada sea más resistente que el metal base.

Para saber qué nivel de resistencia alcanza la soldabilidad del acero corrugado ASTM A615 se comparará los resultados de los ensayos a tracción y ensayos por líquidos penetrantes con las del acero corrugado ASTM A706 (NTP. 339.186 G60), dicho acero presenta mejores condiciones en sus propiedades químicas para ser soldado por su menor contenido de carbono. Con el propósito de garantizar la calidad de la unión soldada, se realizará el estudio de la soldabilidad de ambos tipos de acero, para lo cual se elegirán las presentaciones de $\varnothing 1/2''$, $\varnothing 5/8''$, $\varnothing 3/4''$, por tener la disponibilidad de las mismas.

Para conseguir la calidad adecuada de la junta soldada, nos basaremos principalmente en el Código de Soldadura Estructural para Acero de Refuerzo (Structural Welding Code – Reinforcing Steel) ANSI/AWS D1.4 - 2005, de la Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society - AWS). Este código nos indicará el tipo de ensayos a realizar y el criterio de evaluación de los mismos para obtener una junta soldada que cumpla con los requerimientos especificados.

El tipo de junta a evaluar es aquella que presenta la mayor facilidad de ejecución frente a otras propuestas por el mismo código y que a criterio de especialistas en el campo de la construcción civil sería la de mayor utilidad. Esta es la junta a tope directo en forma de V en la posición 1G.

Este estudio verificará y comparará las propiedades de soldabilidad de las barras corrugadas ASTM A 615 (SIDERPERU) frente a las propiedades de soldabilidad de la barra corrugada ASTM A706 (BELGO 60) mediante ensayos a tracción e inspección por líquidos penetrantes de la soldadura. Esto nos permitirá plantear soluciones a los problemas que en la unión soldada se presenten y que atenten contra la calidad e integridad de la misma. Con este fin, se especificarán procedimientos de soldadura para cada presentación estudiada y se realizarán ensayos para verificar la validez de los mismos.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS

En la investigación realizada por Mario E. Rodríguez y Javier Rodríguez Asabay en el tema “SE DEBE EVITAR LA SOLDADURA DE BARRAS DE REFUERZO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO EN ZONAS SISMICAS DE MEXICO” del año 2006 (Pág. 92); establece que la deficiencia de la soldabilidad del acero corrugado ASTM A615 se da por su alto contenido de carbono en su composición química, por lo que concluyen que se debe mejorar y contrarrestar con el uso de electrodos adecuados, tipo de posición en la soldadura, realizando el precalentamiento del acero y el electrodo; ante esto llegan a las siguientes conclusiones más importantes:

- 1) El empleo del precalentamiento y electrodos E9018 en barras soldadas en posición vertical llevó, respecto al caso anterior con electrodos E7018, a ligeras mejoras en la capacidad de deformación y en los valores de la relación F_{su}/F_y . Sin embargo, las capacidades de deformación medidas fueron menores que la mínima recomendada en este estudio, y para barras de diámetros # 10 (31.8 mm) y # 12 (38.1 mm), la relación F_{su}/F_y apenas alcanzó el valor 1.25 recomendado por la AWS y la NTCC-DF-2004, y fue menor que el valor recomendado en este estudio.
- 2) En todas las barras soldadas con electrodos E9018, excepto las barras # 8 (25.4 mm) soldadas en posición horizontal con doble bisel, la falla ocurrió de modo frágil en la soldadura y en la “zona afectada por el calor”. El precalentamiento de 150° C recomendado por la AWS no fue suficiente para evitar en estos casos la falla de las barras soldadas en la “zona afectada por el calor”.

En otra de las investigaciones realizada por Raúl Carlos Hurtado Espejo de la PUCP en su tema de Tesis de pregrado (2011): ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE BARRAS CORRUGADAS DE ACERO PARA CONCRETO REFORZADO BELGO 60 (Pág. 73), concluye que:

- 1) Los valores de dureza encontrados en las diferentes zonas que componen las uniones soldadas están muy por debajo de los 350 HV (Barrido de Durezas), que recomienda la norma ANSI/AWS D1.1-10 para evitar la fisuración en la zona afectada por el calor.
- 2) En las uniones de las barras corrugadas de acero de menor diámetro se debe tener especial cuidado en la técnica y la habilidad del soldador, pues por su pequeño tamaño es más susceptible a presentar discontinuidades de soldadura.
- 3) El cambio de la técnica de soldeo de recta a oscilante permitió el aumento del aporte de calor sin variar las características eléctricas de la soldadura.
- 4) Las barras corrugadas de acero BELGO 60 de diámetros 3/8", 5/8", 3/4" y 1" cumplen con los requerimientos de las normas ASTM A615 Y ASTM A706.
- 5) Los procedimientos propuestos para la unión de estas barras, empleando una junta directa a tope, cumplen con los requerimientos de calificación estipulados por el código ANSI/AWS D1.4-05.
- 6) Finalmente, el cambio de la técnica de soldeo a oscilante provoco la disminución de los valores de dureza de la unión soldada.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Soldabilidad de barras corrugadas de acero.

La soldabilidad de un material viene a ser la facilidad con la que dicho material se puede soldar alcanzando las propiedades mecánicas que se requieren para su operación en servicio.

2.2.1.1 La soldadura

La soldadura es un proceso en donde se realiza la unión de dos piezas de un material, usualmente logrado a través de la fusión, en la cual las piezas son soldadas fundiendo, se puede agregar un material de aporte, que al fundirse forma un charco de material fundido entre las piezas a soldar y, al enfriarse, se convierte en una unión fija a la que se le denomina cordón.

Para poder comprender mejor lo que es la soldadura de metales, tenemos que saber que están constituidos por granos, cada uno de éstos es a su vez hace un arreglo periódico especial de átomos, que da origen a lo que conocemos como retícula cristalina.

Si consideramos ahora un átomo cualquiera en el interior de un grano, el mismo se halla ligado a sus vecinos por fuerzas de enlace, que caracterizan a estos sólidos. Si en estas condiciones ponemos en adecuado contacto dos superficies de este tipo, se establecerán dichos enlaces, constituyendo la superficie así formada algo equivalente a un límite de grano. Es la posibilidad de reproducir este fenómeno en forma controlada, lo que da origen a los procesos de soldadura. (Zuzuki 1982 y Capelli Ghigolino 1987, citado por Quezada 2010)

2.2.1.2 Contenido de Carbono y Carbono Equivalente

El acero es una aleación de carbono con el hierro, de un contenido de carbono entre 0,1 y 1,9 % y puede tener más aleaciones como el azufre, fósforo, manganeso, silicio; siendo uno de los materiales más importante para la construcción. El contenido de

carbono hace que la dureza del material sea alta, y cuando es excesiva limita la ejecución de los trabajos de doblado de las barras.

La capacidad de un material para ser soldado se denomina soldabilidad, depende de la composición química del acero, y se evalúa con el parámetro llamado **Carbono Equivalente (CE)**. Este parámetro se define con expresiones empíricas. Por ejemplo, el Reglamento de Soldadura para aceros de refuerzo ANSI/AWS D1.4-05 emplea la siguiente fórmula para el cálculo del parámetro CE:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} \quad (1)$$

Otra expresión para hallar o evaluar el parámetro Carbono Equivalente (CE) es la siguiente fórmula, el cual está en función de más componentes químicos del acero:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu}{40} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10} \quad (2)$$

Como el parámetro CE está íntimamente ligado con el contenido de carbono en los aceros, se suele utilizar el diagrama **carbono-carbono equivalente** para localizar los aceros de acuerdo a su soldabilidad, que se describe a continuación. Las coordenadas del diagrama son el contenido de carbono en la escala vertical y el carbono equivalente en la escala horizontal. En la Figura 2.1 se muestra el diagrama donde se delimitan tres zonas:

- **La zona I** comprende a los aceros de soldabilidad óptima, los que son aceros con contenidos de carbono sumamente bajos.
- **La zona II** abarca aceros de buena a regular soldabilidad, como por ejemplo el acero ASTM 36, el cual es muy empleado para la construcción de estructuras de acero en nuestro país, y el acero ASTM 706 el cual tiene una regular soldabilidad.
- **La zona III** comprende a los aceros con alto riesgo de falla en el caso de ser soldados. Dentro de esta zona podemos encontrar al acero corrugado de la normativa ASTM A615.

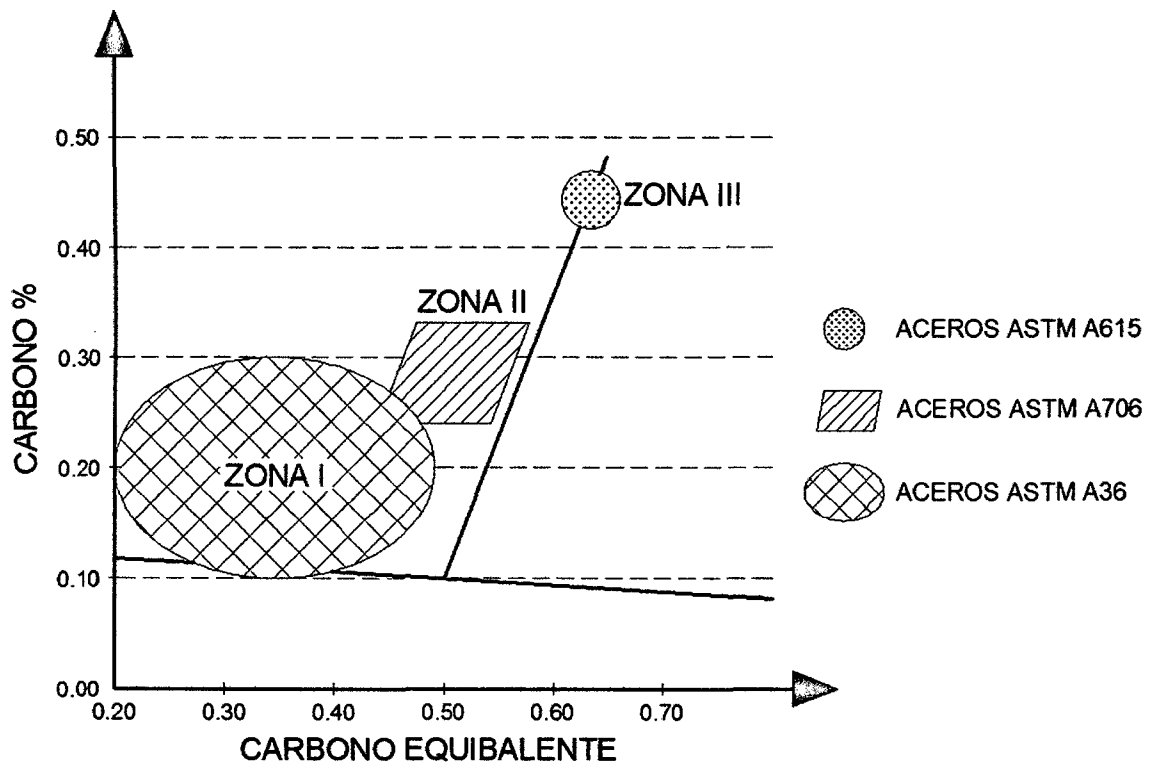


Figura 2.1: Diagrama del contenido de Carbono contra el Carbono Equivalente (Rodríguez y Rodríguez 2006).

Como se aprecia en la Figura 2.1, dependiendo del contenido de carbono y el valor del CE, las varillas de refuerzo producidas en nuestro país de acuerdo con la normativa NTP 341.031 G60 (equivalentes a las normas ASTM A615) pueden tener niveles de soldabilidad de regular a pobre.

En la actualidad en nuestro país, no existen normativas que regulen la soldabilidad de estos tipos de aceros, sobre todo de la barra corrugada de la normativa ASTM A615 (NTP 341.031 G60), por lo que en esta tesis de investigación se intenta evaluar si con estos procedimientos de soldabilidad de ambos tipos de acero podemos ayudar a mejorar la soldabilidad del acero ASTM A615.

2.2.1.3 Influencia de los elementos del acero sobre la soldabilidad

Los elementos del acero corrugado: carbono, manganeso y silicio, juegan papeles muy diferentes según consideremos sus reacciones en el metal fundido o en el metal de base. Suponiendo que la influencia de las impurezas del acero, como azufre, fósforo y nitrógeno es baja, de modo que no se tenga acción directa sobre la soldabilidad del metal de base, en la zona fundida, se tiene el fenómeno de la desoxidación, ya sea por la llama reductora oxiacetilénica o por los elementos reductores del revestimiento de los electrodos, y por los elementos presentes en el acero utilizado como metal de aportación (Quezada 2010). A continuación se presenta los elementos de adición del acero con sus respectivas funciones:

- **Carbono:** El carbono es siempre el elemento base para fijar la soldabilidad. El acero corrugado ASTM A615 (NTP. 341.031 G60) se fabrica con elevado contenido de carbono, que incrementa la capacidad resistente; pero disminuye la ductilidad, afecta la soldabilidad y lo hace inadecuado para las construcciones en zonas sísmicas
- **Manganeso:** El manganeso es un elemento que favorece el temple; hay que limitar su contenido excepto en algunos casos particulares en que se busca la dureza o la resistencia al desgaste. El manganeso anula los efectos perjudiciales del silicio en lo que se refiere a la soldadura, y un aumento de este elemento en el acero produce aumento en la resistencia, en el límite plástico y en el alargamiento.
- **Silicio:** El silicio hace el papel de gran reductor como el manganeso pero, en elevada proporción, actúa sobre la fragilidad de la unión por lo que su contenido debe estar limitado.
- **Níquel:** El níquel es un elemento que favorece el temple; pero sólo en contenidos pequeños (3 al 5%) aumenta la resistencia de la unión sin aumentar demasiado la fragilidad. Interviene sobre todo en los metales de aportación y los aceros de cementación con contenidos bajos en carbono.
- **Cromo:** El cromo asociado con otros elementos (Ni, Mo) aumenta la templabilidad del acero. En los aceros inoxidable el cromo entrega, con el

carbono, un precipitado de carburo de cromo en la unión de los granos disminuyendo su resistencia química a los ácidos.

- **Aluminio:** El aluminio provoca, en el momento de la fusión, la formación de alumina que reduce la soldabilidad operatoria. La intervención de un flujo disolvente de la alumina resulta indispensable para la realización de la unión.
- **Molibdeno:** El molibdeno aumenta el poder templante del acero en el momento de la soldadura, pero su contenido debe estar limitado a bajas concentraciones: 0,25-0,35%.
- **Cobre:** El cobre es soluble en el acero hasta 0,40%; se recomienda no sobrepasar ese límite. Se le atribuye la propiedad de conferir a los aceros de construcción, una mayor resistencia a la corrosión del agua.
- **Azufre y Fósforo (impurezas):** Como impurezas dentro de la soldadura tienen la propiedad de aumentar la resistencia del acero, pero perjudicando la soldabilidad. El fósforo disminuye la resistencia a los golpes y la plasticidad en frío, por lo cual se recomienda no superar 0,1% de esta. Por su parte el azufre también disminuye la resistencia a los golpes considerablemente.

2.2.1.4 Procesos de soldadura

El código ANSI/AWS D1.4-05 recomienda soldar las barras de refuerzo ASTM A 615 y ASTM A 706 utilizar cualquiera de los siguientes procesos:

- Soldadura por Arco con Electrodo Revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW)
- Soldadura por Arco de Metal y Gas (Gas Metal Arc Welding – GMAW), y
- Soldadura por Arco con Núcleo Fundente (Flux Cored Arc Welding – FCAW)

Otros procesos de soldadura pueden ser utilizados siempre y cuando sean aprobados por el Ingeniero Responsable, dado que algunos requerimientos de prueba de calificación especial no cubiertos por el código son cumplidos para asegurar que las soldaduras obtenidas sean satisfactorias para la aplicación requerida. Para nuestro caso, se empleará el proceso de soldadura SMAW por ser el de mayor utilización en nuestro medio.

2.2.1.4.1 Soldadura por Arco con Electrodo Revestido (SMAW)

En el proceso de soldadura por arco eléctrico se produce la fusión localizada del metal base, cuando un arco voltaico es establecido entre la pieza a soldar y un electrodo de características adecuadas. La base detrás del arco eléctrico es la producción de una descarga gaseosa entre un electrodo de carbón y una pieza metálica. Coalescencia: es la capacidad de dos o más materiales de unirse en un único cuerpo.

Como consecuencia del calor generado, se logra una fusión localizada que se emplea para unir piezas. La importancia del arco de soldadura reside en primer lugar, en que el arco eléctrico promueve reacciones químicas intensas que producen entre su atmosfera y el material metálico a alta temperatura. Por otra parte, el arco es responsable de la transferencia metálica desde el extremo metálico hacia el baño fundido. En la Figura 2.2 se muestra el esquema del proceso de Soldadura por Arco con Electrodo Revestido (SMAW).

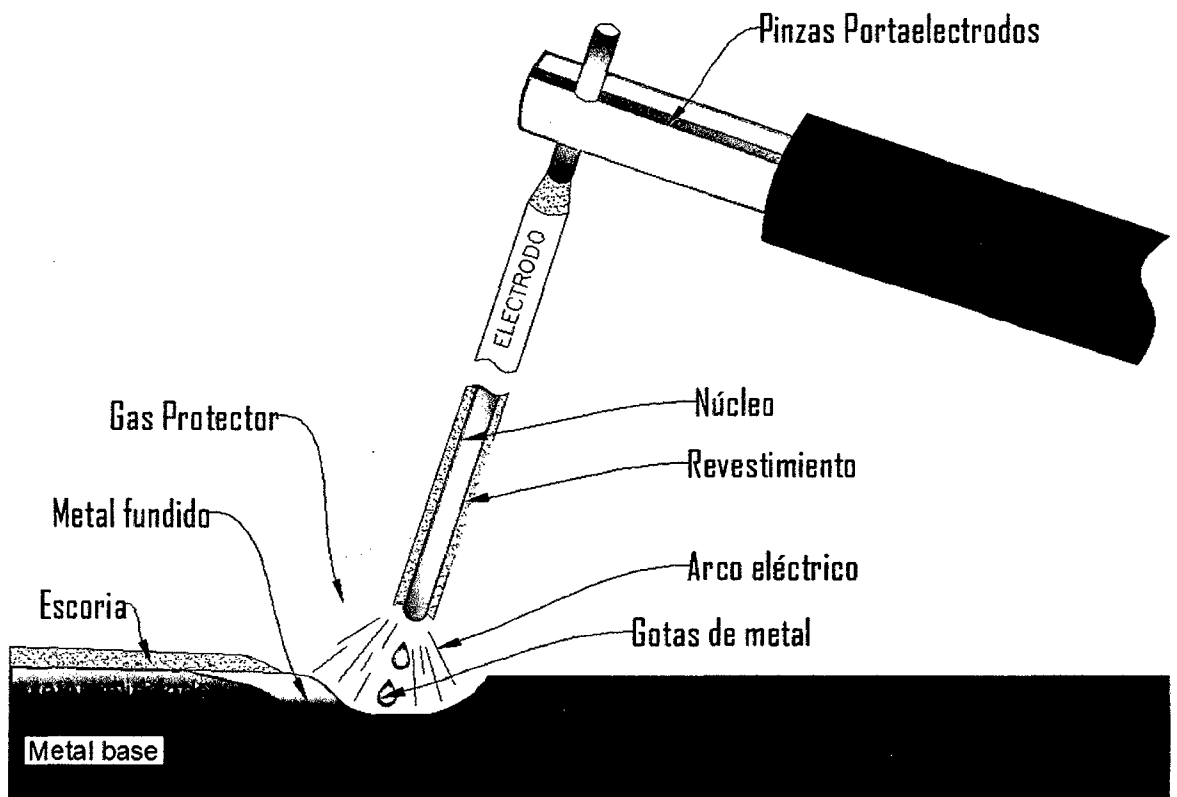


Figura 2.2: Esquema de Soldadura por Arco con Electrodo Revestido (SMAW)

La soldadura con electrodo manual constituye el proceso, que, en la actualidad, cuenta con el mayor porcentaje de material depositado por soldadura. La razón de esto lo constituye la gran versatilidad del método, la gran variedad de materiales que el mismo permite soldar, y las excelentes propiedades mecánicas que se obtienen en las juntas soldadas, si las mismas son ejecutadas adecuadamente.

El proceso consiste en el establecimiento de un arco entre el extremo de un electrodo consumible y la pieza que se suelda. De esta manera, el arco provee la energía térmica necesaria para la fusión de la pieza y del electrodo que se emplea como material de aporte.

Inicialmente, se empleó una varilla de alambre desnudo como electrodo. Las soldaduras así obtenidas, aunque adecuadas para ciertos usos, adolecían en general de marcada fragilidad debido al alto contenido de oxígeno y nitrógeno en el depósito. Esto condujo a la idea de proteger el arco de la contaminación de los gases ambientales mediante una atmósfera reductora provista por un recubrimiento que se puede aplicar al electrodo y que, al quemarse en el arco, brindará la protección adecuada. De este modo nacieron los electrodos revestidos como se les conoce actualmente, aunque los recubrimientos han evolucionado de modo de que en muchos casos, la acción protectora del revestimiento se manifiesta no solamente mediante la formación de una atmósfera reductora sino también por la acción de un manto de escoria que interactúa con el metal a alta temperatura. En la actualidad, las funciones del revestimiento pueden resumirse de la siguiente manera:

- Proteger el arco evitando la contaminación del metal fundido con los gases atmosféricos (especialmente Nitrógeno, Oxígeno e Hidrógeno)
- Proveer una escoria que proteja, refine e interactúe con el metal a alta temperatura, eliminando impurezas e incorporando si es necesario elementos de aleación.
- Proveer elementos cuya volatilización en el arco contribuyan a la estabilidad del mismo (esto es particularmente importante cuando se emplea corriente alterna).
- El revestimiento debe facilitar la soldadura en distintas posiciones: vertical, horizontal y en techo; realizar según su naturaleza, un cordón convexo o cóncavo (soldadura en ángulo interior).

Como se indicó anteriormente, la principal característica del proceso de soldadura por electrodo revestido es la versatilidad. Con una adecuada formulación del revestimiento es posible soldar cualquier posición. El diámetro de los alambres que constituyen las varillas varían entre 0.8-8 mm aproximadamente y su longitud entre unos 35-45 cm. El rango de corrientes varía correspondientemente entre 50 y 350 Amps, que es el máximo que un operador puede controlar sin excesivas dificultades. En electrodos para aceros al carbono y de baja aleación (e incluso en algunos electrodos para acero inoxidable), el alambre empleado es de acero efervescente de bajo carbono (0.1 max. aprox). El agregado de los elementos de aleación al cordón de soldadura se efectúa vía escoria, cargando el revestimiento de los electrodos con las correspondientes ferroaleaciones.

2.2.1.5 Electrodos

Un electrodo es una varilla metálica del material parecido a los elementos a soldar recubierta de un material denominado revestimiento, cuando el arco se ceba, el paso de la corriente provoca el arco eléctrico y funde el metal base mientras el electrodo va formando el baño de fusión. Al solidificarse por disminución de temperatura, forma el cordón de soldadura. El revestimiento puede ser de diferentes materiales como el Rutilo, Óxidos de hierro, hierro en polvo, celulosa, silicatos etc.

La función del revestimiento es muy importante, y cada sustancia realiza una función determinada durante el proceso:

- Actuar de agentes desoxidantes y limpiadores.
- Liberar gases inertes para la protección del baño a oxidaciones.
- Formación de la escoria para la protección de soldadura durante su enfriamiento.
- Facilitar el cebado y mantenimiento del arco eléctrico.
- Aumentar la velocidad de aportación del material.

En cuanto a la denominación de los electrodos hay una normativa realizada por la AWS (American Welding Society) y la ASTM (American Society for Testing of Materials) de forma que independientemente de la marca una serie de electrodos tendrán características similares. En la Figura 2.3 se muestra la codificación del electrodo según la AWS con sus respectivas partes:

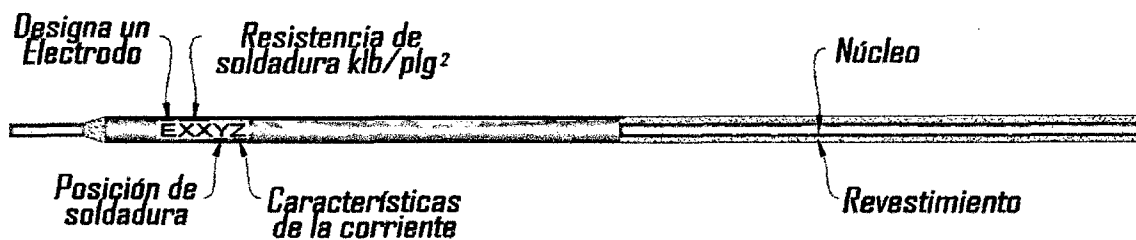


Figura 2.3: Codificación del electrodo según AWS.

A continuación se representa la forma de denominación del código de los electrodos:

1	2	3	4
E	-	XX	X
Soldeo Arco		Resistencia a la tracción	Posición de soldadura
			Otras características

En la columna 3 se indica las posiciones de soldeo.

1	Todas las posiciones
2	Soldaduras en horizontal y en cornisa.
3	Soldadura horizontal.

En la columna 4 se determina una serie de características especiales del propio electrodo. Puede adoptar el valor desde 0 hasta 8.

Tabla 2.1: Características especiales del electrodo

CIFRA	REVESTIMIENTO	CORRIENTE	CARACTERISTICAS
0	celulosa y silicato sódico	cc+	Penetración profunda, cordones planos, fusión rápida.
1	celulosa con silicato potásico	ca, cc+	Penetración profunda, cordones planos y fusión rápida.
2	Rutilo con sales de sodio.	ca, cc-	Penetración media, Cordón convexo.
3	Rutilo con sales de potasio.	ca, cc-,cc+	Penetración media.
4	Rutilo con polvo de hierro	ca, cc+, cc-	Penetración media, gran velocidad de aportación.
5	Básico con sales de sodio.	cc+	Penetración moderada.
6	Básico con sales de potasio.	cc+, ca	Penetración moderada.
7	Con polvo de hierro y óxidos.	ca, cc+, cc-	Penetración media.
8	Básico con polvo de hierro	ca, cc+	Penetración ligera, media.

ca ---- corriente alterna.

cc+ --- polaridad directa (+ a masa)

cc- --- polaridad inversa (- a masa)

Los electrodos utilizados en esta investigación, se han escogido de acuerdo al tipo de acero que se está utilizando, y a los dos tipos de electrodos más utilizados en nuestro medio para estos tipos de aceros y son E6011 y E7018.

2.2.2 Propiedades del material base

2.2.2.1 Acero corrugado ASTM A 615

Las barras corrugadas ASTM A 615 son barras laminadas obtenidas a partir de palanquillas producidas por coladas en lingotes o colada continua, utilizando los procesos de "hogar abierto", básico al oxígeno u hornos eléctricos.

Estas barras, con resalte y lisas, son utilizadas como refuerzo para concreto armado y normalmente no son soldadas.

Dichas barras están disponibles en nuestro mercado en presentación de 9 metros de longitud, según los diámetros nominales mostrados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Presentación, Dimensiones y Pesos Nominales de Aceros ASTM A615;
SIDERPERU

Designación barra N°	Diámetro barra		Sección (mm ²)	Perímetro (mm)	Peso (Kg/m)	Longitud barra (m)
	mm	Pulg.				
---	6	---	28.00	18.80	0.222	9
---	8	---	50.00	25.10	0.395	
3		3/8"	71.00	29.90	0.560	
---	12	---	113.00	37.70	0.888	
4	---	1/2"	129.00	39.90	0.994	
5	---	5/8"	199.00	49.90	1.552	
6	---	3/4"	284.00	59.80	2.235	
8	---	1"	510.00	79.80	3.973	
11	---	1 3/8"	1006.00	112.50	7.907	12

Las barras utilizadas en este estudio son las de designación # 4, # 5 y # 6, que son de $\varnothing 1/2''$, $\varnothing 5/8''$ y $\varnothing 3/4''$ respectivamente, por estar a nuestro alcance.

Estas barras se clasifican de acuerdo a cuatro niveles de resistencia a la fluencia mínima, y son designadas como grado 40 (2800 Kg/cm²), grado 60 (4200 Kg/cm²), grado 75 (5200 Kg/cm²) y grado 80 (5500 Kg/cm²) respectivamente.

Las barras utilizadas en este estudio son las de grado 60 (4200 Kg/cm²) puesto que son las que se usan de forma obligatoria en nuestro mercado local.

La especificación de la barra corrugada, según ASTM A 615, no limita la composición química ni el carbono equivalente (CE). Cuando el acero va a ser soldado, se debe emplear un procedimiento de soldadura adecuado para la composición química y la aplicación particular de cada caso (Rodríguez y Rodríguez 2006).

Con este fin se recomienda el uso de la última versión del código ANSI/AWS D1.4 Código de Soldadura Estructural – Acero Reforzado. Este documento describe la selección adecuada de los procesos de soldadura, temperaturas de precalentamiento e interfase, los materiales de aporte, así como el rendimiento y los requerimientos de calificación del procedimiento.

Propiedades Mecánicas:

Las propiedades mecánicas requeridas para la barra corrugada grado 60 son las que se muestran en la Tabla 2.3.

- Esfuerzo de Tracción, mínimo: 6200 Kg/cm²

- Esfuerzo de Fluencia, mínimo: 4200 Kg/cm²

- Alargamiento en 8 pulg. (203.2 mm), mínimo (%)

Tabla 2.3: Propiedades Mecánicas de Aceros ASTM A615; SIDERPERU

Diámetro Nominal		características mecánicas Valores mínimos			Doblado a 180°
mm	Pulg.	R Mpa(Kg/cm ²)	F Mpa(Kg/cm ²)	% A L = 203 mm	Diámetro de Mandril
---	---	621 (6300)	420 (4200)	9.00	3.5d
8	---				
	3/8"				
12	---				
---	1/2"				
---	5/8"			8.000	5d
---	3/4"				
---	1"				
---	1 3/8"			7.000	7d

F: Límite de fluencia; R: Resistencia a la tracción; A: % de alargamiento; d: Ø de barra

➤ **Ensayo de Tracción**

El ensayo de tracción de la barra corrugada se realiza bajo la norma ASTM A 370 Métodos de Ensayo y Definiciones Estándar para Ensayos Mecánicos de Productos de Acero

➤ **Probeta de Ensayo de Tracción**

Todas las probetas de ensayo deben presentar la sección completa de la barra corrugada, tal como ha sido conformada.

Según la norma ASTM A 370 - 09, las probetas para ensayos de tracción deben ser lo suficientemente largas para proveer 8 Pulg. (203.2 mm) de longitud calibrada, una distancia de por lo menos 2 diámetros de barra entre cada marca de calibración y las mordazas, más una longitud adicional suficiente para llenar las mordazas completamente dejando alguna longitud de exceso que sobresalga más allá de cada mordaza. Un esquema de la probeta se muestra en la Figura 2.4:

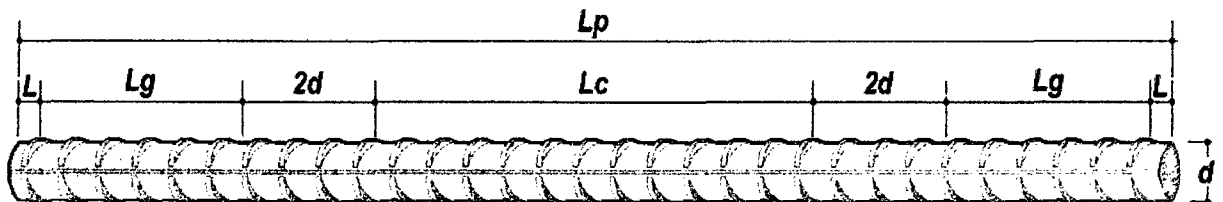


Figura 2.4: Probeta para Ensayo de Tracción de Barra Corrugada.

Donde:

L: longitud de exceso

Lg: longitud de la mordaza

2d: dos veces el diámetro nominal de la barra corrugada

Lc: longitud calibrada

Lp: longitud total de la probeta

La Tabla 2.4, muestra los valores de L, Lg, 2d, Lc y la longitud mínima de probeta, calculados para cada diámetro de barra corrugada utilizada en el estudio.

Tabla 2.4: Longitud Total Mínima de Probeta de Tracción de Barra Corrugada

Nº de Designación de Barra	L (mm)	Lg (mm)	2d (mm)	Lc (mm)	Longitud Total Mín. (mm)
# 4 (Ø 1/2")	6.00	69.00	25.40	203.20	303.60
# 5 (Ø 5/8")	6.00	69.00	31.80	203.20	310.00
# 6 (Ø 3/4")	6.00	69.00	38.20	203.20	316.40

Para nuestra investigación tomaremos una probeta estándar para todos los diámetros en estudio de una longitud total aproximada de 45 cm con una longitud mínima de 10 cm entre mordazas de la máquina Universal.

Composición Química:

El fabricante deberá hacer un análisis de cada colada a partir de probetas tomadas preferentemente durante el vaciado de las coladas. Se deberá determinar los porcentajes de carbono, manganeso, fósforo y azufre. El contenido de fósforo no deberá exceder el 0,06%. Un comprador podrá hacer un análisis de las barras terminadas. El contenido de fósforo así determinado no deberá exceder aquel especificado en el párrafo anterior por más del 25% (NTP 341.031 G60 2008).

Dimensión y Peso:

Las barras corrugadas reforzadas deben ser evaluadas sobre la base de su peso nominal. El peso determinado usando el peso medido de la probeta de ensayo y redondeado en concordancia con la Norma ASTM E 29, debe ser por lo menos 94% del peso aplicable por unidad de longitud (NTP 341.031 G60 2008).

2.2.2.2 Acero corrugado ASTM A 706

Las barras corrugadas ASTM A 706 son utilizadas para concreto reforzado, son fabricadas con aceros de baja aleación, y están orientadas a aplicaciones donde las propiedades mecánicas y la composición química restringidas son requeridas para cumplir con aplicaciones de propiedad tensil controlada o para mejorar la soldabilidad. Dichas barras son utilizadas como refuerzo para concreto y donde se requiera el soldado de estructuras, en la Tabla 2.5 se muestra las dimensiones y pesos nominales de dichas barras.

Tabla 2.5: Presentación, Dimensiones y Pesos Nominales de Aceros ASTM A706, BELGO 60

Designación barra N°	Diámetro barra		Sección (mm ²)	Perímetro (mm)	Peso (Kg/m)	Longitud barra (m)
	mm	Pulg.				
---	6	---	28.00	18.80	0.222	9
---	8	---	50.00	25.10	0.395	
3	---	3/8"	71.00	29.90	0.560	
---	12	---	113.00	37.70	0.888	
4	---	1/2"	129.00	39.90	0.994	
5	---	5/8"	199.00	49.90	1.552	
6	---	3/4"	284.00	59.80	2.235	
8	---	1"	510.00	79.80	3.973	
11	---	1 3/8"	1006.00	112.50	7.907	

Las barras utilizadas en este estudio son las de designación # 3, # 4 y # 5, que son de Ø 3/8", Ø 1/2" y Ø 5/8" respectivamente, por estar a nuestro alcance. Las barras que utilizaremos son de fluencia mínima, designada como grado 60 (4200 Kg/cm²).

La especificación de la barra corrugada, según ASTM A 706, limita las propiedades mecánicas para proveer las propiedades de fluencia y de tracción deseadas para aplicaciones de propiedad tensil controlada.

Esta especificación limita también la composición química y el carbono equivalente (CE) con el fin de mejorar la soldabilidad del material (estos valores no se encuentran limitados en el caso de la barra corrugada ASTM A 615). Cuando el acero va a ser soldado, se debe emplear un procedimiento de soldadura adecuado para la composición química y la aplicación particular de cada caso.

Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas requeridas para la barra corrugada grado 60 son las que se muestran en la Tabla 2.6:

- Esfuerzo de Tracción, mínimo: 5500 Kg/cm² (El Esfuerzo de Tracción no debe ser menor a 1.25 veces el Esfuerzo de Fluencia Real)
- Esfuerzo de Fluencia, mínimo: 4200 Kg/cm²
- Esfuerzo de Fluencia, máximo: 5400 Kg/cm²
- Alargamiento en 8 pulg. [203.2 mm], mínimo (%)

Tabla 2.6: Propiedades Mecánicas de Aceros ASTM A706, BELGO 60

Diámetro Nominal		características mecánicas Valores mínimos			Doblado 180°	Relación R/fy
mm	Pulg.	Resistencia a la tracción. (R) Kg/cm ²	Límite de Fluencia (fy) Kg/cm ²	Alargamiento % A L = 203.2 mm	Diámetro de Mandril	
6	---	6200 Kg/cm ²	4200 Kg/cm ²	9%	3.5d	≥ 1.25
8	---					
	3/8"	5500 Kg/cm ²	4200 -5400. Kg/cm ²	14%	3d	
12	---					
---	1/2"					
---	5/8"					
---	3/4"			4d		
---	1"					
---	1 3/8"	12%	6d			

d: diámetro nominal de la muestra

➤ Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción de la barra corrugada se realiza bajo la norma ASTM A 370 Métodos de Ensayo y Definiciones Estándar para Ensayos Mecánicos de Productos de Acero.

➤ Probeta de Ensayo de Tracción

Las probetas del ensayo de tracción son similares que para el caso de las barras corrugadas ASTM A 615, descritas anteriormente.

Composición Química

Los porcentajes para el Análisis de Colada no deben exceder los valores de la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Máxima Composición Química de la Barra Corrugada (Análisis de Producto)

Elemento	% máximo
Carbono	0.33
Manganeso	1.56
Fósforo	0.043
Azufre	0.053
Silicio	0.55

Los microaleantes que se encuentran son: Manganeso, Silicio, Cobre, Niquel, Cromo, Molibdeno, Vanadio, Columbion, Titanio y Zirconio.

El análisis de colada debe ser tal que provea un carbono equivalente (C.E.) no mayor a 0.55%, calculado con la Fórmula (2).

Dimensiones y Peso

Las barras corrugadas reforzadas deben ser evaluadas sobre la base de su peso nominal. El peso determinado usando el peso medido de la probeta de ensayo y redondeado en concordancia con la Norma ASTM E 29, debe ser por lo menos 94% del peso aplicable por unidad de longitud prescrita en la Tabla 2.5. En ningún caso el sobrepeso de una barra corrugada debe ser causa de rechazo (NTP 341.031 G60, 2008, P.10).

2.2.3 Soldabilidad del material base

Para evaluar la soldabilidad de ambos tipos de aceros con los tipos de electrodos utilizados, los procedimientos de soldadura se realizarán siguiendo los lineamientos establecidos por el código ANSI/AWS D1.4-05.

El tipo de junta que se utilizará para este estudio se seleccionará de las juntas recomendadas por el código AWS D1.4 – 05. El tipo de junta es el de borde en “V” con ángulos que oscilan entre 45° a 60°, por ser la más empleada en nuestro medio, la posición de soldadura es 1G y la distancia entre bordes inferiores de los miembros de la probeta será de 2 a 3 milímetros.

El ángulo escogido para este estudio es de 60° y la distancia entre bordes inferiores de ambas barras de la probeta es de 3 mm como se indica en la Figura 2.5.

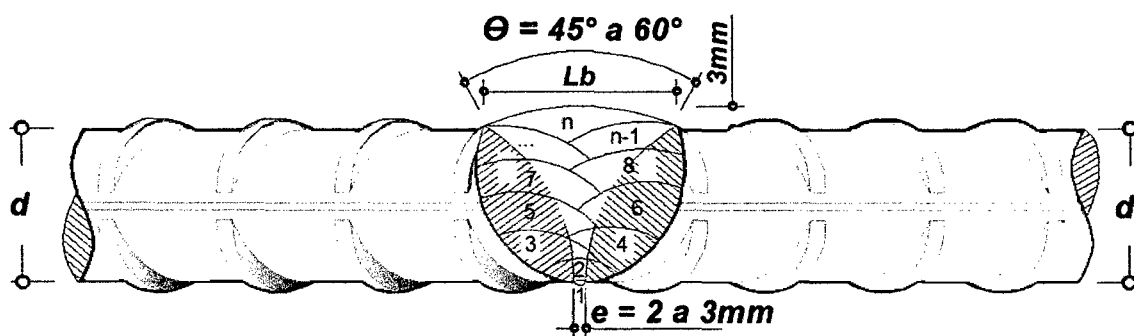


Figura 2.5: Soldadura con borde o bisel en “V” y el número de pasadas “n”.

La longitud de bisel (Lb) está en función del ángulo escogido, el espaciamiento (e) y el diámetro de la barra, dicha longitud de bisel Lb se calculará empleando la siguiente formula:

$$Lb = 2d \operatorname{Tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) + e \quad (3)$$

Donde:

Lb : longitud total de bisel.

d : Diámetro de la barra.

Θ : Angulo de borde en V

e : Espaciamiento entre bordes inferiores.

2.2.3.1 Soldabilidad del acero corrugado ASTM A 615

El acero corrugado ASTM A615 (NTP 341.031 G60) es un acero con un alto contenido de carbono, lo que dificulta su soldabilidad. La soldadura del acero de refuerzo en el Perú se realiza, en la mayor parte de los casos, sin tomar en cuenta las recomendaciones especificadas por la AWS, además que no existe una normativa en nuestro país que regule la soldabilidad de este tipo de aceros. En general, el proceso de soldadura de barras de refuerzo se realiza en el lugar donde se desarrolla la obra, con una supervisión deficiente para el proceso y una baja calificación de los soldadores.

Los problemas de poca soldabilidad generalmente aparecen en los aceros con un contenido de carbono mayor que 0.45%, ya que en este caso se requiere generalmente un precalentamiento o un postcalentado para reducir los efectos provocados por el calor en las propiedades mecánicas del acero (Rodríguez y Rodríguez, 2006, P.73).

Otro aspecto importante que influye en la calidad de barras de refuerzo soldadas es que la norma NTP 341.031 G60, con la cual se fabrican las barras empleadas en nuestro país, no estipula límites de contenido de carbono en este tipo de barras, lo que llevaría a tener en nuestro país barras de refuerzo de los tipos medio o alto carbono anteriormente descritos, con lo cual estas barras tendrían limitaciones importantes para lograr una calidad adecuada de soldadura.

2.2.3.1.1 Procesos de Soldadura

Tomando en cuenta el código ANSI/AWS D1.4-05 soldaremos las barras corrugadas ASTM A 615 utilizando el proceso de Soldadura por Arco con Electrodo Revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW); siendo el más utilizado en nuestro medio.

2.2.3.1.2 Cálculo del Carbono Equivalente (CE) de las barras corrugadas

Para el caso de la barra corrugada ASTM A 615, el valor del Carbono Equivalente (CE) se calculará con la Fórmula (1).

2.2.3.1.3 Material de Aporte

Los electrodos de Soldadura por Arco con Electrodo Revestido – SMAW, deben cumplir los requerimientos de la última edición de ANSI/AWS A5.1, Especificación para Electrodos de Acero al Carbono para Soldadura de Arco con Electrodo Revestido, o los requerimientos de ANSI/AWS A5.5, Especificación para Electrodos de Acero de Baja Aleación para Soldaduras de Arco con Electrodo Revestido.

Cuando se unen aceros de diferente grado, el metal de aporte debe ser seleccionado en base al acero de menor resistencia a la tracción.

En el presente estudio nos limitaremos a revisar los electrodos del proceso SMAW por ser el empleado en el mismo, los materiales de aporte o electrodos utilizados en esta investigación son E6011 y E7018, por encontrarse en el mercado y por ser los más utilizados en nuestro medio.

Las condiciones de Almacenamiento de los Electrodos de Bajo Hidrógeno, de acuerdo con ANSI/AWS A5.1 y ANSI/AWS A5.5, deben ser vendidos en contenedores herméticamente sellados o deben ser resecados antes de ser usados. Inmediatamente después de abrir el contenedor herméticamente sellado, los electrodos deben ser almacenados en hornos que mantengan una temperatura de por lo menos 120°C. Sin embargo esta recomendación en la práctica no se considera.

2.2.3.2 Soldabilidad del Acero corrugado ASTM A 706

2.2.3.2.1 Procesos de Soldadura

Los procesos de soldadura recomendados por el código ANSI/AWS D1.4-05 para soldar barras corrugadas ASTM A 706, son los mismos que los recomendados para el caso de barras corrugadas ASTM A 615.

2.2.3.1.2 Cálculo del Carbono Equivalente (CE) de las barras corrugadas

Para el caso de la barra corrugada ASTM A 706, el valor del Carbono Equivalente (CE) se calculará con la Fórmula (2).

2.2.3.1.3 Material de Aporte

El material de aporte para la soldadura de barras ASTM A 706 sigue criterios similares a los empleados para la soldadura de barras ASTM A 615, los cuales se describieron anteriormente.

2.2.4 Factores fundamentales para obtener una buena soldadura

Los siguientes factores son determinantes para obtener una buena junta en la soldadura eléctrica:

- Electrodo apropiados para el trabajo, secos y bien conservados.
- Amperaje correcto.
- Longitud adecuada del arco.
- Apropiado ángulo de inclinación del electrodo.
- Apropiada velocidad de avance.
- Juntas limpias, libres de óxido, aceite y grasa.

2.2.4.1 Electrodo apropiados para el trabajo

Es muy importante seleccionar correctamente el tipo y diámetro del electrodo apropiado para el trabajo a realizarse. Los electrodos de bajo contenido de hidrógeno fabricados con las especificaciones de AWS A5.1, deberán adquirirse en envase herméticamente sellados o serán secados durante dos horas por lo menos en un horno a temperatura entre 230°C y 260°C, antes de usarlos. No deberán usarse electrodos que se hayan humedecido (Manual SOLDEXA, 7° Edición, P.65)

2.2.4.2 Amperaje correcto para soldar

La regulación de la máquina es de decisiva importancia para obtener buenas juntas de soldadura. A cada diámetro de los electrodos corresponde determinada escala de amperaje, desde un amperaje mínimo hasta un amperaje máximo. El soldador debe encontrar el amperaje adecuado para su trabajo, regulando la máquina entre amperaje mínimo y máximo señalado por el fabricante para cada tipo de electrodo.

2.2.4.2.1 Un amperaje insuficiente

Dificulta mantener el arco, produce abultamiento del material y mala penetración.

2.2.4.2.2 Un amperaje excesivo

Tiene como consecuencia un cordón chato y con porosidades, produce recalentamiento del electrodo y mucha salpicadura.

En la Tabla 2.8 y 2.9 se muestra los parámetros de soldeo recomendados por el Manual de Soldadura SOLDEXA para los electrodos E6011 y E7018 respectivamente, los cuales están en función de su diámetro.

Tabla 2.8: Amperaje mínimo y máximo para el electrodo E6011

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	(mm)	1.60	2.50	3.25	4.00	5.00	6.30
	(pulgadas)	1/15	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo		30	50	80	110	140	180
Amperaje máximo		45	70	120	150	200	250

Tabla 2.9: Amperaje mínimo y máximo para el electrodo E7018

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	(mm)	1.60	2.50	3.25	4.00	5.00	6.30
	(pulgadas)	1/15	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo		-	60	90	120	170	210
Amperaje máximo		-	90	140	190	240	280

2.2.4.3 Longitud adecuada del arco

La longitud del arco, aunque no es posible determinarla en mm o fracciones de pulgada, se mide por los resultados de deposición del metal, o sea por la forma del cordón y también por el comportamiento del arco (Manual SOLDEXA, 7° Edición, P.65).

2.2.4.3.1 Una longitud muy corta

Produce cordones con sopladuras e inclusiones de escoria, de poca penetración, gruesas e irregulares. El arco se interrumpe y el electrodo muestra tendencia a pegarse al metal base.

2.2.4.3.2 Una longitud muy larga

Trae como consecuencia un apreciable aumento de salpicaduras; la penetración es insuficiente, el cordón presenta sobremontas y es de un ancho indeseable. Además, en muchos casos el cordón resulta poroso.

2.2.4.4 Apropiado ángulo de inclinación del electrodo

El ángulo de inclinación del electrodo con respecto a la pieza de trabajo influye sobre la forma y aspecto del cordón y también sobre su penetración; de ahí la necesidad de trabajar con un ángulo de inclinación correcto (Manual SOLDEXA, 7° Edición, P.65).

2.2.4.4.1 Un ángulo demasiado cerrado

Trae como consecuencia una deposición excesiva de metal de aporte, mala conformación del cordón y penetración inadecuada.

2.2.4.4.2 Un ángulo demasiado abierto

Producirá ondulaciones pronunciadas en el cordón con formación de crestas. El cordón resulta irregular, porque por acción del soplado la escoria es expulsada y no recubre bien.

En la Figura 2.6 se muestra en la posición de soldadura horizontal, los ángulos adecuados de inclinación para el electrodo.

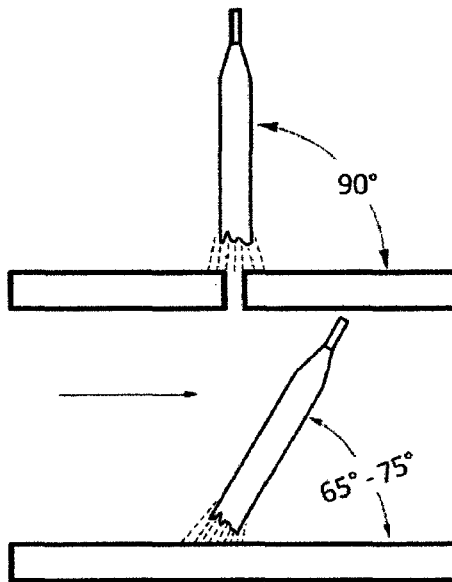


Figura 2.6: Ángulos adecuados para la inclinación del electrodo.

2.2.4.5 Apropriada velocidad de avance

Una lenta o excesiva velocidad de avance del electrodo produce defectos en la soldadura, razón para buscar un avance apropiado que produzca buenas juntas soldadas (Manual SOLDEXA, 7° Edición, P.65).

2.2.4.5.1 Una velocidad muy lenta

Produce abultamiento del metal de deposición, desbordándose sobre la plancha. Puede ser causa de incrustaciones de escoria en la junta soldada.

2.2.4.5.2 Una velocidad excesiva

Produce un cordón delgado, de aspecto fibroso, con poca penetración, deficiente fusión del metal y muchas porosidades.

2.2.5 Recomendaciones de la Norma AWS (American Welding Society) para soldaduras

2.2.5.1 Esfuerzo en la soldadura

Los esfuerzos en la soldadura estarán dadas por aquellas solicitaciones de tensión admisible a tracción o compresión en las uniones tope directo con juntas de penetración completos y soldaduras acanaladas en V, deberá ser el mismo que el esfuerzo de fluencia correspondiente al metal base, bajo la condición de que el metal de aporte usado tenga una resistencia a la tracción que por lo menos sea igual a la del material que se está soldando.

2.2.5.1.1 Esfuerzos Admisibles

➤ Esfuerzos en el Material Base

Los esfuerzos admisibles en el metal base deben ser aquellos especificados en el código aplicable o especificación general para la construcción de concreto reforzado.

➤ Esfuerzos Admisibles en la Soldadura

Los esfuerzos admisibles para soldaduras de canal o en bisel en V de juntas de penetración completa, en juntas directas a tope sujetas a tracción o compresión deben ser igual a los correspondientes esfuerzos admisibles para el metal base de acero reforzado, considerando que el metal de aporte usado tenga una clasificación de resistencia por lo menos igual al esfuerzo de tracción del metal base a ser soldado.

2.2.5.2 Áreas, Longitudes, Gargantas y Dimensiones Efectivas de Soldadura

➤ Soldaduras en canal de juntas de penetración completa en juntas directas a tope.- El área de soldadura efectiva debe ser el área de sección transversal nominal de la barra a ser soldada. Si las barras de diferente tamaño son soldadas, el área de soldadura debe estar basada en la barra de menor tamaño (ver Figura 2.5).

➤ Soldaduras en canal con bisel acampanado y en V acampanada. El área de soldadura efectiva debe ser la longitud de soldadura efectiva multiplicada por el tamaño de soldadura efectivo (ver Figura 2.5).

2.2.6 Inspección de la soldadura

2.2.6.1 Inspección de la soldadura por líquidos penetrantes

El ensayo por líquidos penetrantes se refiere a un ensayo no destructivo (END) de tipo fisicoquímico que funciona bajo el fenómeno de capilaridad y así permite detectar, localizar, identificar y dar una idea en las dimensiones de las discontinuidades *superficiales* que se presentan en la pieza sometida a dicho ensayo.

2.2.6.1.1 Características de los líquidos penetrantes.

El líquido penetrante tiene la propiedad de penetrar en cualquier abertura u orificio en la superficie del material (Alvarado, 2009, P.46). El penetrante ideal debe reunir lo siguiente:

- Habilidad para penetrar orificios y aberturas muy pequeñas y estrechas.
- Habilidad de permanecer en aberturas amplias.
- Habilidad de mantener color o la fluorescencia.
- Habilidad de extenderse en capas muy finas.
- Resistencia a la evaporación.
- De fácil remoción de la superficie.
- De difícil eliminación una vez dentro de la discontinuidad.
- De fácil absorción de la discontinuidad.
- No tóxico.
- No corrosivo.
- Anti inflamable.
- Estable bajo condiciones de almacenamiento.

Tabla 2.10: Comparación de propiedades de los líquidos penetrantes

PROPIEDAD FISICA	PENETRANTE	REVELADOR
Capilaridad	Alta	Baja
Tensión Superficial	Baja	Alta
Adherencia	Baja	Alta
Cohesión	Baja	Alta
Viscosidad	Baja	Alta
Partículas	Pequeñas	Grandes

2.2.6.1.2 Definiciones

Para obtener las características descritas y la sensibilidad adecuada el penetrante debe presentar un balance correcto de sus propiedades físicas, las principales características físicas son:

- *Adherencia:* Es la fuerza de atracción entre moléculas de sustancias distintas.
- *Cohesión:* Es la fuerza que mantiene a las moléculas de una misma sustancia a una distancia determinada unas de otras. Como ejemplo podemos decir que los sólidos tienen alta cohesión, en comparación de los líquidos; a su vez, los líquidos tienen mayor cohesión que los gases.
- *Tensión superficial:* Es una de las propiedades más importantes. Se requiere una tensión superficial baja para obtener buenas propiedades de penetración y mojado.
- *Capilaridad:* La capilaridad y la humectabilidad determinan el poder de penetración de un líquido a través de las discontinuidades. Cuando existe contacto entre un líquido y una pared sólida, la altura o depresión en un tubo capilar vertical está determinada por el ángulo de contacto formado por el líquido y la pared del tubo. Si el ángulo de contacto es menor de 90° el menisco del líquido en el tubo es cóncavo; entonces el líquido asciende por el tubo, el ángulo es igual a 90° , no existe aumento ni disminución capilar. Si el ángulo de contacto es mayor a 90° , el líquido no humedece la pared del tubo, el menisco formado es convexo y por ello el líquido desciende en el tubo.
- *Poder humectante:* El penetrador debe ser capaz de mojar completamente la superficie del material y es una de las propiedades más importantes. Esto se refiere al ángulo de contacto del líquido con la superficie, el cual debe ser lo más bajo posible.
- *Viscosidad:* Esta propiedad no produce efecto alguno en la habilidad del líquido para penetrar, aunque afecta la velocidad de penetración. Los penetrantes de alta viscosidad penetran lentamente, en tanto que los de baja viscosidades escurren muy rápido y tiene la tendencia a no ser retenidos en los defectos de poca profundidad; por lo tanto se recomienda una viscosidad media.

- *Inactividad química:* Los productos usados en la formulación de los líquidos penetrantes deben ser inertes y no corrosivos respecto a los materiales a ser ensayados y a los recipientes que los contienen.
- *Capacidad de disolución:* El penetrante debe tener una elevada capacidad para contener grandes concentraciones de pigmentos coloreados o fluorescentes usados y mantenerlos en solución.
- *Volatilidad:* Es una característica definida por la presión de vapor y el punto de ebullición de un líquido. Es recomendable una baja volatilidad del penetrante para evitar las pérdidas por evaporación en tanques abiertos. Un penetrante de alta volatilidad se secará más rápidamente en la superficie de la pieza de prueba cuando se utilicen materiales con bajo punto de inflamación y/o tóxicos. La volatilidad será una consideración de seguridad.

2.2.6.2 Líquidos penetrantes visibles removibles con solvente

Debido a que los penetrantes deben ser visibles después de que han sido extraídos por el revelador, en éste método se emplea por lo general un pigmento de color rojo, que produce un alto contraste con un fondo color blanco, los pigmentos rojos se obtienen con facilidad en una amplia gama de tonos, son baratos y fáciles de mezclar con aceite (Casasola, 2008, P.78).

Ventajas.

- No requiere suministro de agua.
- Se puede aplicar donde no sea permisible o resulte impráctica una operación de enjuague.
- Es práctico su empleo para inspeccionar solamente una pequeña porción de un gran ensamble o de una pieza muy grande.
- No requiere de luz ultravioleta o áreas de examinación semi-oscuras.

Limitaciones.

- Sólo es aplicable a piezas con acabado liso.
- Su aplicación es impráctica y en ocasiones imposible en superficies con acabado burdo.
- No es muy sensible para detectar discontinuidades poco profundas y anchas.
- El proceso de remoción generalmente ocupa mayor tiempo.

- No es costoso su aplicación al inspeccionar grandes cantidades de piezas.

2.2.6.2.1 Penetrante eliminable con disolvente

Cuando se necesita inspeccionar superficies lisas o solamente una pequeña sección de la pieza, es conveniente el empleo de penetrantes removibles con solvente. Normalmente, se utiliza el mismo solvente para pre-limpieza y para la remoción del exceso de penetrante.

Este grupo comprende los penetrantes removibles con agua y los penetrantes posemulsificables. Es utilizado un solvente como el medio de lavado en vez de agua. La expresión “removibles con solventes” se refiere al proceso y no propiamente a un tipo específico del penetrante.

2.2.6.2.2 Revelador con base disolvente

La cantidad de penetrante que emerge de una discontinuidad superficial es muy reducida por lo que es necesario ampliar su visibilidad. Los reveladores están diseñados de tal forma que extraen el penetrante atrapado en las discontinuidades para que sean visibles al ojo humano. La acción del revelador es una combinación de tres efectos: solvencia, adsorción y absorción. Cuando el penetrante se dispersa a través del polvo revelador, puede ser fácilmente observado. En el caso de los reveladores en suspensión no acuosa, la acción solvente juega un papel importante para promover la extracción del penetrante de las discontinuidades y el mejoramiento de las indicaciones.

Propiedades del revelador

Para un buen funcionamiento, el revelador debe de poseer las siguientes características:

- Alto poder de absorción del penetrante
- Un tamaño de partícula adecuado, para una buena dispersión.
- Ser capaz de eliminar colores que interfieran con el fondo y proporcionar un buen contraste con las indicaciones.
- No debe de ser fluorescente si se aplica con penetrantes fluorescentes, ni debe filtrar la luz ultravioleta empleada para la inspección.
- No deben de tener ingredientes que dañen las piezas inspeccionadas o el equipo empleado en el procedimiento de la inspección.
- No deben de ser tóxicos para el operador.
- Visible con la luz normal.

2.2.6.2.3 Técnica de aplicación de los líquidos penetrantes del tipo eliminable con disolvente y revelador con base disolvente.

Documentos aplicables: ASTM E 165, Método de inspección mediante Líquidos Penetrantes.

Tiempo de aplicación de la prueba

El elemento a examinar se le aplicara la prueba de líquidos penetrantes una vez que este se encuentre terminado, esto significa que procesos como el maquinado, tratamiento térmico, soldadura u otros hayan sido concluidos.

Preparación de la superficie

La superficie del material o elemento a inspeccionar así como su área adyacente a una distancia no menos de 1" (25 mm) de esa misma superficie a examinar, debe estar limpia y completamente seca antes de la prueba, libre de escoria, escamas de laminado, fundente, salpicaduras de soldadura, polvo, pintura, inclusiones de arena, agua, grasa, aceite, oxido o cualquier otro material extraño que pueda interferir en la prueba, de tal forma que el acabado de la superficie permita una interpretación apropiada de los resultados de la prueba.

Actividades específicas (Alvarado, 2009, P.70)

➤ **Prelimpieza**

Las superficies que se van a examinar podrán encontrarse en la condición tal como fue soldado, rolado, fundido o forjado el material. En la preparación de la limpieza de la superficie se podrá aplicar algún medio mecánico como cepillo de alambre o carda. Podrá utilizarse el esmerilado, maquinado u otro medio cuando las irregularidades superficiales puedan enmascarar las indicaciones inaceptables.

La limpieza final antes de la aplicación del penetrante, se realizará frotando la superficie con un paño limpio y seco libre de hilos y de pelusa.

La superficie se deberá secar por evaporación normal. La temperatura del área de inspección deberá mantenerse en el rango establecido.

En esta investigación se utilizará un limpiador especial denominado Nonddestructive Testing Material (SKC-S)

➤ **Aplicación del penetrante**

Durante el proceso de inspección por líquidos penetrantes, la temperatura del elemento a inspeccionar se deberá de mantener dentro de los siguientes rangos:

Tipo de Penetrante Rango de temperatura, Visible 16 °C – 52 °C

Después de la preparación de la superficie, el penetrante podrá ser aplicado ya sea por atomización o brocha.

El tiempo de penetración será el que se recomienda por el fabricante.

Si el penetrante llegara a secarse, deberá de repetirse las operaciones.

➤ **Remoción del exceso de penetrante**

El exceso de penetrante de remoción con solvente deberá de removerse frotando un paño o papel absorbente limpio, hasta que se haya removido las trazas del penetrante.

Los residuos de las marcas de penetrante se removerán con un paño o papel humedecidos con el solvente.

Se evitará el uso excesivo de solvente. Queda absolutamente prohibido la remoción del penetrante en forma directa de flujo u atomizado.

➤ **Secado**

El secado será hecho por evaporación a temperatura ambiente.

El tiempo de evaporación estará en el rango de entre un mínimo de 5 y un máximo de 10 minutos. Cuando se utilice un revelador húmedo de base agua, la pieza no se secura hasta que el revelador haya sido aplicado.

➤ **Revelado**

Después de removido el penetrante y de haber pasado el tiempo de secado, se aplicara un revelador para atraer el penetrante que haya quedado en las discontinuidades.

Cuando se utilice un revelador húmedo base agua, este se aplicara después de la remoción del penetrante y antes del secado.

El tiempo mínimo de revelado será el establecido por el fabricante.

El revelador se aplicará en un intervalo de tiempo no mayor a 15 minutos después de la remoción del penetrante.

El revelador que se encuentre en suspensión de agua, se aplicara por atomización, dejando una cubierta delgada y uniforme sobre la superficie.

Las suspensiones de revelador en solvente se aplicarán por atomización y se deberá obtener una cubierta delgada y uniforme sobre la superficie que se esté examinando.

Se debe evitar que el revelador húmedo se encharque en las cavidades de la pieza que se esté examinando. Cuando se formen estos excesos de revelador formando charcos, estos no se deberán de examinar.

El secado del revelador sobre la superficie del material a examinar, se hará por evaporación normal.

➤ Examen

El examen de líquidos penetrantes visibles se tendrá que elaborar con luz de día o luz artificial que tenga la suficiente intensidad para poder observar las indicaciones presentadas.

El examen se realizara después de que el penetrante sea absorbido por el revelador. Este examen se hará en un lapso de tiempo entre un mínimo de 7 y un máximo de 30 Minutos.

➤ Interpretación

Indicaciones relevantes:

Son aquellas que resultan de discontinuidades mecánicas tales como grietas, porosidades, etc.

Indicaciones no relevantes:

Son aquellas que resultan de ciertas condiciones mecánicas y metalúrgicas, las cuales pueden producir indicaciones similares a las indicaciones relevantes.

Las indicaciones no relevantes y que puedan confundirse con discontinuidades inaceptables, deberán ser tratadas como tales hasta que sean removidas o examinadas con otro método no destructivo.

Indicaciones lineales:

Son aquellas indicaciones cuya longitud es tres veces mayor que su ancho.

Indicaciones redondeadas:

Son aquellas indicaciones en el cual su longitud es menor a tres veces su ancho.

➤ Post-limpieza

La post-limpieza será realizada de acuerdo a las condiciones de trabajo de la pieza inspeccionada.

➤ Reinspección de reparaciones

Las áreas reparadas en el elemento de prueba deberán ser reexaminadas usando el procedimiento de prueba original. Los reportes de las pruebas deberán ser indicados por la letra “R” en el reporte de prueba.

2.2.6.3 Interpretación de los resultados de la inspección.

En todos los métodos de ensayos no destructivos (END), incluyendo la inspección con líquidos penetrantes, se producen indicaciones indirectas, que deben ser correctamente interpretadas antes de obtener información útil (Alvarado, 2009, P.67).

Existe una gran tendencia por parte de los Inspectores de confundir los términos “interpretación” y “evaluación”. Actualmente éstos se refieren a dos etapas completamente diferentes en el proceso de inspección y requieren distintas categorías de conocimiento y de experiencia por parte del Inspector. El término interpretar una indicación significa tomar una decisión de las causas que la originan. La evaluación es posterior a la interpretación. Si por ejemplo existe una grieta, debe evaluarse su efecto antes de usar la pieza o de pasarla a su proceso posterior. A continuación se definen algunos términos importantes en la interpretación de indicaciones:

Interpretación.- Es la determinación del significado de las indicaciones desde el punto de vista de si es o no relevante.

Evaluación.- Es la determinación de la severidad de la discontinuidad después de que la indicación se ha interpretado; es decir, determina si el artículo es aceptado, reparado o rechazado.

Sensibilidad.- Capacidad del proceso de Líquidos Penetrantes para detectar discontinuidades superficiales de un tamaño mínimo establecido por un código, norma o especificación.

Indicación.- Es una señal o marca producida por la alteración detectada por el método de inspección no destructivo. Pueden ser:

Indicación falsa.- Es aquella que aparece durante la inspección y que pueden ser provocada por una mala aplicación del método o por contaminación de la superficie. La causa más común de la formación de una indicación falsa es la contaminación de la superficie con penetrante o por una remoción deficiente del exceso de dicha sustancia.

Indicación no relevante.- Es producida por la configuración del material o de la pieza. En general es el resultado de las cuerdas de una rosca, las zonas de ajuste a presión o bien de cualquier cavidad natural que pueda alojar al líquido penetrante.

Indicación relevante.- Es producida por una discontinuidad y para determinar su importancia se debe interpretar la indicación y evaluar la discontinuidad.

Discontinuidad.- Es la falta de homogeneidad o interrupción en la estructura física normal de un material; también puede ser una deficiencia en la configuración física normal de una pieza, parte o componente. Las discontinuidades pueden ser:

Discontinuidad no relevante.- Es aquella que por su tamaño, forma o localización, requiere de ser interpretada pero no es necesario evaluar.

Discontinuidad relevante.- Es aquella que por su tamaño, forma o localización requiere de ser interpretada y evaluada.

Defecto.- Es toda discontinuidad que por su tamaño, forma o localización ha excedido los límites de aceptación establecida por el código, norma o especificación aplicable. Con base en lo anterior, se puede concluir que:

- Todos los defectos son discontinuidades.
- No todas las discontinuidades son defectos.
- No todas las indicaciones son discontinuidades.

2.2.6.4 Tipos de discontinuidades en la soldadura

Las discontinuidades más frecuentes que se encuentran en las soldaduras, o que están muy relacionadas con ellas, forman parte de los siguientes tipos:

2.2.6.4.1 Porosidad

Discontinuidad del tipo de cavidad formada por gas atrapado durante la solidificación del metal de soldadura (Ruiz s.f). Se divide a su vez en cuatro tipos, los cuales están graficados de manera ilustrativa en la Figura 2.7:

a) Porosidad uniformemente dispersa

Es porosidad uniformemente distribuida a lo largo de la soldadura; causada por la aplicación de una técnica de soldadura incorrecta o por materiales defectuosos. Si la soldadura se enfría lo suficientemente lento para permitir que la mayor parte del gas pase a la superficie antes de la solidificación, habrá unos pocos poros en la soldadura (ver Figura 2.7).

b) Porosidad agrupada

Es un agrupamiento localizado de poros. Generalmente resulta por un inicio o fin inadecuado del arco de soldadura (ver Figura 2.7).

c) Porosidad alineada

Frecuentemente ocurre a lo largo de la interfase metal de soldadura / metal base, la interfase entre cordones de soldadura, o cerca de la raíz de soldadura, y es causada por la contaminación que provoca el gas por su evolución en esos sitios

d) Porosidad vermicular o tipo gusanos

Es un poro de gas alargado. Este tipo de porosidad de soldadura se extiende desde la raíz hasta la superficie de la soldadura. Cuando uno o más poros son vistos en la superficie de la soldadura, un cuidadoso descarne puede también revelar porosidad sub-superficial. De todas formas, muchas de las porosidades vermiculares encontradas en soldaduras no se extienden hasta la superficie (ver Figura 2.7).

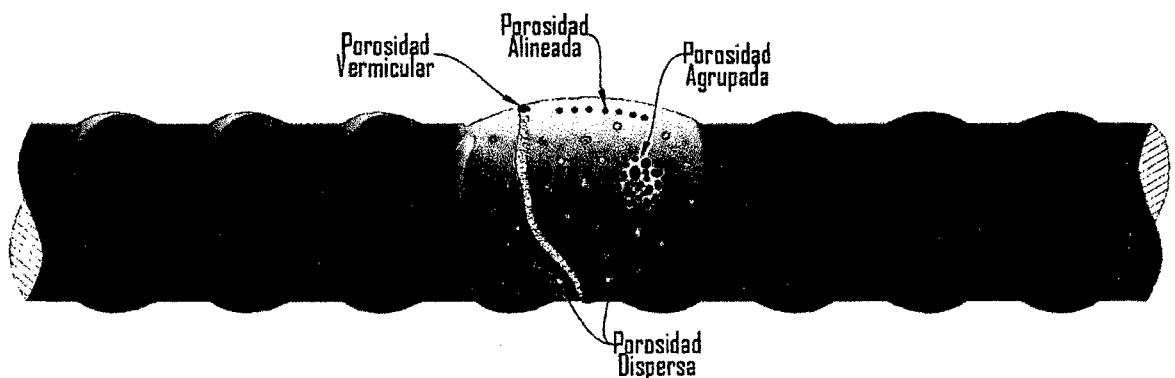


Figura 2.7: Tipos de Porosidad en la soldadura

2.2.6.4.2 Inclusiones

a) Inclusiones de escoria

Son sólidos no metálicos atrapados en el metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base. Pueden encontrarse en soldaduras hechas por cualquier proceso de arco. En general, estas inclusiones resultan por fallas en la técnica de soldadura, en el diseño de la junta tal que no permita un acceso adecuado, o en una limpieza inadecuada entre los cordones de la soldadura. Placa radiográfica mostrando inclusiones de escoria entre los cordones (Ruiz s.f).

Normalmente, la escoria disuelta fluirá hacia la parte superior de la soldadura, pero muescas agudas en la interfase de metal base y de soldadura, o entre los cordones de soldadura, frecuentemente provocan que la escoria quede atrapada bajo el metal de soldadura, en la Figura 2.8 se muestra gráficamente las inclusiones de escoria.

2.2.6.4.3 Fusión incompleta

Discontinuidad bidimensional causada por la falta de unión entre los cordones de soldadura y el metal base, o entre los cordones de la soldadura. Es el resultado de técnica de soldadura, preparación del metal base, o diseño de la junta inapropiados.

Entre las deficiencias que causan la fusión incompleta se destacan el insuficiente aporte de calor de soldadura, falta de acceso a toda la superficie de fusión, o ambas. El óxido fuertemente adherido interferirá con una completa fusión, siempre que haya un correcto acceso a las superficies de fusión y un adecuado aporte de calor a la soldadura (Ruiz s.f). En la Figura 2.8 se muestra gráficamente la fusión incompleta en soldaduras a tope directo.

2.2.6.4.4 Penetración incompleta o falta de penetración (Ruiz s.f).

Ocurre cuando el metal de soldadura no se extiende a través de todo el espesor de la junta. El área no fundida ni penetrada es una discontinuidad descrita como “penetración incompleta”.

Esta puede resultar de un insuficiente aporte de calor de soldadura, diseño de la junta inapropiado (por ejemplo demasiado espesor para ser penetrado por el arco, o chanfle insuficiente), o control lateral inapropiado del arco de soldadura. Algunos procesos tienen una mayor capacidad de penetración que otros. Las soldaduras en cañerías son

especialmente vulnerables a este tipo de discontinuidad, dado que el lado interior es usualmente inaccesible.

Para juntas soldadas de ambos lados, se puede especificar que se remueva el metal de soldadura y el metal base de la soldadura de raíz antes de soldar el otro lado, para asegurarse que allí no hay penetración incompleta. Como se muestra en la Figura 2.8, la penetración incompleta también causa una fusión incompleta, y por consiguiente en muchas circunstancias ambos conceptos se mezclan.

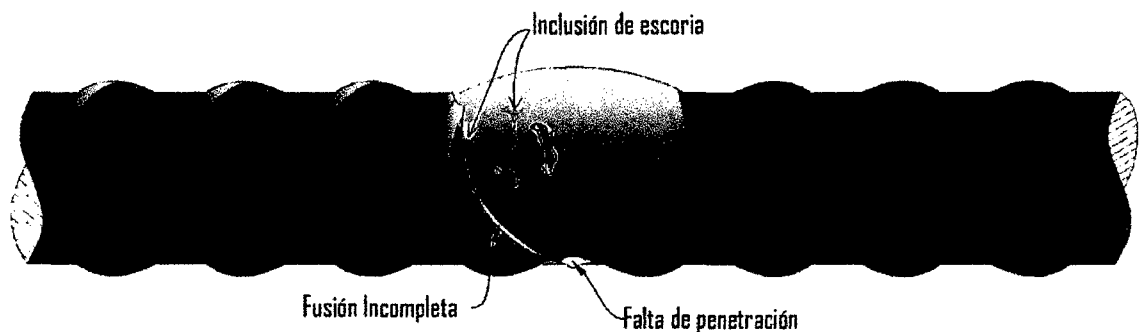


Figura 2.8: Tipos de inclusiones de escoria, fusión incompleta y falta de penetración.

2.2.6.4.5 Fisuras

Ocurren en el metal base y en el metal de aporte, cuando las tensiones localizadas exceden la resistencia última del material (Ruiz s.f). En la Figura 2.9 se grafica ilustrativamente los tipos de fisuras que se presentan en la soldadura.

Las fisuras pueden clasificarse en:

- 1) Fisuras en caliente: se desarrollan durante la solidificación y su propagación es intergranular (entre granos).
- 2) 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 transgranular).

Según su forma (En la Figura 2.9 se muestran cada una de ellas), las fisuras también se pueden clasificar en:

- a) Fisuras longitudinales: son paralelas al eje de la soldadura. En soldaduras de arco sumergido, son comúnmente asociadas con altas velocidades y a veces están relacionadas con problemas de porosidad, que no se muestran en la superficie. Fisuras longitudinales en pequeñas soldaduras entre grandes secciones, son frecuentemente el resultado de un alto grado de enfriamiento y de grandes restricciones.
- b) Fisuras transversales: generalmente son el resultado de esfuerzos debido a contracciones longitudinales actuando en metales de soldadura de baja ductilidad.
- c) Cráteres: ocurren cuando el arco es terminado incorrectamente. Generalmente tienen forma de estrella. Son superficiales, se forman en caliente y usualmente forman redes con forma de estrella.
- d) De garganta: son fisuras longitudinales ubicadas en la cara de la soldadura. Generalmente, pero no siempre, son fisuras en caliente.
- e) De borde: son generalmente fisuras en frío. Se inician y propagan desde el borde de la soldadura, donde se concentran los esfuerzos de contracción. Se inician perpendicularmente a la superficie del metal base. Estas fisuras son generalmente el resultado de contracciones térmicas actuando en la zona afectada por el calor (ZAC).
- f) De raíz: son longitudinales, en la raíz de la soldadura o en la superficie de la misma. Pueden ser fisuras en caliente o en frío. Fisuras bajo el cordón y fisuras en la ZAC: son generalmente fisuras en frío que se forman en la ZAC del metal base. Son generalmente cortas, pero pueden unirse para formar una fisura continua.

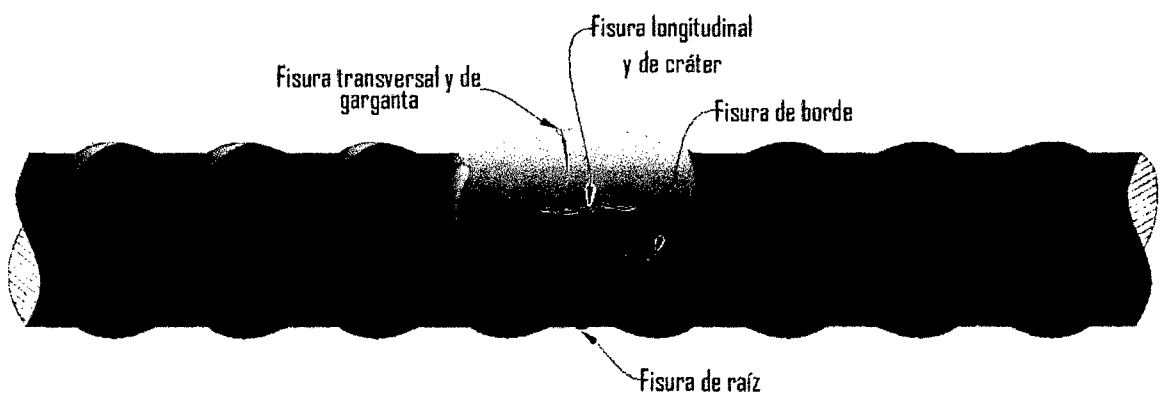


Figura 2.9: Tipos de fisuras en la soldadura según su forma.

2.2.6.4.6 Socavadura / mordedura

Asociadas generalmente con técnicas inapropiadas y/o corrientes excesivas de soldadura. La socavadura es una muesca o canaleta o hendidura ubicada en los bordes de la

soldadura; es un concentrador de tensiones y además disminuye el espesor de las planchas o caños, todo lo cual es perjudicial. Pueden darse en la raíz o en la cara de la soldadura. Cuando la socavadura es controlada, su longitud está dentro de los límites especificados y no constituye una muesca profunda, no es considerada un defecto de soldadura (Ruiz s.f). En la Figura 2.10 se muestra el tipo de socavadura que se podría presentar en una soldadura.

2.2.6.4.7 Laminaciones

Son discontinuidades planas y alargadas en el metal base, encontrándose normalmente en la parte media del espesor de los materiales forjados (como lo son las planchas de acero utilizadas para construcción de recipientes o tanques, que se producen por laminado (rolado), el cual es un proceso de forja).

Las “laminaciones” pueden ser totalmente internas y en este caso serán detectadas sólo mediante Ultrasonido. Si por el contrario se extienden hasta un borde de la plancha pueden ser detectadas mediante Partículas Magnéticas o Líquidos Penetrantes (Ver Figura 2.10)

2.2.6.4.8 Fisuras laminares

Son fracturas en forma de terraza en el metal base, con orientación básicamente paralela a la superficie forjada. Son causadas por altos esfuerzos en la dirección del espesor que resultan del proceso de soldadura.

Se pueden extender largamente, iniciándose en regiones donde el metal base tiene inclusiones no metálicas coplanares y/o en áreas del metal base sujetas a altos esfuerzos por la soldadura.

La fractura usualmente se propaga desde un plano laminar a otro por corte a lo largo de líneas que son casi normales a la superficie laminada.

2.2.6.4.9 Desalineación

Esta discontinuidad se da cuando en las uniones soldadas a tope las superficies que deberían ser paralelas se presentan desalineadas; también puede darse cuando se sueldan dos caños que se han presentado excéntricamente, o poseen ovalizaciones. Las normas limitan esta desalineación, normalmente en función del espesor de las partes a soldar. Es

frecuente que en la raíz de la soldadura esta desalineación origine un borde sin fundir (Ver Figura 2.10).

2.2.6.4.10 Salpicaduras

Son los glóbulos de metal de aporte transferidos durante la soldadura y adheridos a la superficie del metal base, o a la zona fundida ya solidificada. Es inevitable producir cierto grado de salpicaduras, pero deben limitarse eliminándose, aunque más no sea por estética, de la superficie soldada. Las salpicaduras pueden ser origen de microfisuras (como los arranques de arco sobre el metal base), y simultáneamente son un punto de inicio de la oxidación en superficies pintadas ya que tarde o temprano estos glóbulos podrán desprenderse del metal base, llevando consigo la pintura superficial allí localizada, en la Figura 2.10 se muestra las salpicaduras en el material base y material de aporte.

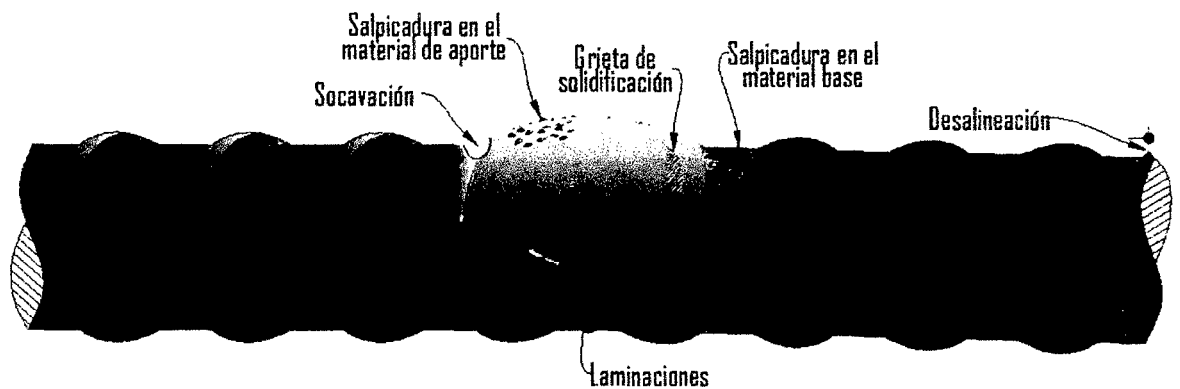
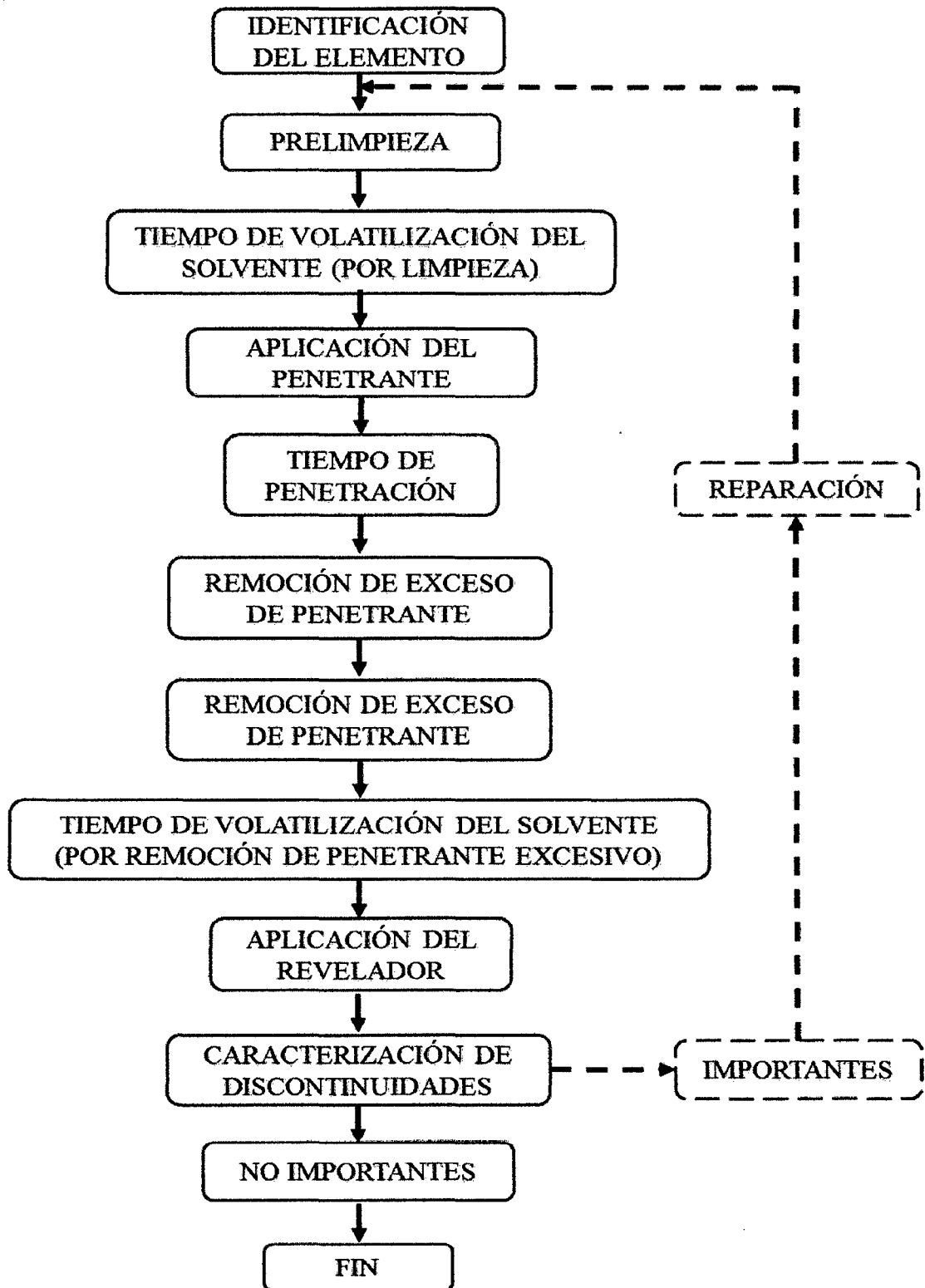


Figura 2.10: Discontinuidades y defectos en la soldadura de junta a tope directo.

RESUMEN DE LA INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PNETRANTES DEL TIPO VISIBLES LAVABLES CON SOLVENTE POR MEDIO DE UN DIAGRAMA DE FLUJO. (Alvarado, 2009, P.74)



2.2.6.2 Inspección de la soldadura por ensayo de resistencia a la tracción.

Este tipo de inspección se realizará mediante los ensayos a tracción de las probetas soldadas en la maquina universal, obteniendo resultados de cargas, esfuerzo máximo, alargamiento del material de aporte y deformaciones unitarias máximas. El ensayo de tracción de la barra corrugada se realiza bajo la norma ASTM A 370 Métodos de Ensayo y Definiciones Estándar para Ensayos Mecánicos de Productos de Acero

El esfuerzo de tracción no debe ser menor a 1.25 veces el esfuerzo de fluencia mínimo especificado del tipo y grado de barra a ser unido, a menos que se encuentre especificado de otra manera por la especificación general (ANSI/AWS D1.4-2005). Debido a que el esfuerzo de fluencia mínimo especificado para las barras corrugadas ASTM A615 y ASTM A706 es de 4200 Kg/cm^2 , el esfuerzo de tracción no deberá ser menor a 5250 Kg/cm^2

Diagrama esfuerzo - deformación

En este caso vendrá a ser la curva resultante graficada con los valores del esfuerzo y la deformación unitaria correspondiente en la probeta calculada a partir de los datos del ensayo de tracción, en la Figura 2.11 se muestra un diagrama para mejor entendimiento.

Teniendo este diagrama podremos identificar las siguientes características:

a) Límite de proporcionalidad:

Es un segmento de recta rectilíneo, de donde se deduce la tan conocida relación de proporcionalidad entre la tensión y la deformación (Módulo de elasticidad).

b) Limite de elasticidad o limite elástico:

Es la tensión más allá del cual el material no recupera totalmente su forma original al ser descargado, sino que queda con una deformación residual llamada deformación permanente.

c) Punto de fluencia:

Es aquel donde en el aparece un considerable alargamiento o fluencia del material sin el correspondiente aumento de carga que, incluso, puede disminuir mientras dura la fluencia.

d) Esfuerzo máximo (F_{su}): Es la máxima ordenada en la curva esfuerzo-deformación.

e) Esfuerzo de Rotura: Verdadero esfuerzo generado en un material durante la rotura. Con la finalidad de realizar un trabajo de investigación de mayor entendimiento se desarrollará gráficos e histogramas de comparación, de los resultados obtenidos del ensayo a tracción, poniendo como puntos de comparación el tipo de acero y el tipo de electrodo utilizado.

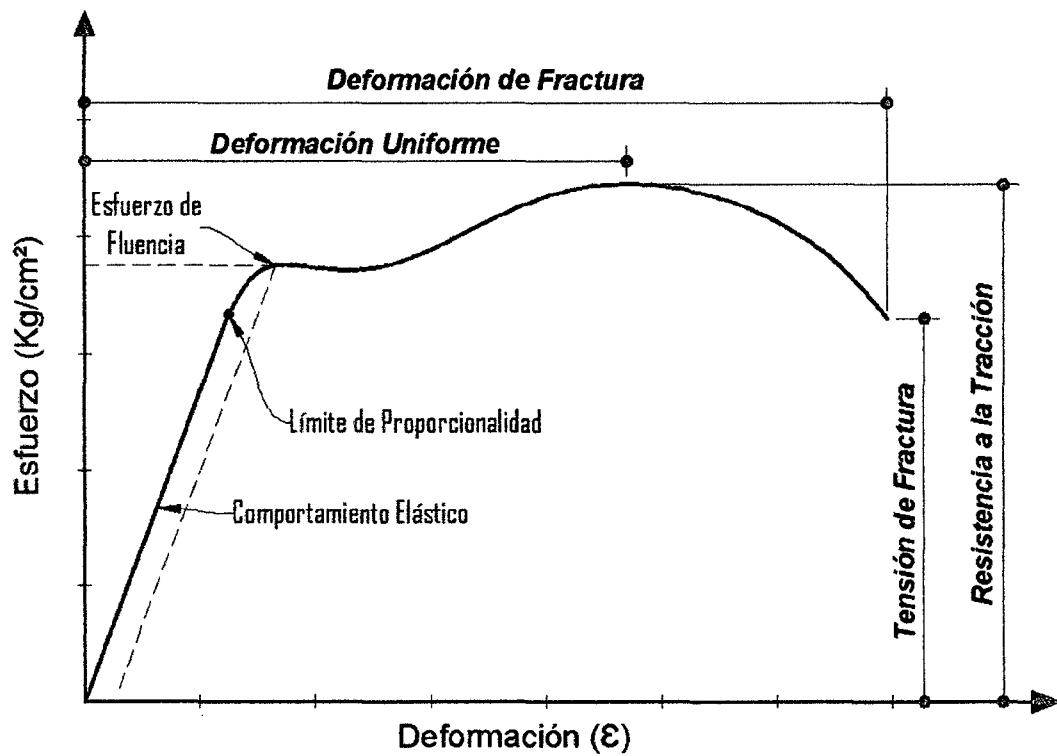


Figura 2.11: Diagrama estándar de Esfuerzo - Deformación de barra ensayada a tracción.

CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA

Los procedimientos de soldadura se realizaron siguiendo los lineamientos establecidos por el código ANSI/AWS D1.4-05 y las recomendaciones del fabricante del material de aporte, SOLDEXA S.A. (Electrodo Revestido E6011 y E7018).

El tipo de junta que se utilizó para este estudio se detalló en el ítem 2.2.3, por lo que se siguió el procedimiento indicado en dicho ítem.

3.1.1 Especificaciones del proceso de soldadura - barra corrugada ASTM A615

Las superficies a ser soldadas deben estar libres de resaltes, rayones, fisuras u otros defectos que afecten negativamente la calidad y la resistencia de la soldadura. Las superficies a ser soldadas y las superficies adyacentes a la soldadura deben estar también libres de escamas sueltas o gruesas, escoria, óxido, humedad, grasa, recubrimiento epóxico u otro material externo que impida una soldadura adecuada o produzca humos desagradables. Escamas de laminación que soporten escobillado de alambre fuerte, una capa delgada de óxido, o un compuesto anti-salpicadura pueden quedar sobre la superficie.

Los extremos de las barras reforzadas en juntas directas a tope se les deben dar forma para constituir el canal de soldadura, por oxicorte, corte por arco con aire y carbono, por sierra u otro medio mecánico. En esta investigación el corte se realizó por medio de un disco de una amoladora. El ensamble de los miembros de la probeta debe estar alineados de tal forma que se minimice la excentricidad. Las juntas directas a tope directo soldadas no deben estar desalineadas en la junta más de los valores presentados en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1: Desalineamiento Máximo Permitido en Juntas a Tope. (ANSI/AWS D1.4-2005)

Nº de Designación de Barra	Deslizamiento Máximo (mm)
# 10 o menor	3
De # 11 a # 14	5
#18	6

3.1.1.1 Procedimiento de Soldadura para Barra de 1/2"

Preparación del metal base

El corte del cero se realizó para una unión a Tope Directo, teniendo en cuenta el ángulo que forman los dos miembros de la probeta, en este caso el ángulo que se utilizó es de 60° el cual está reglamentado para este tipo de acero. Para obtener la medida superior L_b se utiliza la Formula (3) donde se tuvo en cuenta el diámetro de la barra, el ángulo y la medida inferior que oscila entre 2 a 3mm, obteniendo de esta manera para la barra $\varnothing 1/2''$ una medida superior L_b de 1.50 cm; la Figura 3.1 muestra el detalles del proceso de corte de la barra corrugada.

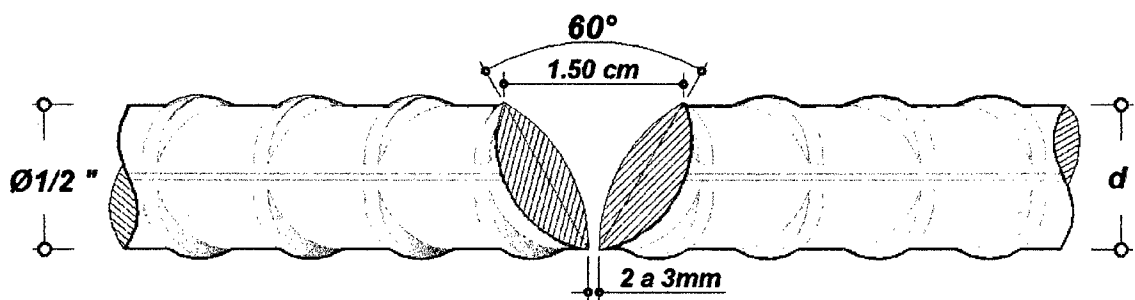


Figura 3.1: Detalle de corte en miembros de probeta para soldadura a tope directo con borde en "V" en barra de $\varnothing 1/2''$

Detalle de proceso de la secuencia de pasadas en la soldadura

Se debe de tener muy cuenta la forma geométrica de los extremos y secuencia de pasadas en la soldadura a tope con acceso por un solo lado, ya que esto determinara la calidad de la soldadura. El proceso de soldadura en esta investigación se realizará con una unión a tope directo, soldadura en "V" y la posición de soldadura 1G, en la Figura 2.5, se muestra el detalle de la secuencia de pasadas de soldadura y la posición.

Análisis químico

Para el cálculo del Carbono Equivalente (CE) de este tipo de acero se utilizó la formula (1), el resultado del análisis químico de la barra corrugada de $\varnothing 1/2''$ se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Composición química de la barra de $\varnothing 1/2''$

Muestra	% en volumen		CE
	C	Mn	
$\varnothing 1/2''$	0.386	0.982	0.55

3.1.1.1.1 Soldadura con electrodo E6011

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	SIDERPERU (ASTM A 615)
Tamaño de Barra	# 4 (Ø 1/2")
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.55
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E6011
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Limpieza	Con escobilla metálica y esmeril

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	75 - 85	20 - 25	20 - 30

n = 3 (recomendado)

3.1.1.1.2 Soldadura con electrodo E7018

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	SIDERPERU (ASTM A 615)
Tamaño de Barra	# 4 (Ø 1/2")
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.55
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E7018
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE

Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Limpieza	Con escobilla metálica y esmeril

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	80 - 90	20 - 25	20 - 30

n = 3 (recomendado)

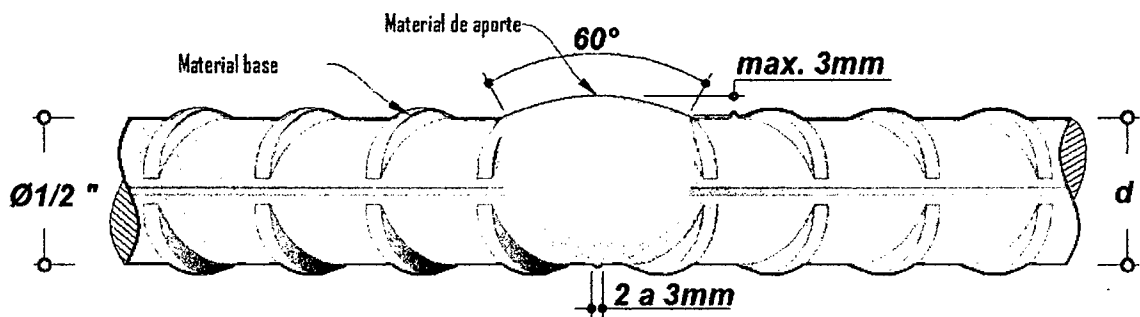


Figura 3.2: Detalle de terminado de soldadura a tope directo de barra de $\varnothing 1/2''$.

3.1.1.2 Procedimiento de Soldadura para Barra de 5/8"

Preparación del metal base

El corte de la barra se realizó siguiendo el mismo procedimiento que se describe en el ítem 3.1.1.1; realizando la medida de la separación de miembros de la probeta de la parte superior de la barra $\varnothing 5/8''$ se obtuvo 1.85 cm; la Figura 3.2 muestra el detalles del proceso de corte de la barra corrugada.

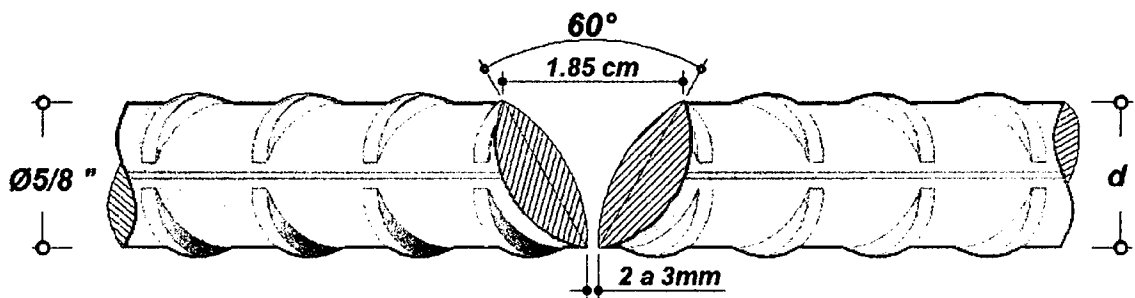


Figura 3.3: Detalle de corte en miembros de probeta para soldadura a tope directo con borde en "V" en barra de $\varnothing 5/8''$

Detalle de proceso de la secuencia de pasadas en la soldadura

Se sigue el mismo procedimiento de secuencia de pasadas en la soldadura que está indicadas para la barra de $\varnothing 1/2''$

Análisis químico

Para el cálculo del Carbono Equivalente (CE) de este tipo de acero se utilizó la formula (1), el resultado del análisis químico de la barra corrugada de $\varnothing 5/8''$ se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3.3: Composición química de la barra de $\varnothing 5/8''$

Muestra	% en volumen		CE
	C	Mn	
$\varnothing 5/8''$	0.409	1.017	0.58

3.1.1.2.1 Soldadura con electrodo E6011

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	SIDERPERU (ASTM A 615)
Tamaño de Barra	# 5 ($\varnothing 5/8''$)
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.58
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E6011
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Limpieza	Con escobilla metálica y esmeril

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	90 - 100	20 - 25	20 - 30

n = 4 (recomendado)

3.1.1.2.2 Soldadura con electrodo E7018

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	SIDERPERU (ASTM A 615)
Tamaño de Barra	# 5 (\varnothing 5/8")
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.58
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E7018
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Limpieza	Con escobilla metálica y esmeril

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	100 - 110	20 - 25	20 - 30

n = 4 (recomendado)

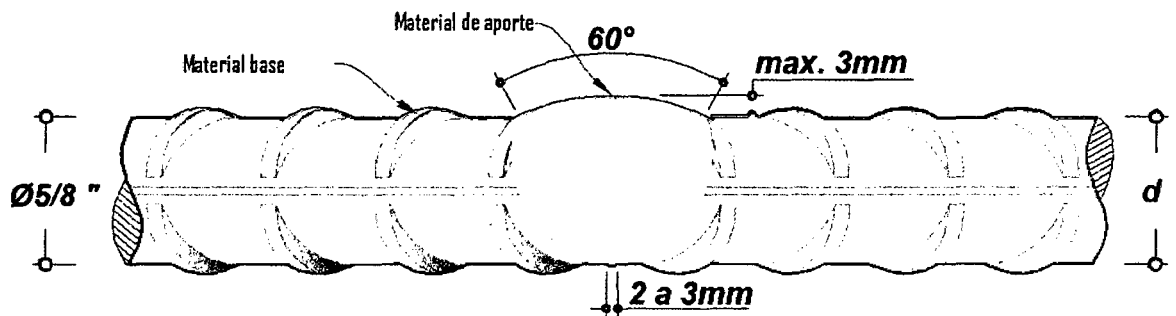


Figura 3.4: Detalle de terminado de soldadura a tope directo de barra de \varnothing 5/8".

3.1.1.3 Procedimiento de Soldadura para Barra de 3/4"

Preparación del metal base

El corte de la barra se realizó siguiendo el mismo procedimiento que se describe en el ítem 3.1.1.1; realizando la medida de la separación de miembros de la probeta de la parte superior de la barra \varnothing 3/4" se obtuvo 2.20 cm; la Figura 3.5 muestra el detalles del proceso de corte de la barra corrugada.

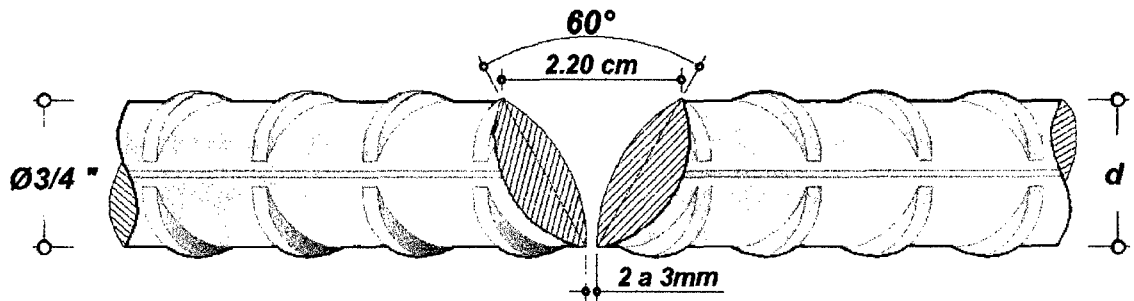


Figura 3.5: Detalle de corte en miembros de probeta para soldadura a tope directo con borde en “V” en barra de Ø 3/4”

Detalle de proceso de la secuencia de pasadas en la soldadura

Se sigue el mismo procedimiento de secuencia de pasadas en la soldadura que está indicadas para la barra de Ø 1/2”

Análisis químico

Para el cálculo del Carbono Equivalente (CE) de este tipo de acero se utilizó la formula (1), el resultado del análisis químico de la barra corrugada de Ø 3/4” se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3.4: Composición química de la barra de Ø 3/4”

Muestra	% en volumen		CE
	C	Mn	
Ø 3/4”	0.412	1.011	0.58

3.1.1.3.1 Soldadura con electrodo E6011

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	SIDERPERU (ASTM A 615)
Tamaño de Barra	# 6 (Ø 3/4”)
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.58
Tipo de Trabajo	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E6011

Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Limpieza	Con escobilla metálica y esmeril

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	100 - 110	20 - 25	20 - 30

n = 5 (recomendado)

3.1.1.3.2 Soldadura con electrodo E7018

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	SIDERPERU (ASTM A 615)
Tamaño de Barra	# 6 (Ø 3/4")
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.58
Tipo de Trabajo	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E7018
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Limpieza	Con escobilla metálica y esmeril

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	110 - 120	20 - 25	20 - 30

n = 5 (recomendado)

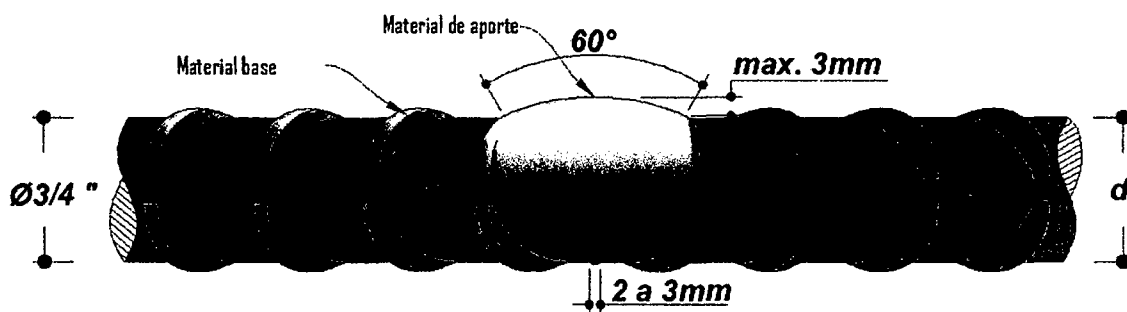


Figura 3.6: Detalle de terminado de soldadura a tope directo de barra de $\text{Ø} 3/4''$.

3.1.2 Especificaciones del proceso de soldadura - barra corrugada ASTM A706

Para este tipo de barra corrugada de la misma manera que para la barra ASTM A 615, las superficies a ser soldadas deben estar libres de resaltes, rayones, fisuras u otros defectos que afecten negativamente la calidad y la resistencia de la soldadura. Las superficies a ser soldadas y las superficies adyacentes a la soldadura deben estar también libres de escamas sueltas o gruesas, escoria, óxido, humedad, grasa, recubrimiento epóxico u otro material externo que impida una soldadura adecuada o produzca humos desagradables. Escamas de laminación que soporten escobillado de alambre fuerte, una capa delgada de óxido, o un compuesto anti-salpicadura pueden quedar sobre la superficie. (Sotero 2004)

3.1.2.1 Procedimiento de Soldadura para Barra de $1/2''$

Preparación del metal base

Para este tipo de acero la preparación del metal base se realizará de acuerdo al procedimiento seguido en la barra corrugada ASTM A 615 de $\text{Ø} 1/2''$.

Detalle de proceso de la secuencia de pasadas en la soldadura

Se sigue el mismo procedimiento de secuencia de pasadas en la soldadura que está indicada para la barra corrugada ASTM A615 de $\text{Ø} 1/2''$

Análisis químico

El resultado del análisis químico de la barra corrugada de $\text{Ø} 1/2''$ se presenta en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5: Composición química de la barra de $\text{Ø} 1/2''$

Muestra	% en volumen										CE
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	
$\text{Ø} 1/2''$	0.24	1.31	0.19	0.021	0.032	0.05	0.05	0.01	0.22	0.01	0.47

3.1.2.1.1 Soldadura con electrodo E6011

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	BELGO 60 (ASTM A 706)
Tamaño de Barra	# 4 (Ø 1/2")
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.47
Tipo de Trabajo	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E6011
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Limpieza	Con escobilla metálica y esmeril

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	75 - 85	20 - 25	20 - 30

n = 3 (recomendado)

3.1.2.1.2 Soldadura con electrodo E7018

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	BELGO 60 (ASTM A 706)
Tamaño de Barra	# 4 (Ø 1/2")
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.47
Tipo de Trabajo	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E7018

Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Limpieza	Con escobilla metálica y esmeril

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	80 - 90	20 - 25	20 - 30

n = 3 (recomendado)

3.1.2.2 Procedimiento de Soldadura para Barra de 5/8"

Preparación del metal base

Para este tipo de acero la preparación del metal base se realizará de acuerdo al procedimiento seguido en la barra corrugada ASTM A 615 de \varnothing 5/8".

Detalle de proceso de la secuencia de pasadas en la soldadura

Se sigue el mismo procedimiento de secuencia de pasadas en la soldadura que está indicada para la barra corrugada ASTM A615 de \varnothing 1/2"

Análisis químico

El resultado del análisis químico de la barra corrugada de \varnothing 5/8" se presenta en la Tabla 3.6:

Tabla 3.6: Composición química de la barra de \varnothing 5/8"

Muestra	% en volumen										CE
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	
\varnothing 5/8"	0.28	1.32	0.22	0.026	0.022	0.06	0.06	0.01	0.25	0.01	0.51

3.1.2.2.1 Soldadura con electrodo E6011

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	BELGO 60 (ASTM A 706)
Tamaño de Barra	#5 (\varnothing 5/8")
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.51

Tipo de Trabajo	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E6011
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Limpieza	Con escobilla metálica y esmeril

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	90 - 100	20 - 25	20 - 30

n = 4 (recomendado)

3.1.2.2.2 Soldadura con electrodo E7018

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	BELGO 60 (ASTM A 706)
Tamaño de Barra	N° 5 (Ø 5/8")
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.51
Tipo de Trabajo	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E7018
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Limpieza	Con escobilla metálica

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	100 - 110	20 - 25	20 - 30

n = 4 (recomendado)

3.1.2.3 Procedimiento de Soldadura para Barra de 3/4"

Preparación del metal base

Para este tipo de acero la preparación del metal base se realizará de acuerdo al procedimiento seguido en la barra corrugada ASTM A 615 de Ø 3/4".

Detalle de proceso de la secuencia de pasadas en la soldadura

Se sigue el mismo procedimiento de secuencia de pasadas en la soldadura que está indicada para la barra corrugada ASTM A615 de Ø 1/2"

Análisis químico

El resultado del análisis químico de la barra corrugada de Ø 3/4" se presenta en la Tabla 3.7:

Tabla 3.7: Composición química de la barra de Ø 3/4"

Muestra	% en volumen										CE
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	
Ø 3/4"	0.29	1.31	0.17	0.024	0.034	0.05	0.07	0.01	0.21	0.01	0.51

3.1.2.3.1 Soldadura con electrodo E6011

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	BELGO 60 (ASTM A 706)
Tamaño de Barra	# 6 (Ø 3/4")
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.51
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E6011
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Limpieza	Con escobilla metálica y esmeril

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	100 - 110	20 - 25	20 - 30

n = 5 (recomendado)

3.1.2.3.2 Soldadura con electrodo E7018

Código Aplicado	ANSI/AWS D1.4-05, STRUCTURAL WELDING CODE REINFORCING STEEL
Especificación del Material Base	BELGO 60 (ASTM A 706)
Tamaño de Barra	# 6 (Ø 3/4")
Proceso de Soldadura	SMAW
Carbono Equivalente	0.51
Tipo de Trabajo	MANUAL
Posición de Soldadura	1G
Especificación del Material de Aporte	AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1
Clasificación del Material de Aporte	E7018
Pase Simple o Múltiple	MÚLTIPLE
Técnica	OSCILANTE
Arco Simple o Múltiple	SIMPLE
Corriente de Soldadura	CONTINUA
Polaridad	INVERSA (ELECTRODO AL POSITIVO)
Limpieza	Con escobilla metálica y esmeril

Pase N°	Diámetro electrodo	Corriente de soldadura		velocidad (cm/min)
		Amperaje	voltaje	
1 - n	1/8"	110 - 120	20 - 25	20 - 30

n = 5 (recomendado)

3.1.3 Ensayos de Calificación según Código ANSI/AWS D1.4-2005

3.1.3.1 Inspección por líquidos penetrantes

En el proceso de inspección por líquidos penetrantes se tiene que tomar en cuenta el equipo de seguridad del técnico el cual realizara la prueba, de tal modo que no se vea afectado por cuestiones de contaminación, en la Figura 3.7 se muestra el equipo mínimo de protección que se debe tomar en cuenta, además se puede notar la probeta y los tres tipos de líquidos a utilizar.

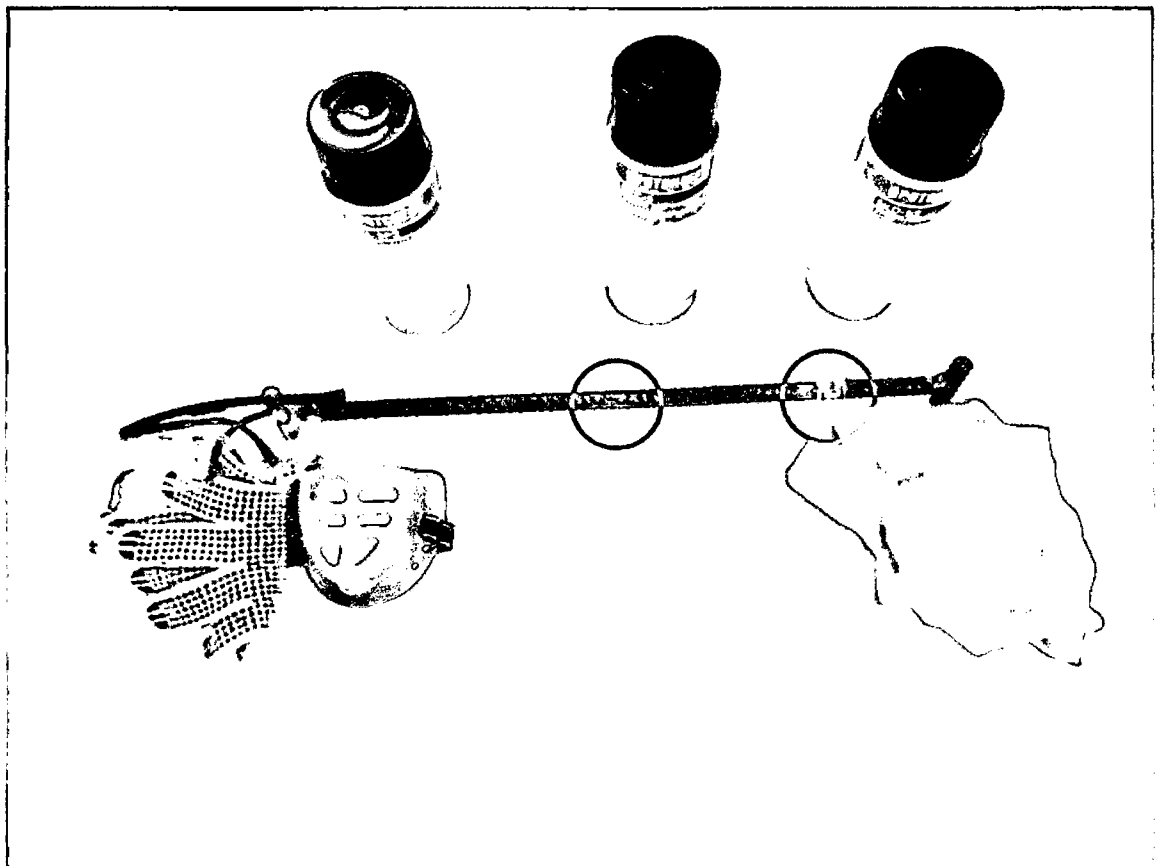


Figura 3.7: Equipo y materiales necesarios para le elaboración de la prueba por líquidos penetrantes.

3.1.3.1.1 Identificación del elemento

La identificación del elemento es siempre el primer paso en esta inspección, por lo que se le designa un nombre al elemento a examinar tal y como se muestra en la Figura 3.8.

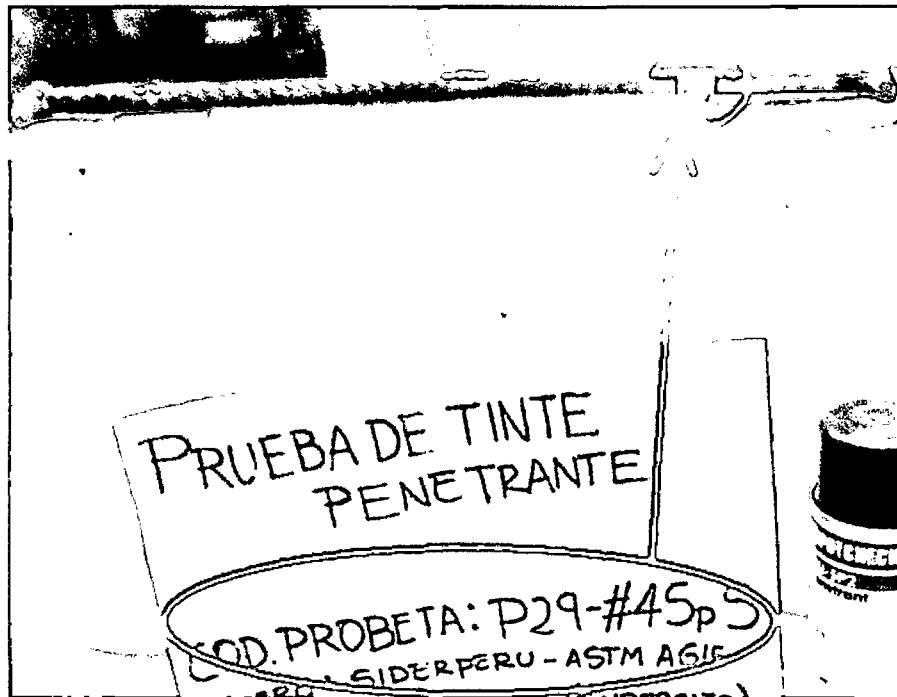


Figura 3.8: Probeta identificada mediante un código, el cual indica, el número de probeta, diámetro, tipo de acero, y tipo de electrodo.

3.1.3.1.2 Prelimpieza

Para la inspección por líquidos penetrantes, es indispensable la buena limpieza, debido a que la limpieza determinará que el penetrante actúe de forma óptima, se puede usar el pulido abrasivo que es el más indicado y práctico en campo, o con una escobilla con cerdas de acero como se muestra en la Figura 3.9.

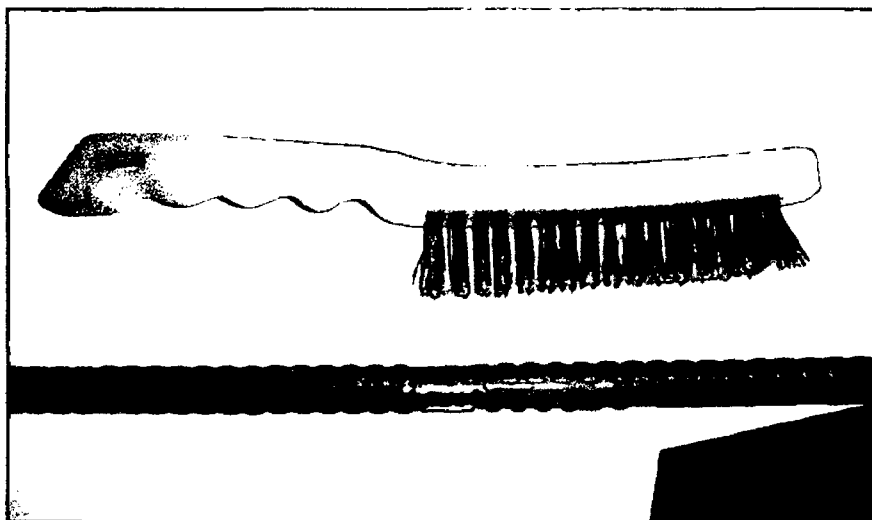


Figura 3.9: Proceso de limpieza de escoria de soldadura con escobilla con cerdas de acero.

El paso siguiente es aplicar la prelimpieza con el solvente; este proceso se realizará de la siguiente manera: primero, el solvente se aplicara al trapo industrial, segundo, frotar la soldadura con el trapo industrial de tal manera que la superficie de la soldadura que totalmente limpia. En la Figura 3.10 se muestra la aplicación del solvente al trapo para la limpieza de la soldadura.



Figura 3.10: Proceso de limpieza, se aplica el solvente (SKC-S) al trapo industrial, luego se procede con la limpieza de la soldadura.

Después de todo este proceso, se dejará secar un tiempo determinado donde se le permita al solvente su volatilización para que el solvente que haya entrado a las discontinuidades no obstruya el paso al penetrante a la hora del revelado.

3.1.3.1.3 Aplicación del penetrante

La aplicación del penetrante (SKL – SP2) hacia la soldadura se realizó a una distancia aproximada de 20 centímetros, esto con la finalidad de que el penetrante llegue hacia el cordón de soldadura homogéneamente, lo cual permitirá adecuarse a la morfología del cordón, llegando únicamente hasta el lugar donde se pudiera presentar las socavaduras de la frontera con la zona afectada por el calor (ZAC). Es importante aclarar que se debe evitar el escurrimiento excesivo del penetrante en la zona de trabajo. La Figura 3.11 muestra la aplicación del penetrante a la soldadura de una distancia aproximada de 20 cm.



Figura 3.11: Proceso de aplicación del líquido penetrante (SKL-SP2)

3.1.3.1.4 Tiempo de penetración

Después de la aplicación del penetrante se da inicio al tiempo de penetración. Este tiempo de penetración se debe realizar sin quitar el penetrante y cuidando que no haya quedado penetrante inundado que origine escurrimientos en otras zonas como se muestra en la Figura 3.12.

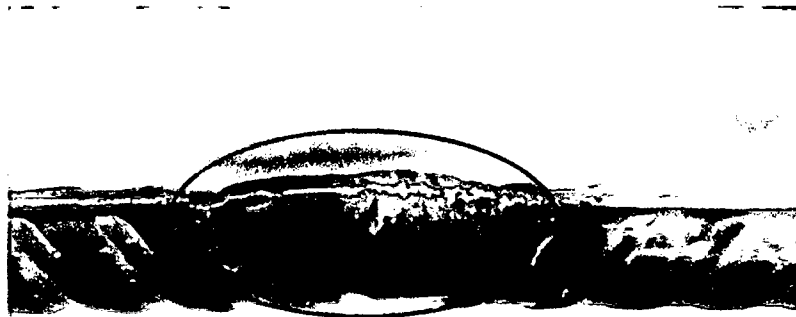


Figura 3.12: Tiempo de penetración de líquido en el cordón de soldadura.

3.1.3.1.5 Limpieza del exceso de penetrante

Cuando ha pasado el tiempo de penetración, se procede a retirar el penetrante que está en el área superficial del elemento, con la intención de dejar únicamente el que está retenido en las discontinuidades, que es el que dará la información de las discontinuidades existentes.

Se retira de la misma forma como fue parte de la prelimpieza, con un trapo seco y con una segunda pasada con un trapo ligeramente húmedo, dando tiempo a que cualquier indicio de solvente se evapore. En la Figura 3.13 se muestra el proceso de limpieza del exceso de penetrante.

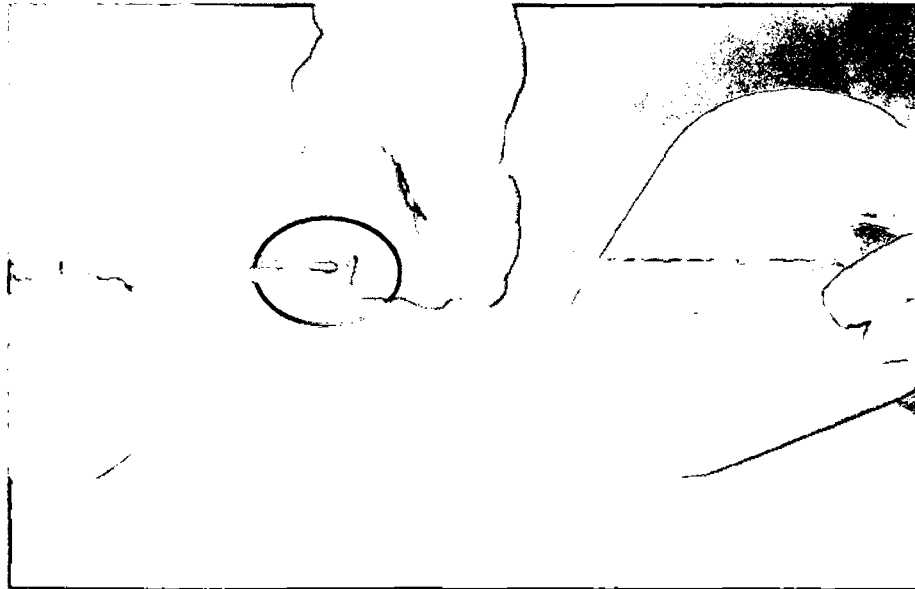


Figura 3.13: Proceso de limpieza de exceso de penetrante.

3.1.3.1.6 Aplicación del revelador.

La aplicación del revelador, en el caso de este tipo de líquidos, tiene la presentación en aerosol, por lo que facilita su aplicación. Esta actividad como se muestra en la Figura 3.14, debe de ser tratada de esparcir lo mejor posible el revelador de forma también que no sirva como tapón para el penetrante.

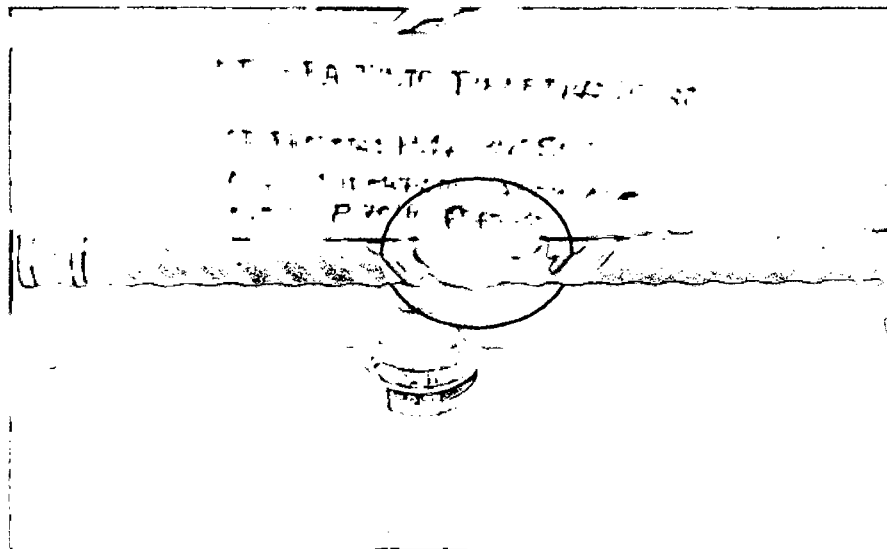


Figura 3.14: Proceso de aplicación del revelador (SKD-S2) en soldadura.

3.1.3.1.7 Tiempo de revelado

El tiempo de revelado es necesario para que el penetrante salga y muestre todas las discontinuidades de la unión, al igual que el penetrante, este tiene un tiempo de revelado.

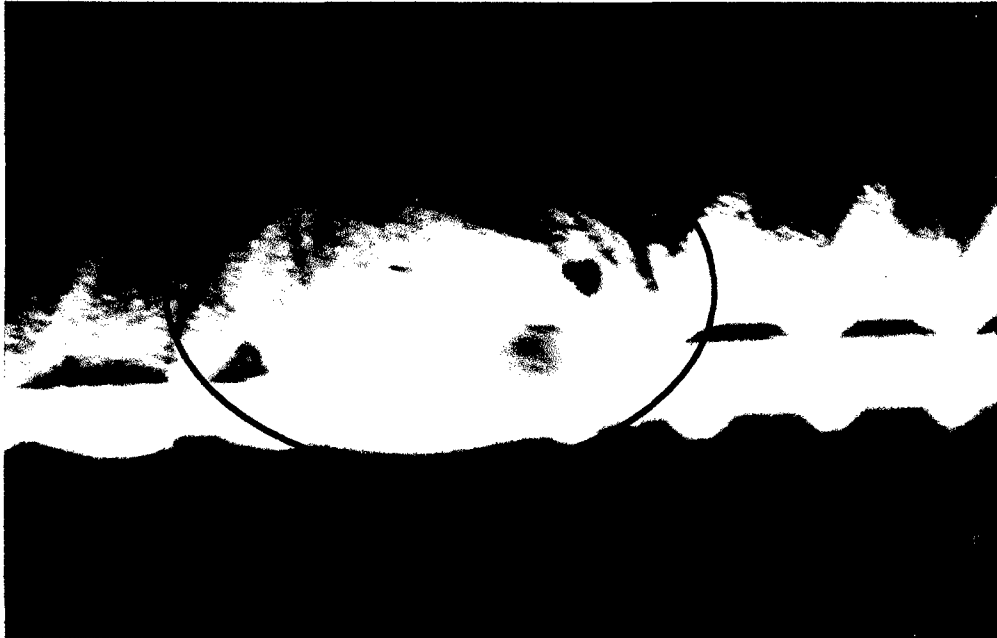


Figura 3.15: Tiempo de revelado, aparecimiento de las discontinuidades de la soldadura.

3.1.3.1.8 Interpretación y presentación del ensayo.

Después de dar el tiempo de revelado, el inspector en soldadura puede empezar a delinear la zona examinada haciendo uso de un trapo seco o húmedo para dar forma al revelador esparcido y que no tiene uso alguno, esto servirá para dar mejor presentación en el registro fotográfico para el informe, y así dar paso a la caracterización de las indicaciones que arrojó el ensayo, dividiéndolas en relevantes y no relevantes ó permisibles y no permisibles, etc.

En el caso de que la unión presente alguna discontinuidad que requiera de una reparación, se indica el motivo de la misma al soldador y después del proceso de reparación se aplica esta serie de pasos. En la Figura 3.16 se muestra algunas de las discontinuidades, los cuales se interpretará, y se dará la opinión si es indicación relevante o irrelevante.

En el caso de que no exista ninguna indicación relevante, es indicio de que la parte superficial de la unión está sana, y entonces se podría pensar en analizarla con otro ensayo no destructivo como lo es el ultrasonido.

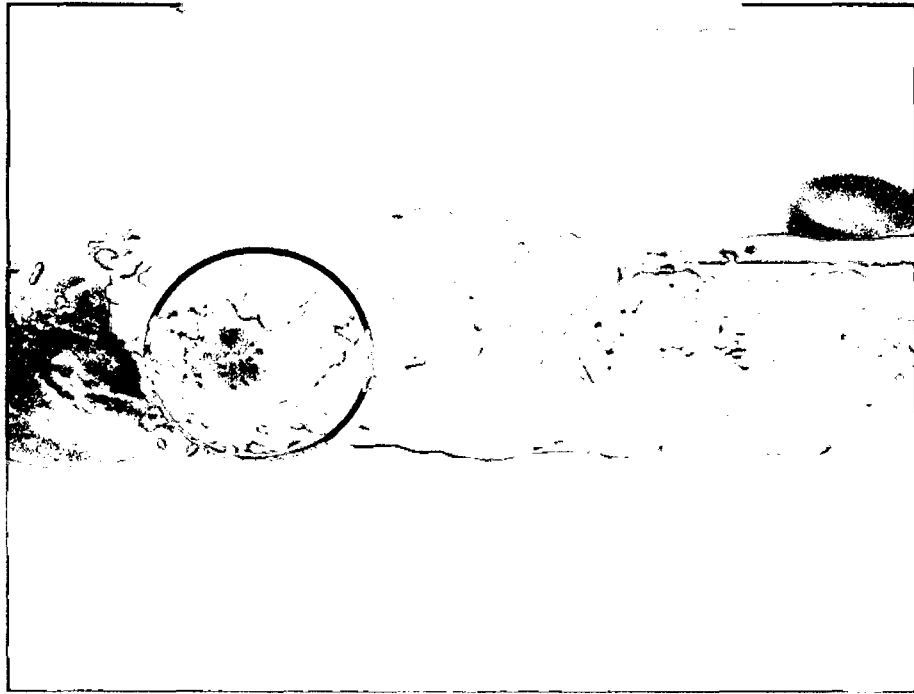


Figura 3.16: Proceso de interpretación de resultados de la prueba de líquidos penetrantes.

3.1.3.2 Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales del E.A.P. De Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Cajamarca, como se muestra en la Figura 3.17. Dichos ensayos se realizaron en una máquina de ensayo universal, provisto de dos mordazas dentadas antideslizantes de plano inclinado (del tipo universal).

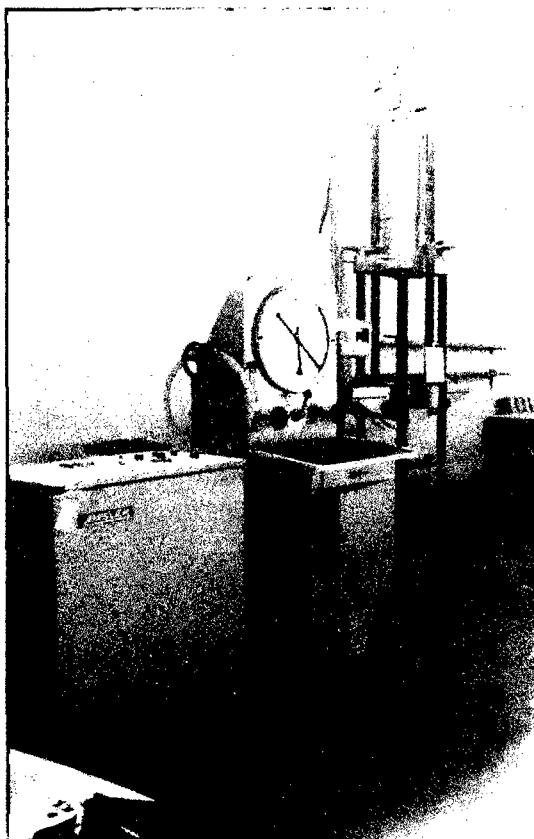


Figura 3.17: Máquina universal, para ensayo a tracción.

Método de Ensayo de la Probeta

La distancia mínima entre las mordazas de la máquina debe ser igual al menos a 8 veces el diámetro de la barra, para juntas directas a tope.

Las probetas deben ser rotas bajo carga de tracción, y la máxima carga debe ser determinada. El esfuerzo de tracción debe ser obtenido dividiendo la máxima carga entre el área transversal nominal de la barra.

Criterio de Aceptación

El esfuerzo de tracción no debe ser menor a **1.25** veces el esfuerzo de fluencia mínimo especificado del tipo y grado de barra a ser unido, a menos que se encuentre especificado de otra manera por la especificación general.

Debido a que el esfuerzo de fluencia mínimo especificado para las barras corrugadas ASTM A615 y ASTM A706 es de 4200 Kg/cm^2 , el esfuerzo de tracción no deberá ser menor a 5250 Kg/cm^2

3.1.3.2.1 Esquema de barras a ensayar

El esquema de barras a ensayar se muestra en la Figura 3.18; donde la longitud de la probeta (L_p) tiene una longitud aproximada de 45 cm, la soldadura realizada se encuentra a la mitad de dicha longitud ($L_p/2$).

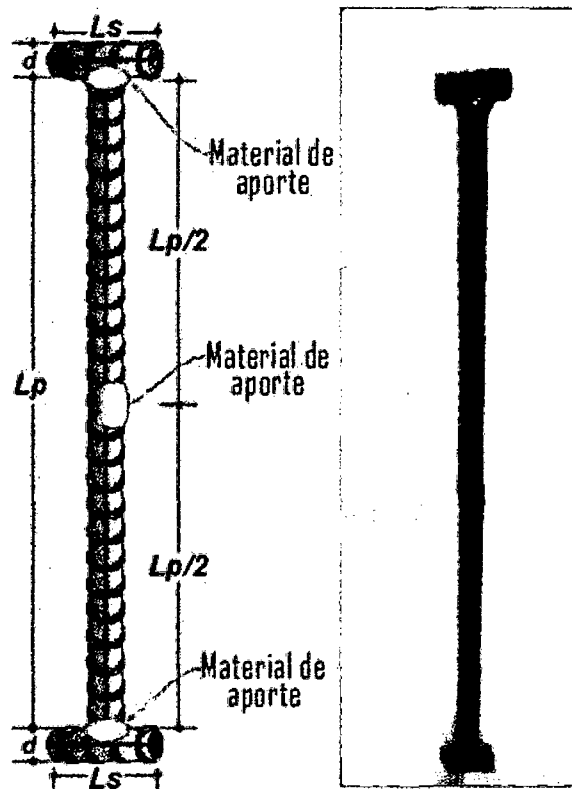


Figura 3.18: Esquema de barra para ensayo a tracción.

3.1.3.2.2 Medición de la probeta

La medición de la probeta antes de ser ensayada a tracción es importante, debido a que es un dato importante para hallar las deformaciones unitarias correspondientes. Las medidas se tomarán de la parte interior de los anclajes es decir con esta medición hallaremos el valor de " L_p " como se muestra en la Figura 3.19, en donde ve el procedimiento de medición.



Figura 3.19: Determinación de la medida de la probeta (Lp).

3.1.3.2.3 Registro

Para el registro de las deformaciones se utilizan los datos de las lecturas tomadas por medio del nivel hacia la hoja milimetrada, como se muestra en la Figura 3.20. Estas lecturas de deformación se anotaron por cada 500 Kg de carga aplicada.

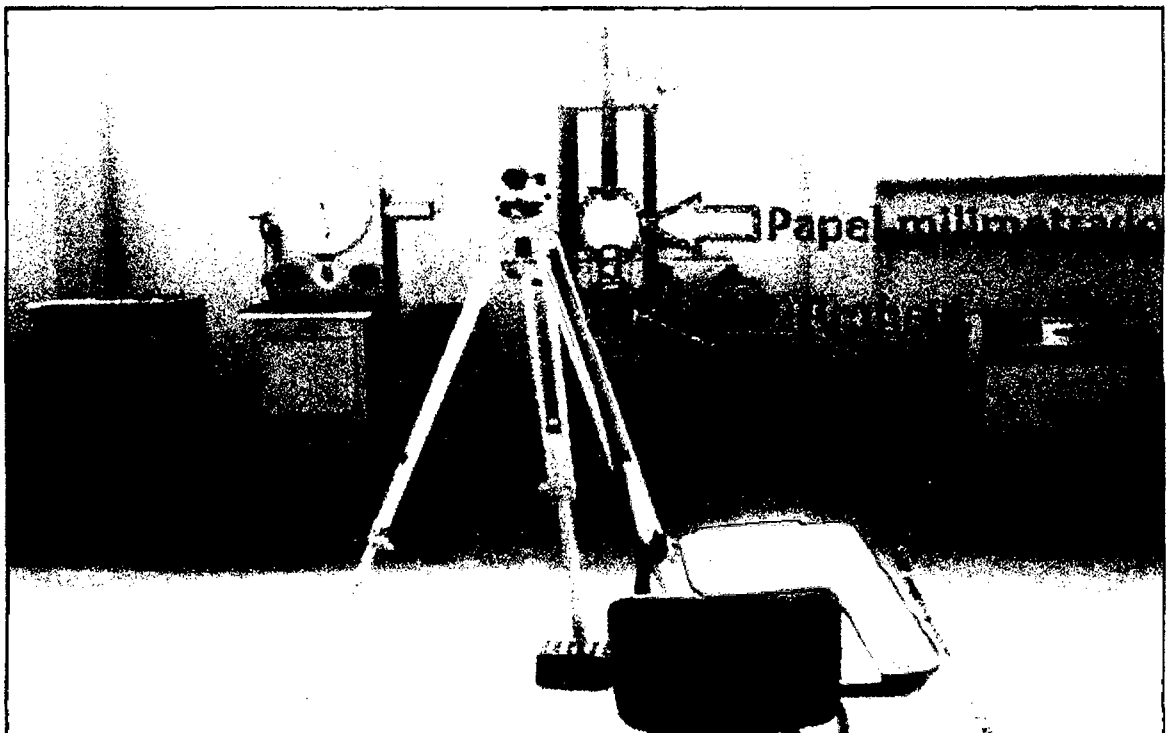


Figura 3.20: Registro cargas y deformaciones de la probeta soldada.

3.2 TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

3.2.1 Resultados de la prueba por Líquidos Penetrantes

3.2.1.1 Prueba de Líquidos Penetrantes en la barra corrugada ASTM A 615

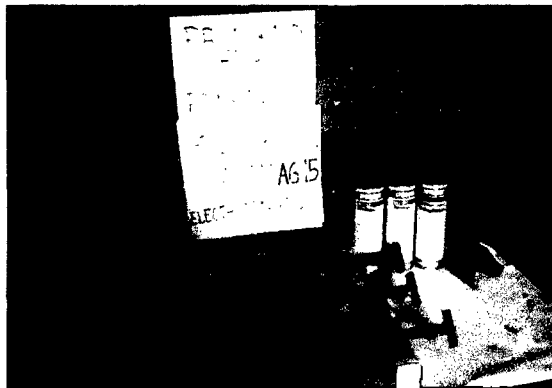
3.2.1.1.1 Prueba con Líquidos Penetrantes en soldaduras con el electrodo E6011

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (\varnothing 1/2") – Electrodo E6011

Procedimiento	: Inspección por Tinta Penetrante
Norma	: ASTM E 165
Penetrante	: PENETRANT (SKL-SP2)
Removedor	: NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)
Revelador	: DEVELADOR (SKD-S2)
Solvente	: THINNER

Parámetros de inspección
(Tiempo en minutos)

Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
10 min	20 min	10 min	20 min	10 min



(1)



(2)

Figura 3.21: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A615 de \varnothing 1/2" en soldaduras con electrodo E6011

En la Figura 3.21 (2), se puede notar que luego de aplicar el revelador la discontinuidad es de inclusiones de escoria debido a que el líquido penetrante se ha esparcido en gran cantidad del metal de soldadura, además se pueda apreciar que existe salpicadura tanto en el metal base como en el metal de aporte, esto debido al mal control del amperaje.

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (Ø 5/8") – Electrodo E6011

Procedimiento : Inspección por Tinta Penetrante
 Norma : ASTM E 165
 Penetrante : PENETRANT (SKL-SP2)
 Removedor : NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)
 Revelador : DEVELADOR (SKD-S2)

Parámetros de inspección (Tiempo en minutos)	Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
	10 min	20 min	10 min	20 min	10 min

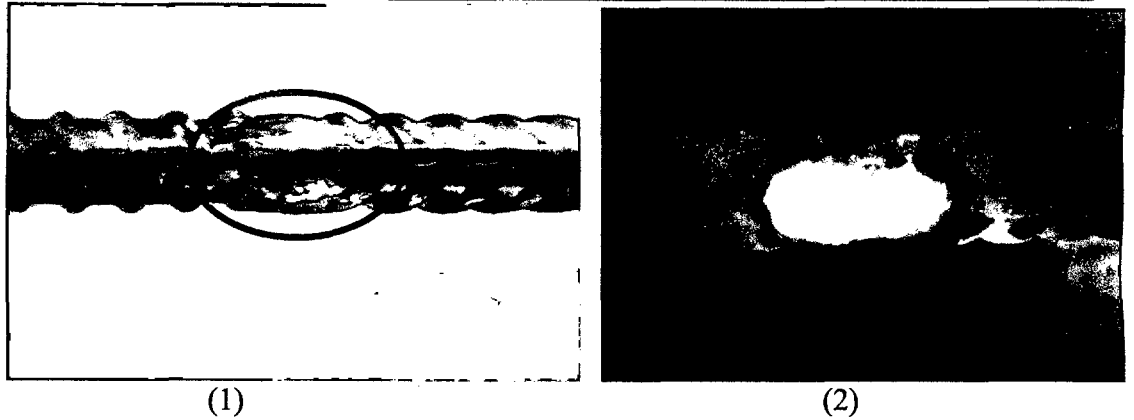


Figura 3.22: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A615 de Ø 5/8" en soldaduras con electrodo E6011

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (Ø 3/4") – Electrodo E6011

Procedimiento : Inspección por Tinta Penetrante
 Norma : ASTM E 165
 Penetrante : PENETRANT (SKL-SP2)
 Removedor : NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)
 Revelador : DEVELADOR (SKD-S2)

Parámetros de inspección (Tiempo en minutos)	Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
	10 min	20 min	10 min	20 min	10 min

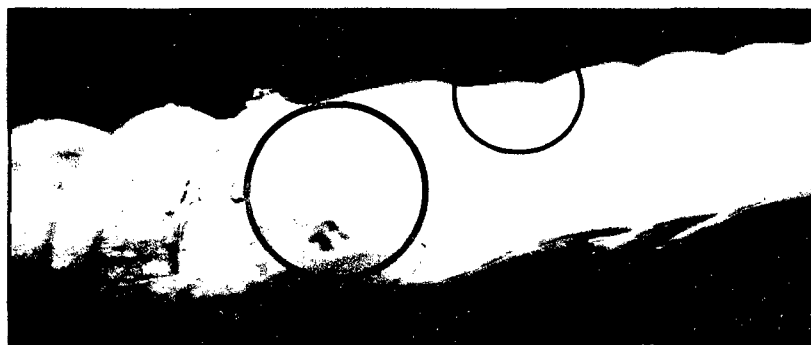


Figura 3.23: Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A615 de Ø 3/4" en soldaduras con electrodo E6011

Las soldaduras realizadas con electrodo E6011 muestran discontinuidades en su mayoría de inclusión de escoria, fusión incompleta y porosidad dispersa. La prueba de líquidos penetrantes de la soldadura muestra o indica por ejemplo en la Figura 3.23, que existe una porosidad dispersa al momento de aplicar el revelador.

3.2.1.1.2 Prueba con Líquidos Penetrantes en soldaduras con el electrodo E7018

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (Ø 1/2") – Electrodo E7018

Procedimiento : Inspección por Tinta Penetrante
 Norma : ASTM E 165
 Penetrante : PENETRANT (SKL-SP2)
 Removedor : NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)
 Revelador : DEVELADOR (SKD-S2)

Parámetros de inspección
(Tiempo en minutos)

Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
10 min	20 min	10 min	20 min	10 min



Figura 3.24: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A615 de Ø 1/2" en soldaduras con electrodo E7018

La prueba de inspección por líquidos penetrantes aplicados a las soldaduras realizadas con electrodo E7018, indican una leve porosidad, en la Figura 3.24 (2), se aprecia que luego de aplicar el revelador se puede notar porosidad vermicular o alargada, es decir que este poro bien desde la raíz de la soldadura, debido a que queda el gas protector atrapado durante el proceso de soldadura.

En las Figura 3.25 y 3.26, se aprecia mejores condiciones de la soldadura, debido a que al aplicar el revelador muestran indicaciones irrelevantes, por lo que se podría decir que las pequeñas discontinuidades que se presentan se desprecian.

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (\varnothing 5/8") – Electrodo E7018

Procedimiento : Inspección por Tinta Penetrante
 Norma : ASTM E 165
 Penetrante : PENETRANT (SKL-SP2)
 Removedor : NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)
 Revelador : DEVELADOR (SKD-S2)

Parámetros de inspección
 (Tiempo en minutos)

Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
10 min	20 min	10 min	20 min	10 min

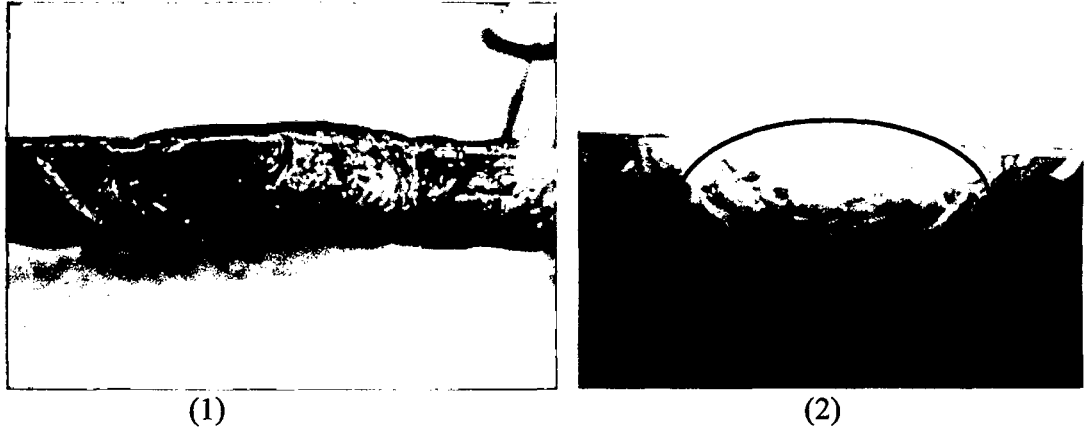


Figura 3.25: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado;
 barras ASTM A615 de \varnothing 5/8" en soldaduras con electrodo E7018

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (\varnothing 3/4") – Electrodo E7018

Procedimiento : Inspección por Tinta Penetrante
 Norma : ASTM E 165
 Penetrante : PENETRANT (SKL-SP2)
 Removedor : NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)
 Revelador : DEVELADOR (SKD-S2)

Parámetros de inspección
 (Tiempo en minutos)

Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
10 min	20 min	10 min	20 min	10 min

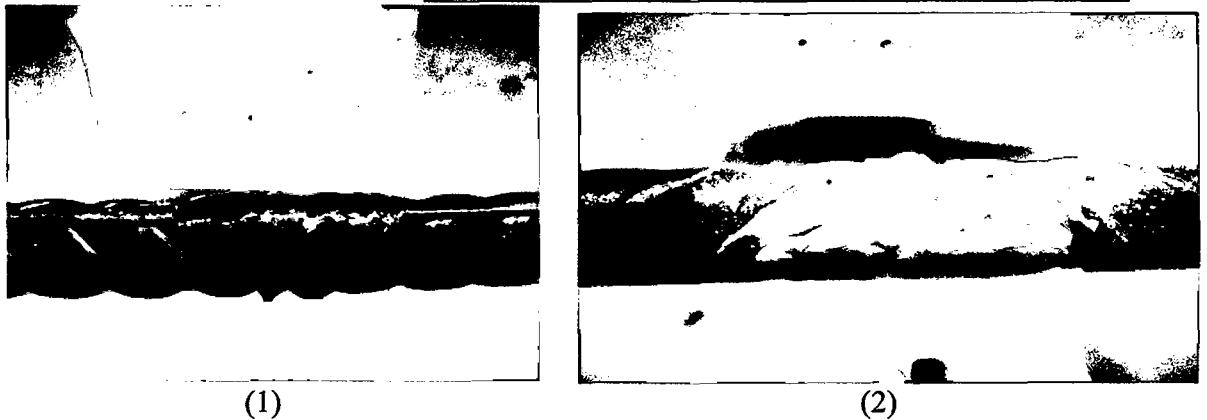


Figura 3.26: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado;
 barras ASTM A615 de \varnothing 3/4" en soldaduras con electrodo E7018

3.2.1.2 Prueba de Líquidos Penetrantes en la barra corrugada ASTM A 706

3.2.1.2.1 Prueba con Líquidos Penetrantes en soldaduras con el electrodo E6011

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (\varnothing 1/2") – Electrodo E6011

Procedimiento : Inspección por Tinta Penetrante
 Norma : ASTM E 165
 Penetrante : PENETRANT (SKL-SP2)
 Removedor : NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)
 Revelador : DEVELADOR (SKD-S2)

Parámetros de inspección (Tiempo en minutos)	Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
	10 min	20 min	10 min	20 min	10 min



(1)



(2)

Figura 3.27: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado;
 barras ASTM A706 de \varnothing 1/2" en soldaduras con electrodo E6011

En cuanto a las soldaduras realizadas con electrodo E6011 para barras ASTM A 706 (\varnothing 1/2"), se muestra al aplicar el revelador que las discontinuidades vienen a ser parecidas a las mostradas que para la barra ASTM A615 (\varnothing 1/2")

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (\varnothing 5/8") – Electrodo E6011

Procedimiento : Inspección por Tinta Penetrante
 Norma : ASTM E 165
 Penetrante : PENETRANT (SKL-SP2)
 Removedor : NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)
 Revelador : DEVELADOR (SKD-S2)

Parámetros de inspección (Tiempo en minutos)	Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
	10 min	20 min	10 min	20 min	10 min



Figura 3.28: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A706 de \varnothing 5/8" en soldaduras con electrodo E6011

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (\varnothing 3/4") – Electrodo E6011

Procedimiento : Inspección por Tinta Penetrante
 Norma : ASTM E 165
 Penetrante : PENETRANT (SKL-SP2)
 Removedor : NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)
 Revelador : DEVELADOR (SKD-S2)

Parámetros de inspección (Tiempo en minutos)	Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
	10 min	20 min	10 min	20 min	10 min

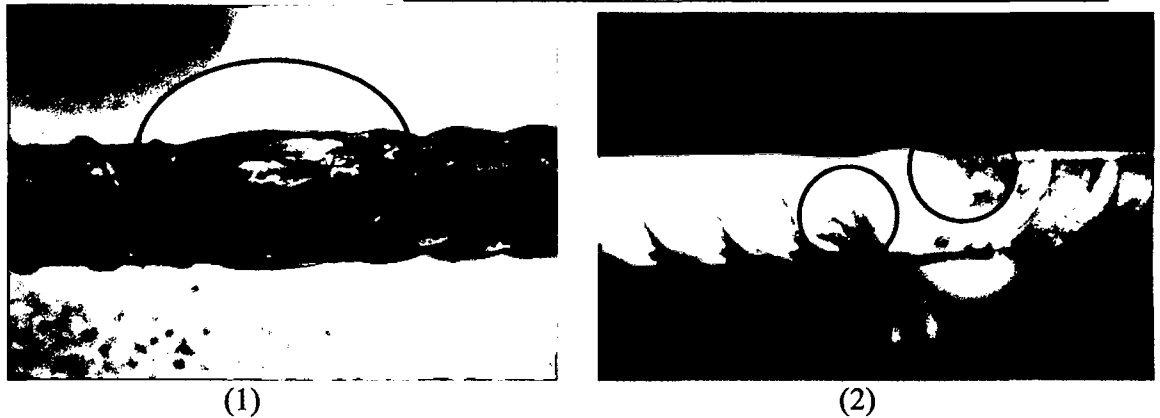


Figura 3.29: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A706 de \varnothing 3/4" en soldaduras con electrodo E6011

En la Figura 3.28 (2), se aprecian discontinuidades como: fusión incompleta, grietas de solidificación y porosidad dispersa además de salpicadura en el metal base, en consecuencia se puede decir que las soldaduras realizadas con electrodo E6011, tienen mayores casos de discontinuidades con indicaciones relevantes.

3.2.1.2.2 Prueba con Líquidos Penetrantes en soldaduras con el electrodo E7018

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (\varnothing 1/2") – Electrodo E7018

Procedimiento : Inspección por Tinta Penetrante
 Norma : ASTM E 165
 Penetrante : PENETRANT (SKL-SP2)
 Removedor : NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)
 Revelador : DEVELADOR (SKD-S2)

Parámetros de inspección
 (Tiempo en minutos)

Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
10 min	20 min	10 min	20 min	10 min



Figura 3.30: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado;
 barras ASTM A706 de \varnothing 1/2" en soldaduras con electrodo E7018

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (\varnothing 5/8") Electrodo E7018

Procedimiento : Inspección por Tinta Penetrante
 Norma : ASTM E 165
 Penetrante : PENETRANT (SKL-SP2)
 Removedor : NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)
 Revelador : DEVELADOR (SKD-S2)

Parámetros de inspección
 (Tiempo en minutos)

Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
10 min	20 min	10 min	20 min	10 min

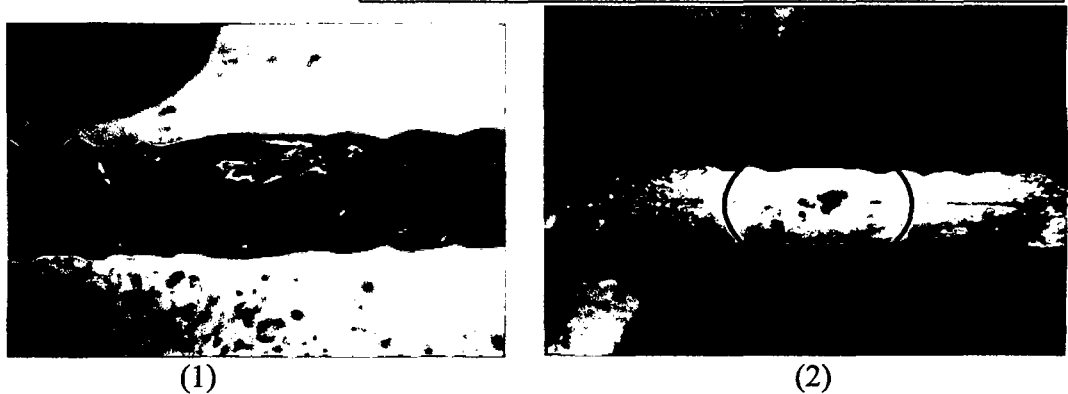


Figura 3.31: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado;
 barras ASTM A706 de \varnothing 5/8" en soldaduras con electrodo E7018

Prueba con Líquidos Penetrantes en barras de (\varnothing 3/4") Electrodo E7018

Norma : ASTM E 165
Penetrante : PENETRANT (SKL-SP2)
Revelador : DEVELADOR (SKD-S2)

Parámetros de inspección
(Tiempo en minutos)

Limpieza	Secado	Penetración	Secado	Revelado
10 min	20 min	10 min	20 min	10 min

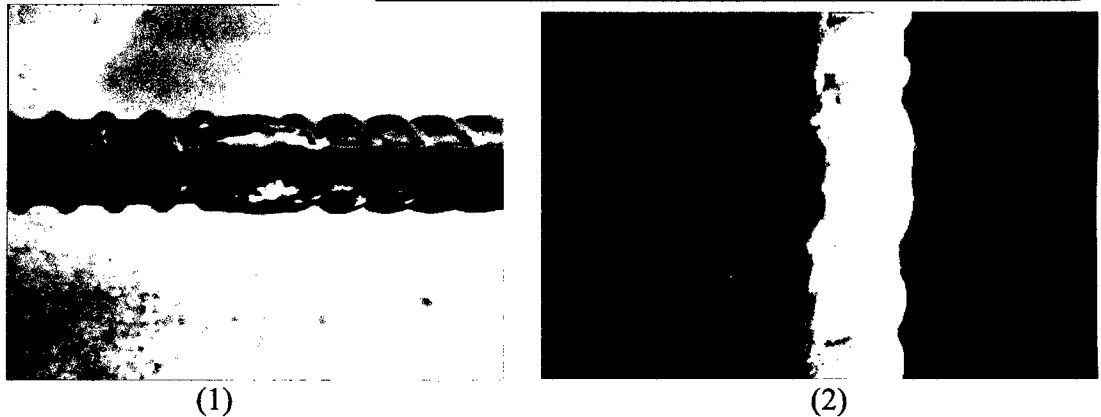


Figura 3.32: (1) Aplicación del Penetrante. (2) Aplicación y tiempo de Revelado; barras ASTM A706 de \varnothing 3/4" en soldaduras con electrodo E7018

La Figura 3.30 (2), se encuentran indicaciones relevantes sobre el tipo de discontinuidad que se está presentando, debido a que la discontinuidad es una porosidad vermicular (tubular), es decir que este poro viene desde la raíz de la soldadura debido al gas protector atrapado durante el proceso de soldadura.

En la Figura 3.31 (2), las discontinuidades que se muestran son inclusión de escoria y grietas de solidificación, esto debido a los sólidos atrapados en el metal de soldadura y entre metal base y metal de soldadura.

En la Figura 3.32 (2), las indicaciones que se presentan son irrelevantes, debido a que las discontinuidades son de poca importancia. En este caso se aprecia pequeñas partes de salpicadura en el material base y material de aporte, esto acusado por el mal control del amperaje al momento de soldar.

Teniendo las indicaciones de soldaduras realizadas con el electrodo E7018, se puede concluir que las indicaciones son un tanto irrelevantes comparadas con aquellas soldaduras realizadas con el electrodo E6011.

3.2.2 Resultados de la prueba a Tracción

Los resultados obtenidos de los ensayos a tracción de las barras soldadas de ambos tipos de aceros y electrodos se presentan en las tablas enumeradas del 3.8 al 3.19: La columna (1) muestra el código de la probeta. La columna (2) y (3) muestra la longitud de la probeta (L_p) en milímetros y el alargamiento (ΔL) en milímetros respectivamente. La columna (4) muestra la carga máxima (P), la columna (5) muestra la deformación unitaria máxima (E_{su}), la columna (6) muestra el esfuerzo máximo (F_{su}) y la columna (7) muestra la relación entre el esfuerzo máximo y el esfuerzo de fluencia especificado de 4200 kg/cm^2 .

Cada tabla de resultados obtenidos del ensayo a tracción, tiene su respectivo diagrama de esfuerzo - deformación. Estos diagramas están calculados con los datos promedios de las deformaciones unitarias para cada carga registrada (cada 500kg) de las soldaduras teniendo en cuenta el tipo de acero, diámetro y electrodo utilizado. En la Figura 3.33 se muestra la probeta soldada en la máquina de ensayo a tracción.

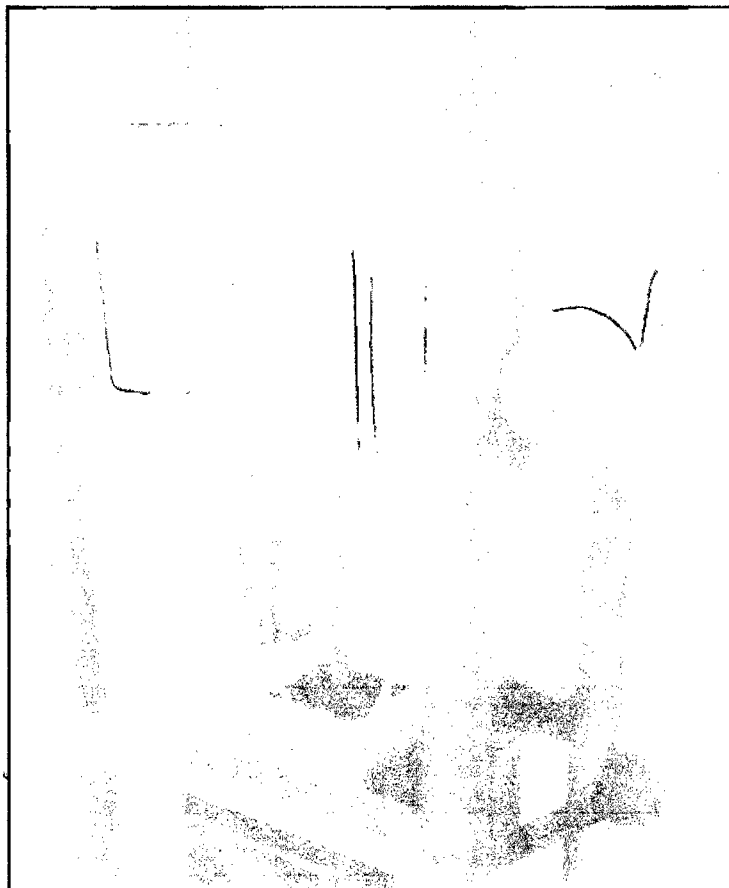


Figura 3.33: Probeta soldada para ensayo a tracción de la soldadura.

3.2.2.1 Resultados del ensayo a tracción de la barra corrugada ASTM A 615

Para llegar a un mejor entendimiento del comportamiento de las soldaduras al ensayo a tracción se ha elaborado el ensayo a tracción de una barra sin soldadura, del cual se ha obtenido sus deformaciones unitarias registradas cada 500 kg; esto ha permitido la realización del diagrama esfuerzo – deformación de dicha barra como se muestra en la Figura 3.34, con fines de comparación con aquellas barras soldadas.

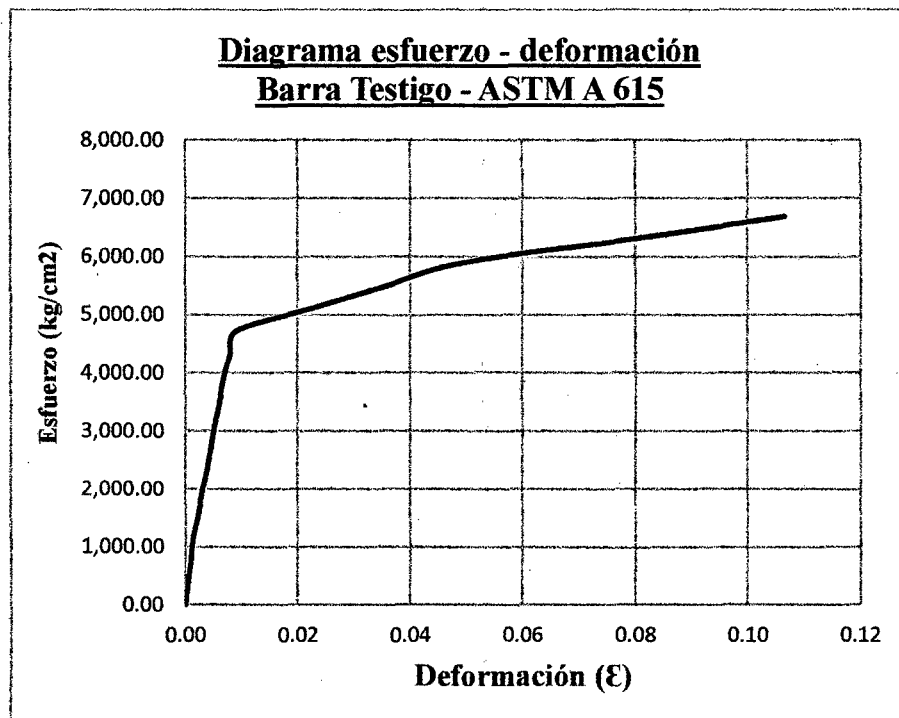


Figura 3.34: Diagrama esfuerzo – deformación de barra ASTM A615 sin soldadura
Ø 1/2"

3.2.2.1.1 Resultados de ensayo tracción de barras de Ø 1/2"

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E6011

Las deformaciones unitarias y la relación F_{su}/F_y que se ha obtenido de ensayar a tracción la barra de Ø 1/2" soldada con el electrodo E6011, son muy bajas. La Tabla 3.8 muestra los resultados obtenidos y en la Figura 3.35 se presenta el diagrama esfuerzo deformación de los datos promedio obtenidos.

Tabla 3.8: Resultados de ensayo a tracción de barras soldadas Ø 1/2” – Electrodo

E6011

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	εsu (ΔL/Lp)	Fsu (Kg/cm ²)	Fsu/ Fy
P25 - #4SpC	460.00	6.00	5400.00	0.01	4,251.97	1.01
P26 - #4SpC	460.00	7.00	5,700.00	0.02	4,488.19	1.07
P27 - #4SpC	462.00	10.00	6,100.00	0.02	4,803.15	1.14
P28 - #4SpC	458.00	9.00	5,500.00	0.02	4,330.71	1.03

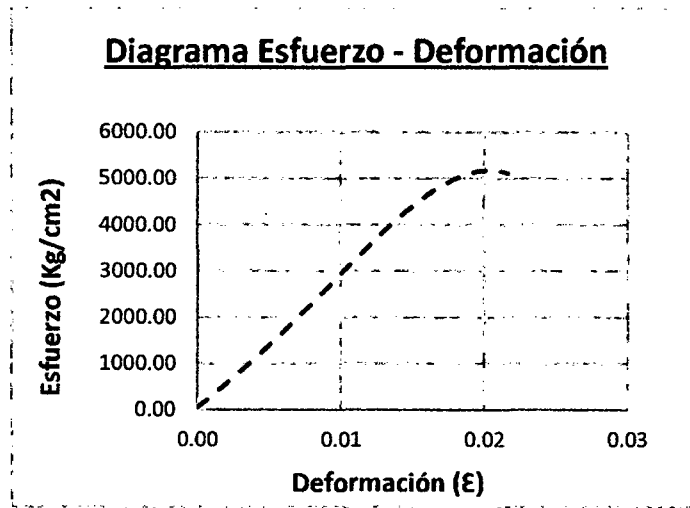


Figura 3.35: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas Ø 1/2” con electrodo E6011.

La deformación unitaria de las barras ASTM A 615 de Ø 1/2” soldadas con el electrodo E6011 son valores bajos, como se muestra en la Figura 3.35, llegan a alcanzar solo el 0.02; además de que sus esfuerzos últimos no llegan a alcanzar el esfuerzo mínimo de 5250 kg/cm² para que la relación Fsu/Fy sea mayor al 1.25.

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E7018

Tabla 3.9: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas Ø 1/2”– Electrodo

E7018

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	εsu (ΔL/Lp)	Fsu (Kg/cm ²)	Fsu/ Fy
P29 - #4SpS	466.00	12.00	5,725.00	0.03	4,507.87	1.07
P30- #4SpS	455.00	19.00	6,650.00	0.04	5,236.22	1.25
P31 - #4SpS	458.00	23.00	6,700.00	0.05	5,275.59	1.26
P32 - #4SpS	460.00	15.00	6,550.00	0.03	5,157.48	1.23

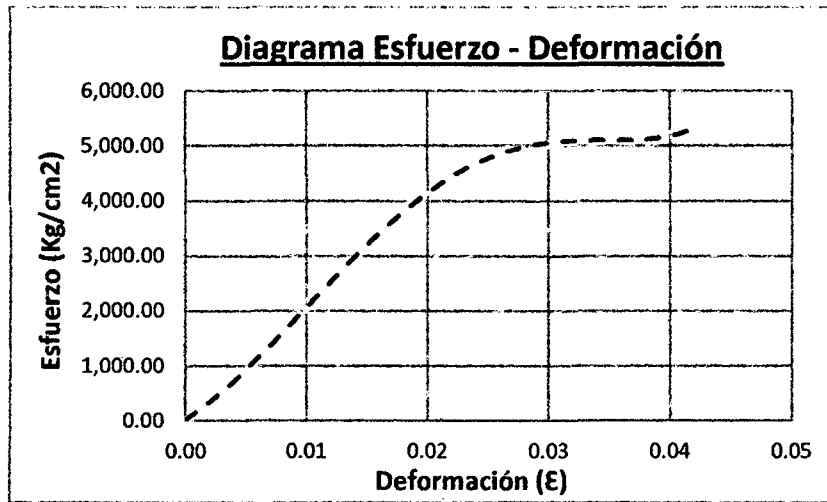


Figura 3.36: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas Ø 1/2” con electrodo E7018.

Los resultados obtenidos de los ensayos a tracción en las soldaduras de las barras ASTM A615 de Ø 1/2”, con el electrodo E7018 muestran una mejoría con respecto a las barras soldadas con el electrodo E6011, ya que se muestra un aumento de su deformación unitaria, los cuales sobrepasan al 0.04. En cuanto al esfuerzo máximo alcanzado tienen un leve aumento.

3.2.2.1.2 Resultados de ensayo tracción de barras de Ø 5/8”

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E6011

Como se muestra en la Tabla 3.10 los resultados obtenidos de los ensayos a tracción de las barras de Ø 5/8” soldadas con el electrodo E6011, ninguna de las relaciones F_{su}/F_y alcanza el mínimo especificado de 1.25. En la Figura 3.37 se muestra que el promedio de las deformaciones obtenidas sobrepasa el 0.03, lo cual es una mejoría con respecto a las barra de Ø 1/2” soldadas con el electrodo E6011.

Tabla 3.10: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas Ø 5/8”– Electrodo E6011

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	εsu (ΔL/Lp)	Fsu (Kg/cm ²)	Fsu/ Fy
P33 - #5SpC	470.00	10.20	8,675.00	0.02	4,381.31	1.04
P34 - #5SpC	462.00	17.50	9,850.00	0.04	4,974.75	1.18
P35 - #5SpC	462.00	16.00	9,700.00	0.03	4,898.99	1.17
P36 - #5SpC	465.00	14.00	8,920.00	0.03	4,505.05	1.07

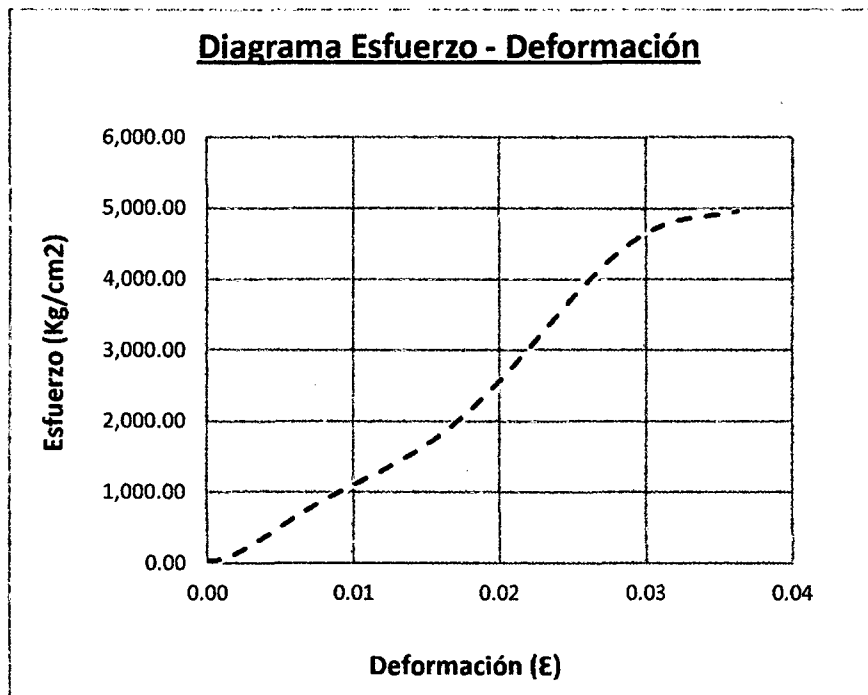


Figura 3.37: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas Ø 5/8” con electrodo E6011.

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E7018

La Tabla 3.11 muestra los resultados de los ensayos a tracción de las barras de Ø 5/8”, soldadas con el electrodo E7018, en donde se puede ver que sus relaciones F_{su}/F_y de la mayoría de las probetas ensayadas sobrepasan al mínimo especificado (1.25).

En cuanto a las deformaciones unitarias alcanzadas por esta barra soldada con el electrodo E7018, presenta mayores valores con respecto a la barra de Ø 5/8” soldadas con el electrodo E6011.

Tabla 3.11: Resultados de ensayo a tracción de barras soldadas Ø 5/8” – Electrodo E7018

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	ε _{su} (ΔL/Lp)	F _{su} (Kg/cm ²)	F _{su} / F _y
P37 - #5SpS	465.00	16.50	10,850.00	0.04	5,479.80	1.30
P38 - #5SpS	468.00	13.00	9,450.00	0.03	4,772.73	1.14
P39 - #5SpS	460.00	16.50	10,575.00	0.04	5,340.91	1.27
P40 - #5SpS	464.00	18.00	10,810.00	0.04	5,459.60	1.30

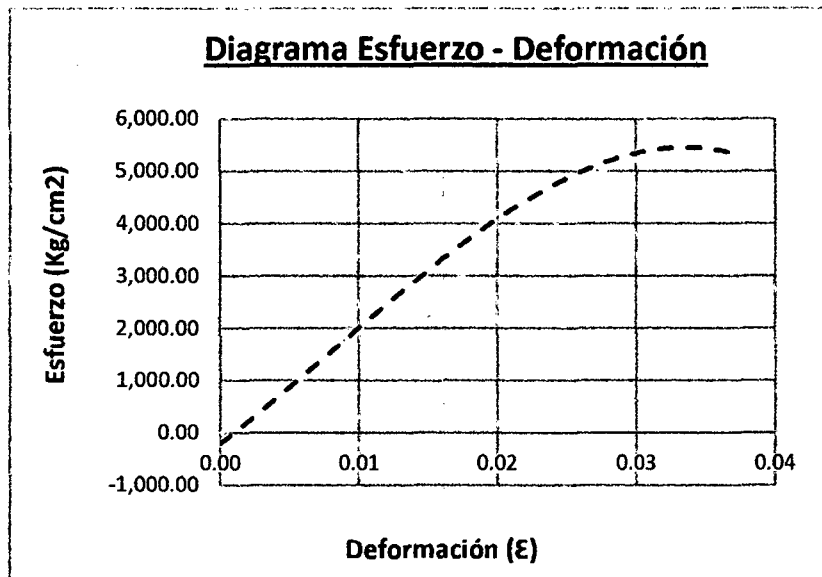


Figura 3.38: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas Ø 5/8” con electrodo E7018.

3.2.2.1.3 Resultados de ensayo tracción de barras de Ø 3/4”

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E6011

Como se muestra en la Tabla 3.12 los resultados obtenidos de los ensayos a tracción de las barras de Ø 3/4” soldadas con el electrodo E6011, ninguna de las relaciones F_{su}/F_y alcanza el mínimo especificado de 1.25.

En la Figura 3.39 se muestra que el promedio de las deformaciones obtenidas no alcanza al 0.03, lo cual indica que tiene una baja capacidad de deformación, y por ende tendría una fractura frágil ante cualquier sollicitación de sismo u otro cualquier evento.

Tabla 3.12: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas Ø 3/4”– Electrodo E6011

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	εsu (ΔL/Lp)	Fsu (Kg/cm²)	Fsu/ Fy
P41 - #6SpC	469.00	16.50	12,750.00	0.04	4,473.68	1.07
P42 - #6SpC	467.00	10.00	12,950.00	0.02	4,543.86	1.08
P43 - #6SpC	464.00	13.00	13,450.00	0.03	4,719.30	1.12
P44 - #6SpC	466.00	8.50	12,750.00	0.02	4,473.68	1.07

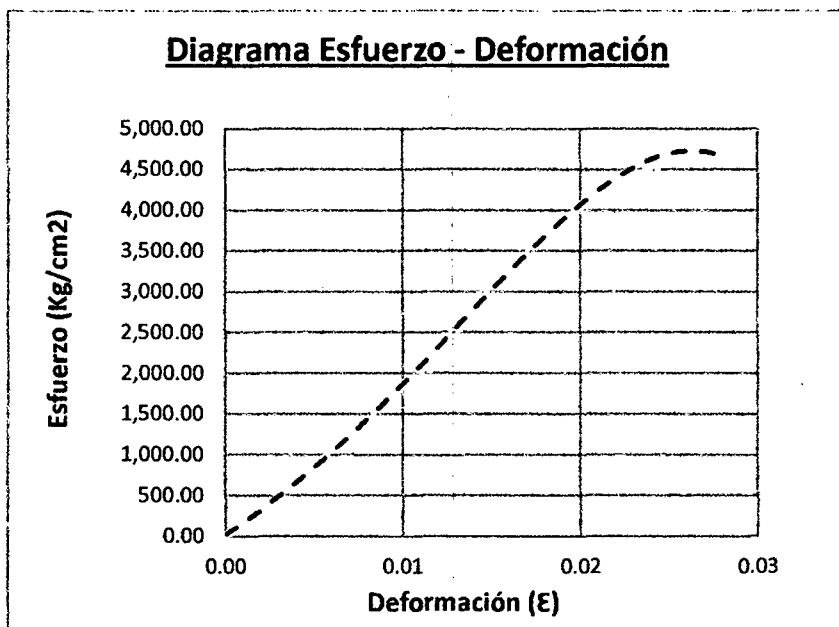


Figura 3.39: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas Ø 3/4” con electrodo E6011.

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E7018

Como se muestra en la Tabla 3.13 los resultados obtenidos de los ensayos a tracción de las barras de Ø 3/4” soldadas con el electrodo E7018, solo una de las probetas en cuanto a su relación F_{su}/F_y alcanza el mínimo especificado de 1.25, sin embargo muestra una leve mejoría con respecto a la relación F_{su}/F_y alcanzada por las barras de Ø3/4 soldadas con el electrodo E6011.

En la Figura 3.40 se muestra que el promedio de las deformaciones unitarias obtenidas sobrepasa el 0.04, lo cual es una mejoría con respecto a las barra de Ø 3/4” soldadas con el electrodo E6011.

Tabla 3.13: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas Ø3/4 – Electrodo E7018

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	εsu (ΔL/Lp)	Fsu (Kg/cm ²)	Fsu/ Fy
P45 - #6SpS	465.00	21.00	15,075.00	0.05	5,289.47	1.26
P46 - #6SpS	473.00	15.00	13,600.00	0.03	4,771.93	1.14
P47 - #6SpS	465.00	20.00	14,750.00	0.04	5,175.44	1.23
P48 - #6SpS	x	x	x	x	x	

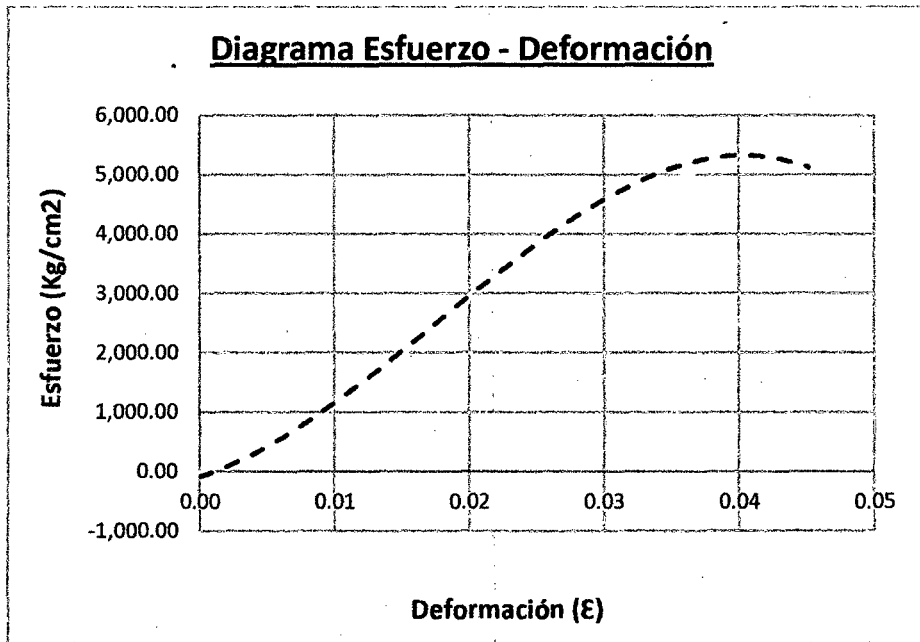


Figura 3.40: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas Ø 3/4” con electrodo E7818.

Los resultados obtenidos que se muestran para la barra ASTM A 615, muestran que para el electrodo E6011 se tiene una baja deformación unitaria y la relación F_{su}/F_y en la mayoría de casos está por debajo del 1.25 mínimo especificado, por lo que las fracturas de las soldaduras son de forma frágil. En cuanto a la relación F_{su}/F_y para la soldadura con el electrodo E7018 muestran en algunos casos que están por encima del 1.25 especificado y su deformación unitaria máxima es mayor al 0.02, lo cual indica que tiene una mayor capacidad de deformación.

3.2.2.2 Resultados del ensayo a tracción de la barra corrugada ASTM A 706

De la misma manera que para la barra ASTM A 615, para este tipo de barra se ha elaborado el ensayo a tracción de una barra sin soldadura, del cual se ha obtenido sus deformaciones unitarias registradas cada 500 kg; esto ha permitido la realización del diagrama esfuerzo – deformación de dicha barra como se muestra en la Figura 3.41, con fines de comparación con aquellas barras soldadas.

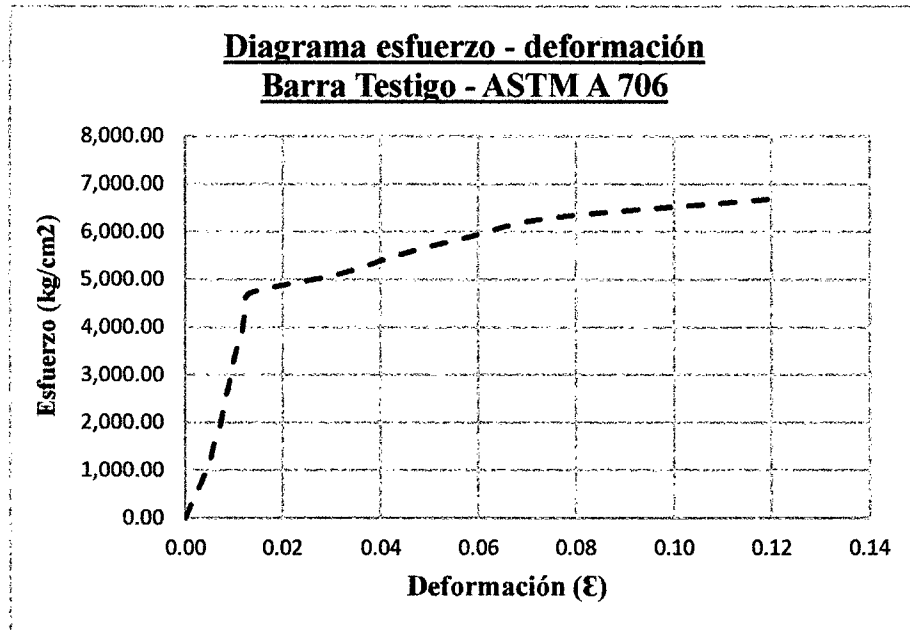


Figura 3.41: Diagrama esfuerzo – deformación de barra ASTM A706 sin soldadura de Ø 1/2”

3.2.2.2.1 Resultados de ensayo tracción de barras de Ø 1/2”

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E6011

Las deformaciones unitarias y la relación F_{su}/F_y que se ha obtenido de ensayar a tracción de la barra de Ø 1/2” soldada con el electrodo E6011, son bajas. En la Tabla 3.14, se muestra los resultados obtenidos, y se puede ver que las deformaciones unitarias de las barras soldadas solo alcanzan el 0.02, los cuales indican que tienen poca capacidad de deformación y ductilidad.

En cuanto a los valores alcanzados de la relación F_{su}/F_y de las barras soldadas de este tipo de diámetro, no alcanzan al valor mínimo especificado anteriormente (1.25). La

Figura 3.42 muestra el diagrama esfuerzo – deformación del promedio de los valores obtenidos de las barras ensayadas a tracción; en donde se puede apreciar que la deformación unitaria y el esfuerzo máximo son valores bajos.

Tabla 3.14: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldada Ø1/2” – Electrodo E6011

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	εsu (ΔL/Lp)	Fsu (Kg/cm ²)	Fsu/ Fy
P01 - #4BC	x	x	x	x	x	x
P02 - #4BC	445.00	10.00	5,400.00	0.02	4,251.97	1.01
P03 - #4BC	444.00	8.00	5,450.00	0.02	4,291.34	1.02
P04 - #4BC	451.00	11.50	5,500.00	0.03	4,330.71	1.03

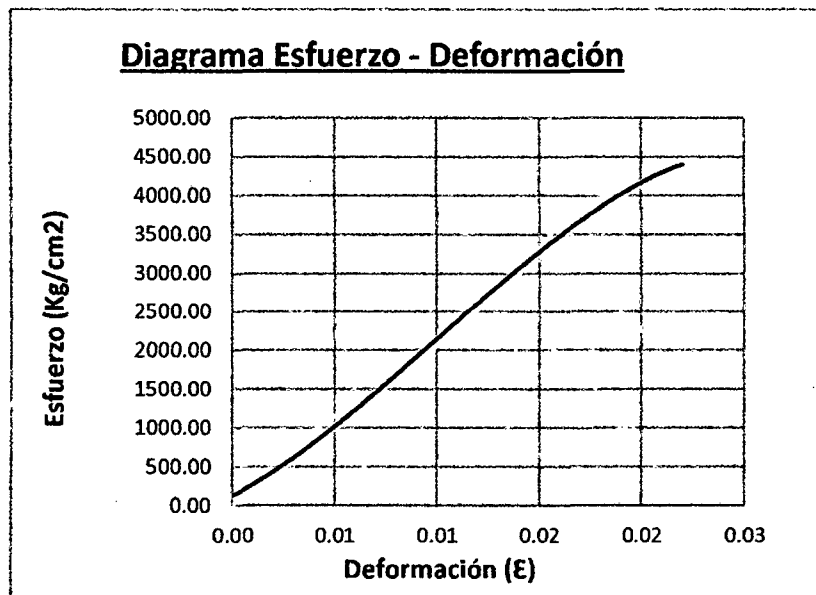


Figura 3.42: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas Ø 1/2” con electrodo E6011.

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E7018

La Tabla 3.15 muestra los resultados de los ensayos a tracción de las barras de Ø 1/2”, soldadas con el electrodo E7018, en donde se puede ver que sus relaciones Fsu/Fy de todas las probetas ensayadas a tracción, sobrepasan al mínimo especificado (1.25). En cuanto a las deformaciones unitarias alcanzadas por estas barras, soldadas con el electrodo E7018, presenta mayores valores con respecto a la barra de Ø 1/2” soldadas con el electrodo E6011.

En la Figura 3.43 se muestra el diagrama esfuerzo – deformación del promedio de los valores obtenidos de las barras ensayadas a tracción; en donde se puede apreciar que la deformación unitaria alcanza valores mayores al 0.04, y el esfuerzo máximo está llegando a un valor de 6,000 Kg/cm².

Tabla 3.15: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldada Ø1/2” – Electrodo E7018

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	εsu (ΔL/Lp)	Fsu (Kg/cm ²)	Fsu/ Fy
P05 - #4BS	448.00	17.00	6,725.00	0.04	5,295.28	1.26
P06 - #4BS	450.00	15.00	6,950.00	0.03	5,472.44	1.30
P07 - #4BS	450.00	19.00	7,250.00	0.04	5,708.66	1.36
P08 - #4BS	446.00	20.00	7,400.00	0.04	5,826.77	1.39

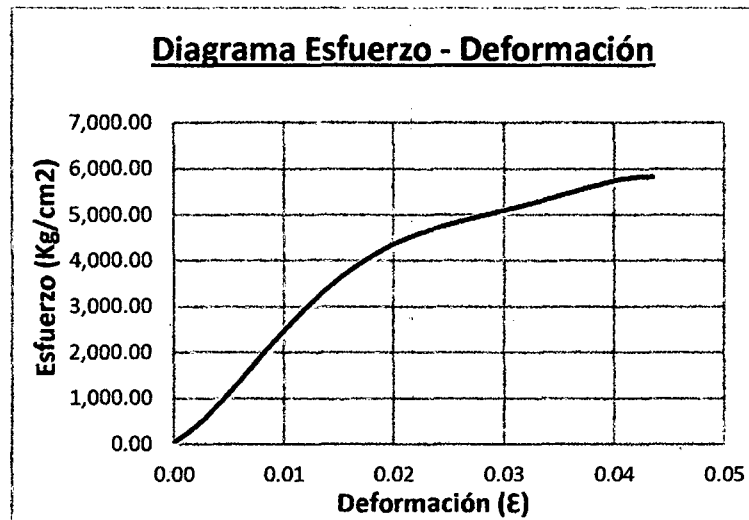


Figura 3.43: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas Ø 1/2” con electrodo E7018.

3.2.2.2.2 Resultados de ensayo tracción de barras de Ø 5/8”

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E6011

Las deformaciones unitarias y la relación Fsu/Fy que se ha obtenido de ensayar a tracción de la barra de Ø 5/8” soldada con el electrodo E6011, son bajas. En la Tabla 3.16, se muestra los resultados obtenidos, y se puede ver que las deformaciones unitarias de algunas de las barras soldadas alcanzan el 0.03, los cuales indican que tienen poca capacidad de deformación o ductilidad.

En cuanto a los valores alcanzados de la relación F_{su}/F_y de las barras soldadas de este tipo de diámetro, no alcanzan al valor mínimo de 1.25. La Figura 3.44 muestra el diagrama esfuerzo – deformación del promedio de los valores obtenidos de las barras ensayadas a tracción; en donde se puede apreciar que la deformación unitaria y el esfuerzo máximo son valores bajos.

Tabla 3.16: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldada $\varnothing 5/8''$ – Electrodo E6011

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	ϵ_{su} ($\Delta L/L_p$)	Fsu (Kg/cm ²)	Fsu/ Fy
P09 - #5BC	450.00	12.00	9,900.00	0.03	5,000.00	1.19
P10 - #5BC	453.00	14.00	10,250.00	0.03	5,176.77	1.23
P11 - #5BC	450.00	11.00	9,850.00	0.02	4,974.75	1.18
P12 - #5BC	450.00	7.00	8,600.00	0.02	4,343.43	1.03

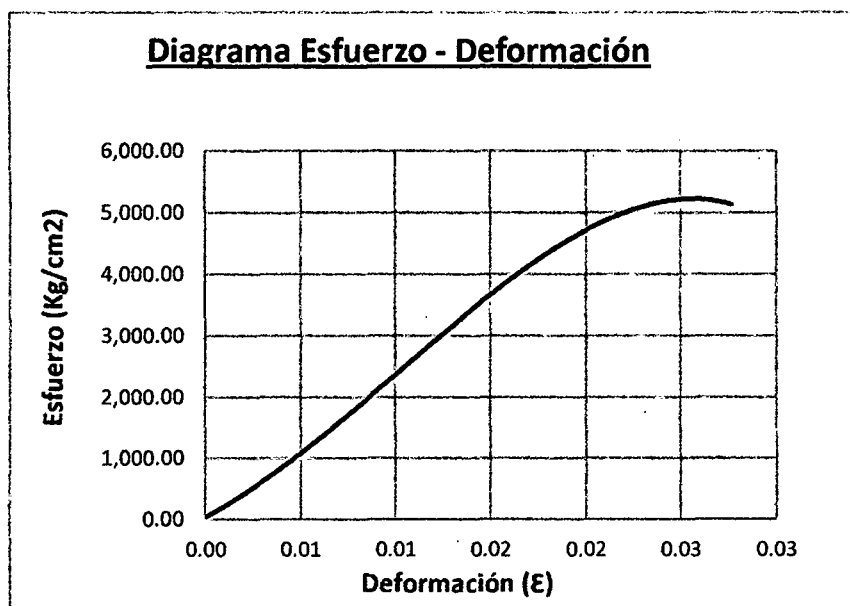


Figura 3.44: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas $\varnothing 5/8''$ con electrodo E6011.

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E7018

La Tabla 3.17 muestra los resultados de los ensayos a tracción de las barras de $\varnothing 5/8''$, soldadas con el electrodo E7018, en donde se puede apreciar que el valor de la relación F_{su}/F_y alcanzada por las probetas ensayadas a tracción, sobrepasan al mínimo especificado (1.25), en incluso son valores mayores alcanzados por las barras ASTM A

615 de $\varnothing 5/8''$ soldadas con electrodo E7018. En cuanto a las deformaciones unitarias alcanzadas por estas barras soldadas con el electrodo E7018, presenta mayores valores con respecto a la barra de $\varnothing 5/8''$ soldadas con el electrodo E6011.

En la Figura 3.45 se muestra el diagrama esfuerzo – deformación del promedio de los valores obtenidos de barras ensayadas a tracción; en donde se puede apreciar que la deformación unitaria alcanza valores mayores al 0.05, y el esfuerzo máximo está llegando a un valor de 6,000 Kg/cm².

Tabla 3.17: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldada $\varnothing 5/8''$ – Electrodo E7018

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	ϵ_{su} ($\Delta L/L_p$)	Fsu (Kg/cm ²)	Fsu/ Fy
P13 - #5BS	451.00	18.00	10,550.00	0.04	5,328.28	1.27
P14 - #5BS	453.00	25.00	10,850.00	0.06	5,479.80	1.30
P15 - #5BS	444.00	25.00	11,200.00	0.06	5,656.57	1.35
P16 - #5BS	444.00	25.00	11,500.00	0.06	5,808.08	1.38

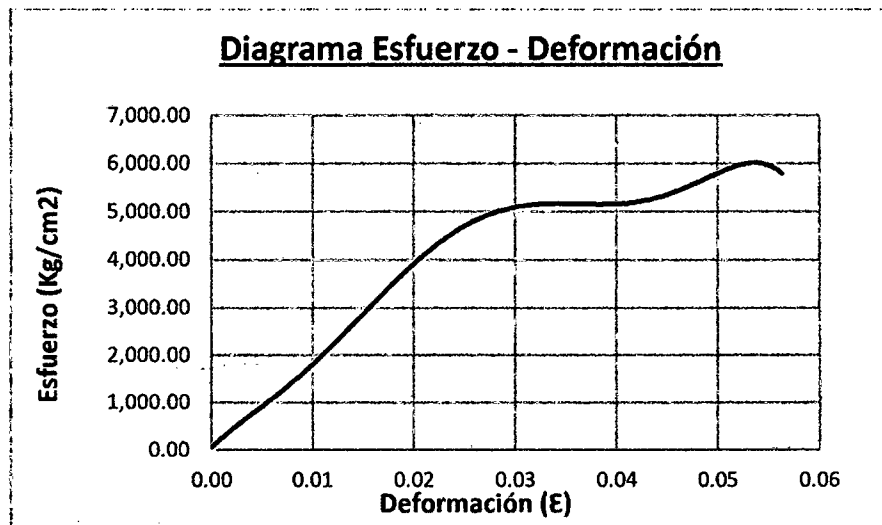


Figura 3.45: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas $\varnothing 5/8''$ con electrodo E7018.

3.2.2.2.3 Resultados de ensayo tracción de barras de $\varnothing 3/4''$

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E6011

Las deformaciones unitarias y la relación Fsu/Fy que se ha obtenido de ensayar a tracción de las barras de $\varnothing 3/4''$ soldadas con el electrodo E6011, no alcanzan a

valores mínimos especificados anteriormente. En la Tabla 3.18, se muestra los resultados obtenidos, y se puede apreciar que las deformaciones unitarias de algunas de las barras soldadas alcanzan el 0.03, los cuales indican que tienen poca capacidad de deformación y ductilidad.

Los valores alcanzados de la relación F_{su}/F_y de las barras soldadas de este tipo de diámetro, no alcanzan al valor mínimo especificado de 1.25. La Figura 3.46 se puede apreciar que la deformación unitaria y el esfuerzo máximo son valores bajos.

Tabla 3.18: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas $\varnothing 3/4''$ – Electrodo E6011

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	ϵ_{su} ($\Delta L/L_p$)	F_{su} (Kg/cm ²)	F_{su}/F_y
P17 - #6BC	453.00	13.00	14,700.00	0.03	5,157.89	1.23
P18 - #6BC	459.00	10.00	12,525.00	0.02	4,394.74	1.05
P19 - #6BC	452.00	15.00	14,225.00	0.03	4,991.23	1.19
P20 - #6BC	452.00	16.50	13,350.00	0.04	4,684.21	1.12

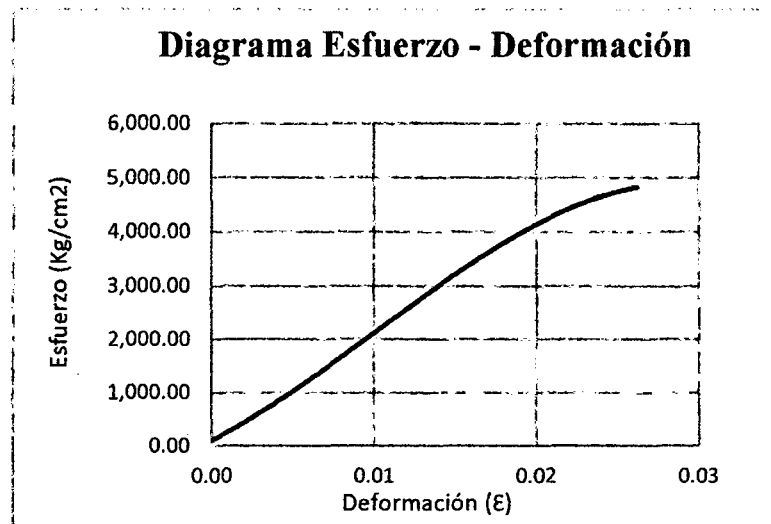


Figura 3.46: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas $\varnothing 3/4''$ con electrodo E6011.

Resultados con soldaduras realizadas con electrodo E7018

Los resultados obtenidos de los ensayos a tracción de las barras de $\varnothing 3/4''$, soldadas con el electrodo E7018 se muestra en la Tabla 3.19, en donde se puede apreciar que el valor de la relación F_{su}/F_y alcanzada por las probetas, no llegan al mínimo especificado (1.25).

Con respecto a las deformaciones unitarias alcanzadas por estas barras, soldadas con el electrodo E7018, presenta mayores valores con respecto a la barra de $\varnothing 3/4''$ soldadas con el electrodo E6011.

En la Figura 3.47 se muestra el diagrama esfuerzo – deformación del promedio de los valores obtenidos de barras ensayadas a tracción; en donde se puede apreciar que la deformación unitaria alcanza valores mayores al 0.04, y el esfuerzo máximo está llegando a un valor de 5,500 Kg/cm².

Tabla 3.19: Resultados de ensayo a la tracción de barras soldadas $\varnothing 3/4$ – Electrodo E7018

Código Probeta	Lp (mm)	ΔL (mm)	P (Kg)	ϵ_{su} ($\Delta L/Lp$)	Fsu (Kg/cm ²)	Fsu/ Fy
P21 - #6BS	453.00	23.00	15,700.00	0.05	5,508.77	1.31
P22 - #6BS	450.00	17.00	13,650.00	0.04	4,789.47	1.14
P23 - #6BS	455.00	19.00	14,500.00	0.04	5,087.72	1.21
P24 - #6BS	446.00	15.00	13,550.00	0.03	4,754.39	1.13

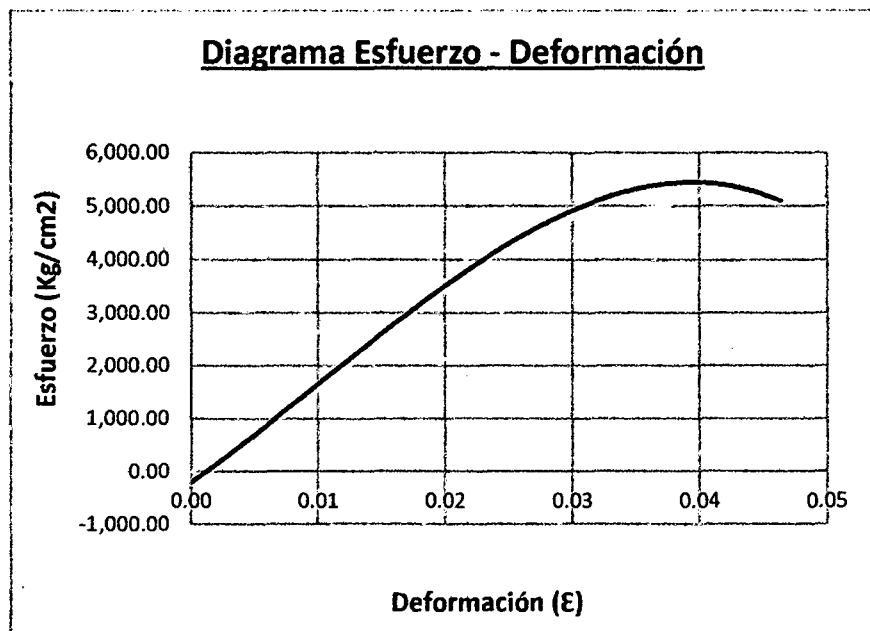


Figura 3.47: Diagrama esfuerzo – deformación promedio de barras soldadas $\varnothing 3/4''$ con electrodo E7018.

CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

4.1 INTERPRETACION DE RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES

4.1.1 Interpretación de resultados en barras ASTM A 615

4.1.1.1 Barras soldadas con electrodo E6011

Las soldaduras realizadas con el electrodo E6011, en su mayoría cuentan con mayores discontinuidades de consideración, es decir las indicaciones son relevantes; por lo que se tiene que tener mayor cuidado al momento del proceso de la soldadura y enfriamiento. Los tipos de discontinuidades que se presentaron en su mayoría son inclusiones de escoria, porosidad, salpicadura y penetración incompleta.

Las indicaciones relevantes se pueden ver en la Figura 3.21 (2) y 3.22 (2), donde se aprecia salpicadura tanto en el material de soldadura como en el material base y se puede ver claramente en dichas figuras.

En la Figura 3.23 se aprecia una indicación relevante, debido a que tiene porosidad uniformemente dispersa, esto causada por la aplicación de una técnica de soldadura incorrecta o por los materiales defectuosos.

4.1.1.2 Barras soldadas con electrodo E7018.

Las soldaduras realizadas con el electrodo E7018 aparentemente nos presentan indicaciones irrelevantes, es decir que las pequeñas discontinuidades que se muestran no son importantes, sin embargo al momento de presentar la sección de la soldadura, luego de realizar el ensayo a tracción, la soldadura se encontraba con bastante porosidad en su interior.

La Figura 3.24 (2) y 3.25 (2) son de esas soldaduras que cuentan con discontinuidades superficiales de poca consideración, pero que en su interior tienen porosidad agrupada.

En la Figura 3.26 (2), se aprecia discontinuidades en la soldadura de poca importancia.

4.1.2 Interpretación de resultados en barras ASTM A 706

4.1.1.1 Barras soldadas con electrodo E6011

De la misma manera ocurre para este tipo de barra, usando electrodos E6011, la mayor cantidad de discontinuidades son inclusiones de escoria, salpicadura y grietas por solidificación, esto es causado por el rápido enfriamiento de la soldadura, por lo que se debe tomar en cuenta la forma de reducir este enfriamiento brusco de la soldadura. En la Figura 3.27 (2). Se puede apreciar una porosidad dispersa que puede ser causada por materiales defectuosos o por una mala aplicación de la técnica de soldeo. En la Figura 3.28 (2) y 3.29 (2) se aprecia porosidades acompañadas de grietas por solidificación, fisuras en el material de soldadura e inclusiones de escoria.

4.1.1.2 Barras soldadas con electrodo E7018

Las soldaduras realizadas con el electrodo E7018 aparentemente nos presentan indicaciones poco relevantes, es decir que las pequeñas discontinuidades que se muestran no son importantes, sin embargo luego de realizar el ensayo a tracción y hubo rotura, la sección de dicha soldadura se encontraba con bastante porosidad en su interior.

La Figura 3.30 (2) muestra una porosidad vermicular o tipo gusano, este tipo de porosidad se extiende desde la raíz hasta la superficie de la soldadura, esta indicación es relevante por lo que se tiene que realizar la soldadura en mejores condiciones y con buenos materiales.

En las Figuras 3.31 (2) y 3.32 (2) aparentemente se muestran discontinuidades de poca consideración, pero que al momento de analizar su sección luego de haber sido ensaya a tracción, muestran porosidades en su interior.

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS A TRACCIÓN

Las capacidades resistentes y de deformación requeridas en barras de refuerzo soldadas deben estar de acuerdo con el Reglamento ANSI/AWS D1.4-05, el cual especifica que la resistencia mínima a tensión de las barras soldadas debe ser mayor que 1.25 veces el esfuerzo de fluencia mínimo especificado ($4,200 \text{ Kg/cm}^2$).

Cabe mencionar que en nuestro país, no existe una normativa que regule la soldadura de barras de refuerzo, por lo que en esta tesis se toma como referencia el reglamento ANSI/AWS D1.4-05, sin embargo esta norma no estipula los límites de deformación permitidos.

Se realiza un diagrama esfuerzo - deformación comparando las propiedades mecánicas de los dos tipos de barras utilizados como se muestra en la Figura 4.1. Estas barras han sido ensayadas sin soldadura, por lo que resulta ser una referencia para los ensayo a tracción de las barras soldadas.

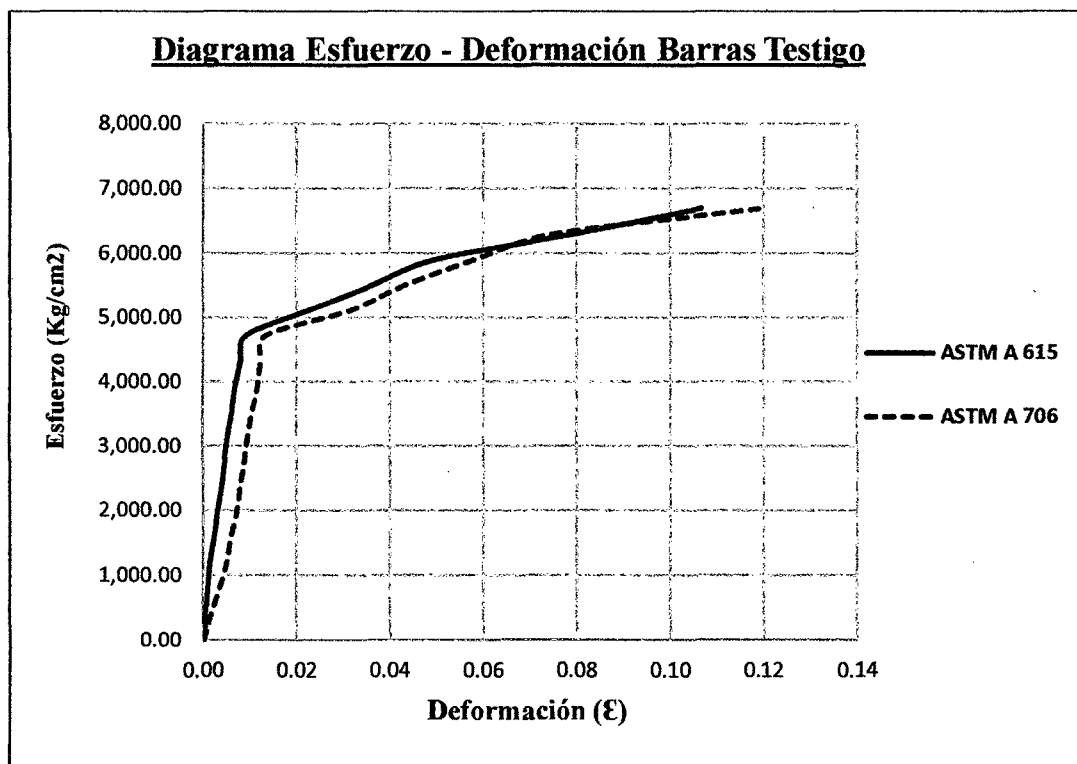


Figura 4.1: Diagrama esfuerzo – deformación de barras testigo sin soldadura Ø 1/2", de barras ASTM A 615 y ASTM A 706

Comparación De Las Propiedades Mecánicas De Barras Sin Soldadura Con Barras Soldadas

La comparación de los esfuerzos y deformaciones máximas alcanzadas por las barras soldadas y no soldadas luego de ser ensayadas a tracción, se grafican mediante los diagramas esfuerzo – deformación presentados en las Figuras 4.2 y 4.3. En dichos diagramas se puede ver que las curvas esfuerzo – deformación de las barras soldadas y no soldadas, están diferenciadas por su tipo de línea y a su vez abreviadas por letras iniciales de cada palabra que a continuación se detallan:

B.S.S : Barras sin soldadura

B.C.S – E70: Barras soldadas con electrodo E7018

B.C.S – E60: Barras soldadas con electrodo E6011

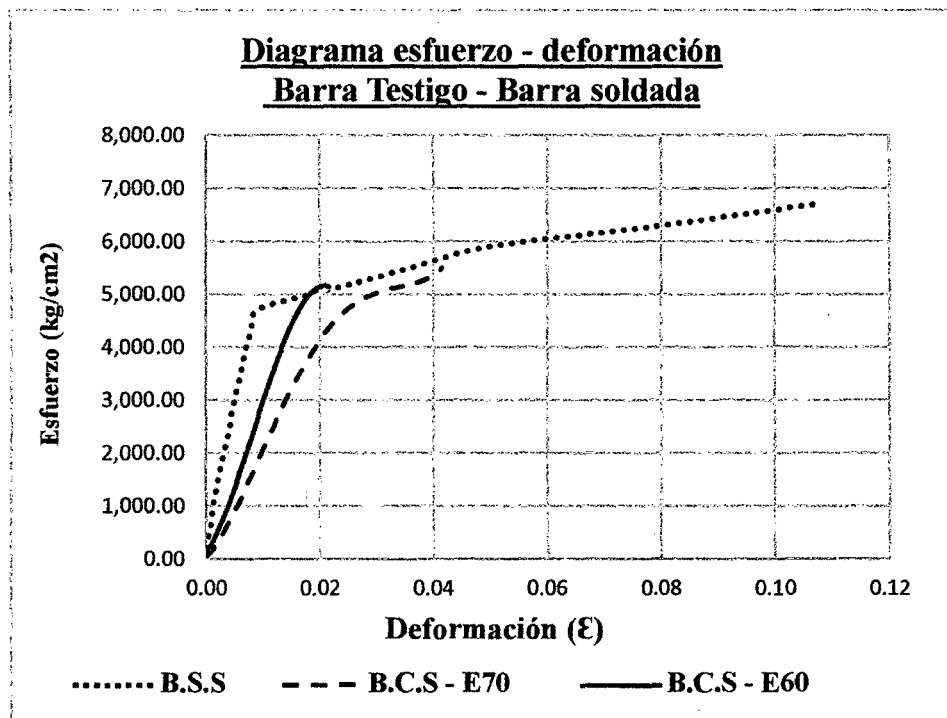


Figura 4.2: Diagrama esfuerzo – deformación de la comparación de barras de Ø 1/2”, de la normativa ASTM A 615 con soldadura y sin soldadura.

En la Figura 4.2 se muestra la baja capacidad de deformación y ductilidad de las soldaduras, las cuales llegan a alcanzar a 0.02 en soldaduras hechas con electrodo E6011 y 0.04 en soldaduras hechas con el electrodo E7018; sin embargo se puede notar que las soldaduras que se realizaron con el electrodo E7018 tienen mayor capacidad de deformación y ductilidad que las soldaduras hechas con el electrodo E6011.

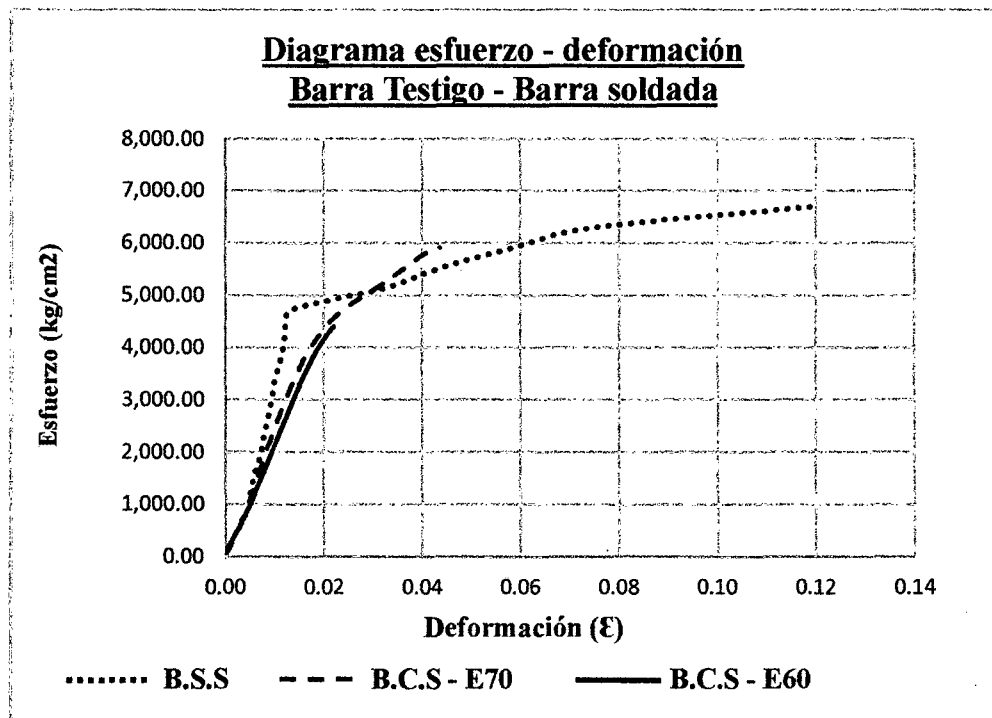


Figura 4.3: Diagrama esfuerzo – deformación de la comparación de barras de Ø 1/2”, de la normativa ASTM A 706 con soldadura y sin soldadura.

En la Figura 4.3 se puede apreciar la baja capacidad de deformación y ductilidad de las soldaduras, las cuales llegan a alcanzar a 0.02 en soldaduras hechas con electrodo E6011 y un poco más de 0.04 en soldaduras hechas con el electrodo E7018; sin embargo se puede notar que las soldaduras que se realizaron con el electrodo E7018 tienen mayor capacidad de deformación y ductilidad que las soldaduras hechas con el electrodo E6011.

Es importante aclarar que los diagramas de comparación de las Figuras 4.2 y 4.3 son resultados de barras soldadas y no soldadas de Ø 1/2” ensayadas a tracción de las normas ASTM A 615 y ASTM A 706. En general, evaluando y comparando estos dos diagramas podemos ver que las soldaduras de las barras ASTM A 706 realizadas tanto con electrodos E6011 y E7018, muestran mayores valores alcanzados de deformación y esfuerzo con respecto a los alcanzados por las barras ASTM A 615.

4.2.1 Efectos del uso de electrodo para la barra corrugada ASTM A 615

Es importante aclarar que el uso de electrodo para el tipo de acero indicado es importante, porque esto determinará una mejor calidad en la soldadura. Existen en la actualidad electrodos para cada tipo de acero, sin embargo en nuestro medio hay el desconocimiento sobre este tema.

En la Figura 4.4 se muestra un histograma de deformación unitaria vs tipo de electrodo, con la finalidad de comparar las deformaciones unitarias alcanzadas en soldaduras ensayadas a tracción realizadas con los dos tipos de electrodos utilizados en esta tesis.

La deformación unitaria de la soldadura con el electrodo E6011 de la barra de $\varnothing 1/2''$ no alcanza ni a los 0.02; esto nos permite manifestar que las fracturas son frágiles ante cualquier sollicitación de movimiento sísmico o cargas, la barra de $\varnothing 5/8''$ alcanza una mayor deformación sobrepasando al 0.03, mientras que la barra de $\varnothing 3/4''$ esta entre el 0.02 y 0.03 de deformación. Estas deformaciones presentan una soldadura de ductilidad limitada para actuar ante cualquier sollicitación.

Las soldaduras realizadas con el electrodo E7018 (color azul) alcanzan mayor deformación unitaria, llegando hasta el 0.04 en los diámetros $\varnothing 1/2''$ y $\varnothing 3/4''$. Los resultados en este caso vienen a ser moderados, comparados con las deformaciones alcanzadas con electrodos E6011.

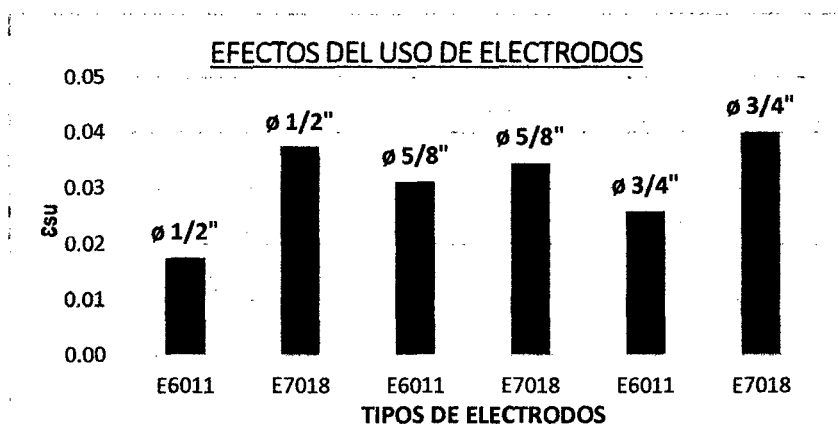


Figura 4.4: Comparación de las deformaciones unitarias máximas alcanzadas, en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso de electrodo.

Otra manera de verificar la calidad de la soldadura es haciendo el diagrama de la relación F_{su}/F_y vs el tipo de electrodo, esto permite comparar los esfuerzos alcanzados en los ensayos a tracción. En la figura 4.3 se puede apreciar que las soldaduras realizadas con el electrodo E6011, la relación F_{su}/F_y es menor a la relación mínima especificada (1.25). Las barras que menos resisten son de $\varnothing 1/2"$ y $\varnothing 3/4"$, mientras que la barra de $\varnothing 5/8"$ tiene mayor resistencia, sin embargo no alcanza al valor mínimo especificado por la norma anteriormente mencionada.

Las barras soldadas con el electrodo E7018 adquieren un valor mayor de deformación unitaria, sin embargo las barras de $\varnothing 1/2"$ y $\varnothing 3/4"$ no llegan a ese valor mínimo especificado de la relación F_{su}/F_y , la barra que llega a ser mayor a igual es la $\varnothing 5/8"$ como se muestra en la Figura 4.5.

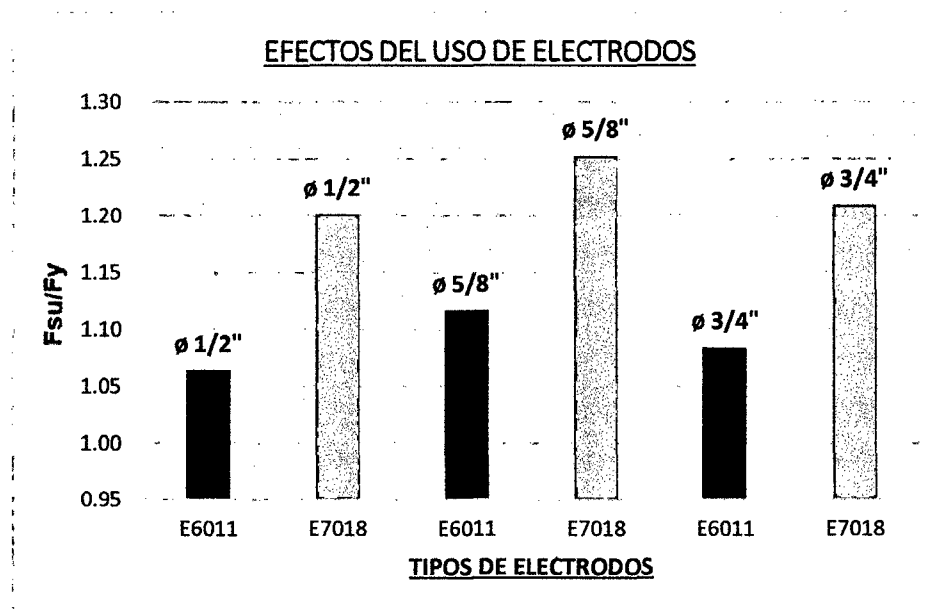


Figura 4.5: Comparación resultados máximos obtenidos de la relación F_{su}/F_y , en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso de electrodo.

4.2.2 Efectos del uso de electrodo para la barra corrugada ASTM A 706

De la misma manera que para las barras ASTM A615, las deformaciones unitarias alcanzadas en soldaduras con electrodo E6011 son demasiado bajas, aunque en la figura 4.4 se muestra un leve crecimiento de la deformación.

En cuanto a la soldadura realizada con el electrodo E7018 alcanzan mayor capacidad de deformación. Estas deformaciones en la barra de $\varnothing 1/2"$ y $\varnothing 3/4"$ alcanzan el 0.04, mientras que la barra de $\varnothing 5/8"$ sobrepasa los 0.05 de deformación unitaria.

Comparando las deformaciones unitarias alcanzadas en soldaduras realizadas con electrodo E7018 de la barra ASTM A706 son mayores a las deformaciones alcanzadas por las barras ASTM A615.

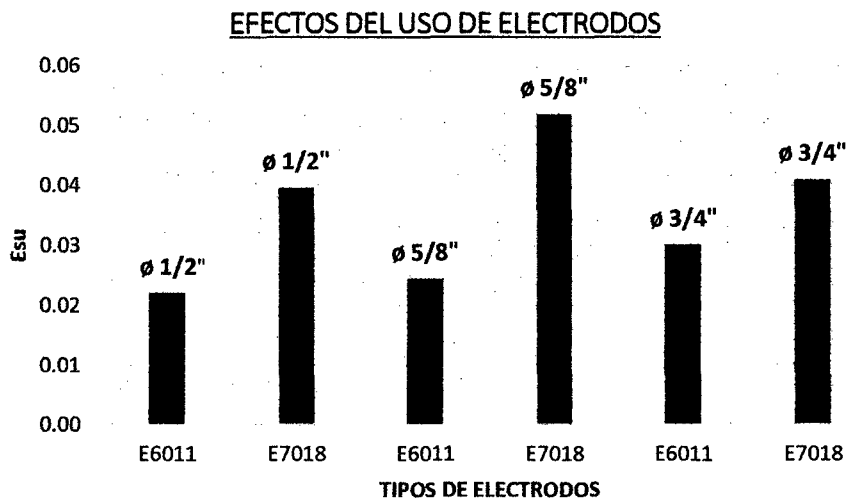


Figura 4.6: Comparación de las deformaciones unitarias máximas alcanzadas, en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso de electrodo.

La relación F_{su}/F_y en soldaduras en donde se utilizó el electrodo E7018 para barras de la norma ASTM A706, alcanzaron mayores valores que para las barras de la norma ASTM A615. Como se puede verificar en la Figura 4.7 que las barras de $\varnothing 1/2"$ y $\varnothing 5/8"$ tienen valores mayores al valor mínimo especificado 1.25 por la norma anteriormente mencionada.

Las barras soldadas con el electrodo E6011 no alcanzan el valor mínimo de la relación F_{su}/F_y , como se puede notar en la figura la barra que alcanza mayor valor de dicha relación es de $\varnothing 5/8"$

Téngase entendido que estos diagramas son de valores promedios, ya que en algunos casos de barras soldadas con electrodo E7018 ensayadas a tracción alcanzaron valores superiores al 1.35 en cuanto a la relación establecida.

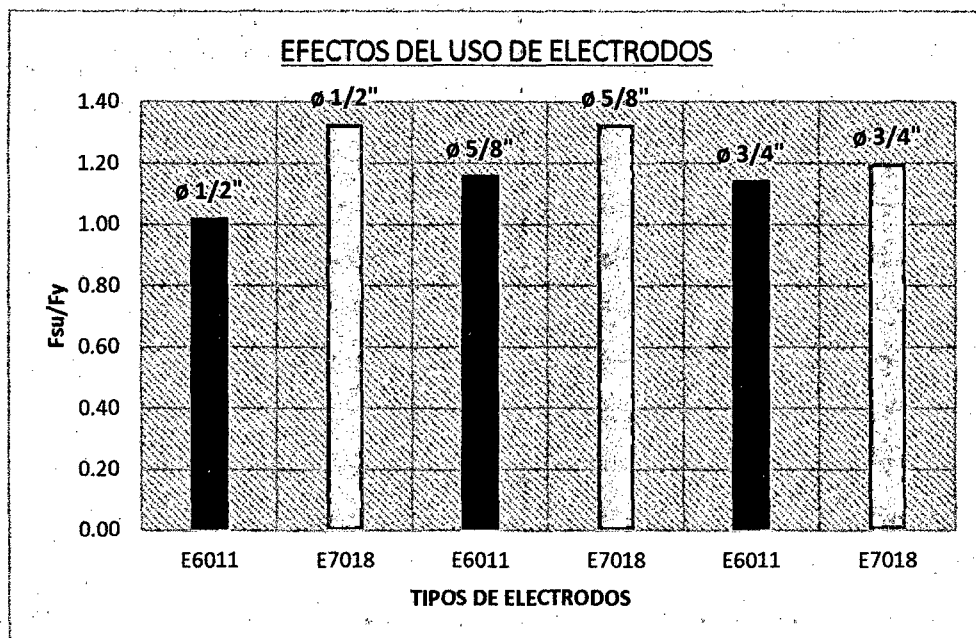


Figura 4.7: Comparación resultados máximos obtenidos de la relación F_{su}/F_y , en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso de electrodo.

4.2.3 Comparación de resultados obtenidos de los ensayos a tracción según el tipo de acero y electrodo utilizado.

4.2.3.1 Comparación en cuanto al alcance de una deformación unitaria máxima

Para barras de electrodos E6011

En la Figura 4.8 se muestra que las barras soldadas que alcanzaron mayores valores de deformación unitaria son barras de $\varnothing 5/8"$ de la norma ASTM A 615, seguida de las barras de $\varnothing 3/4"$ de la norma ASTM A 706, y las barras soldadas con menor valor son barras de $\varnothing 1/2"$ de la norma ASTM A 615. Evaluando este histograma de comparación podemos ver que las deformaciones máximas de barras ASTM A 706 tienden a mantenerse, mientras que las deformaciones de las barras ASTM A 615 tienden a variar en relación a sus diámetros.

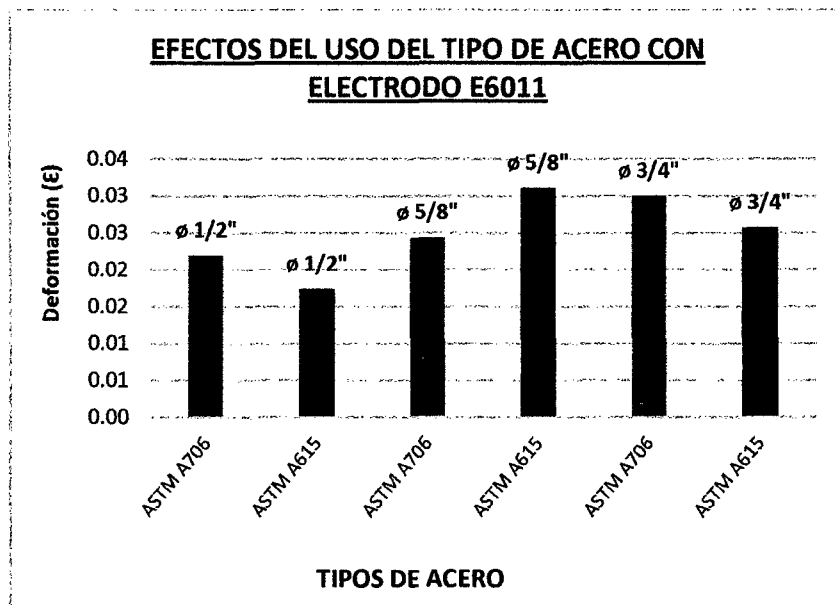


Figura 4.8: Comparación de las deformaciones unitarias máximas alcanzadas, en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso del tipo de acero con el electrodo E6011.

Para barras de electrodos E7018

De la Figura 4.9 se puede apreciar que las barras soldadas que alcanzaron mayores valores de deformación unitaria son barras de la norma ASTM A 706, presentando mayores valores las barras de $\varnothing 5/8"$ los cuales sobrepasan al 0.05 de deformación unitaria. Analizando este histograma de comparación, podemos ver que las deformaciones máximas alcanzadas por las barras de la norma ASTM A 615 vienen a ser inferiores a las deformaciones alcanzadas por las barras de la norma ASTM A 706.

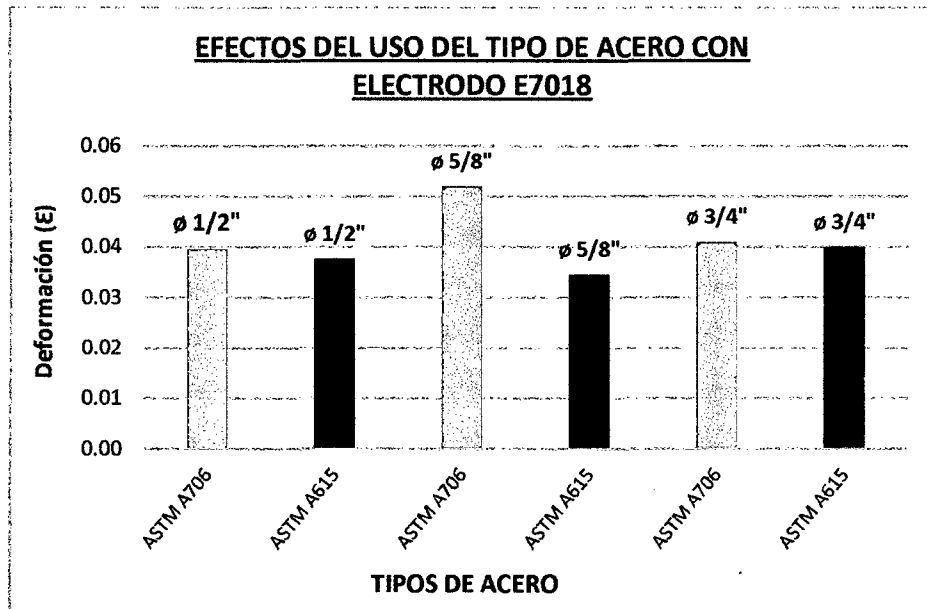


Figura 4.9: Comparación de las deformaciones unitarias máximas alcanzadas, en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso del tipo de acero con el electrodo E7018.

4.2.3.2 Comparación en cuanto al alcance de la Relación máxima F_{su} / F_y Para barras de electrodos E6011

Las barras de $\varnothing 5/8"$ de la norma ASTM A 706 alcanzaron mayores valores de la relación F_{su}/F_y como se muestra en la Figura 4.10; sin embargo ninguna de las barras soldadas de ambos tipos de acero, alcanzaron el valor mínimo especificado de dicha relación (1.25).

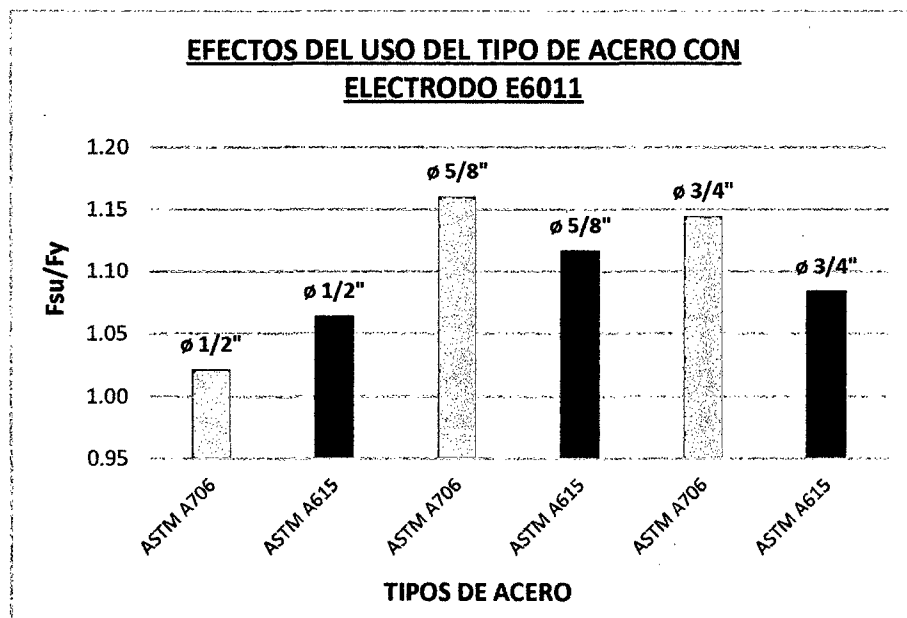


Figura 4.10: Comparación resultados máximos obtenidos de la relación F_{su}/F_y , en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso del tipo de acero con el electrodo E6011.

Para barras de electrodos E7018

De la Figura 4.11 se puede apreciar que las barras soldadas que alcanzaron mayores valores de la relación F_{su}/F_y son barras de la norma ASTM A 706, presentando mayores valores las barras de $\varnothing 1/2"$ y $\varnothing 5/8"$ los cuales sobrepasan al 1.30. Analizando este histograma de comparación, podemos ver que la relación F_{su}/F_y alcanzada por las barras de la norma ASTM A 615 viene a ser inferiores a las relaciones alcanzadas por las barras de la norma ASTM A 706.

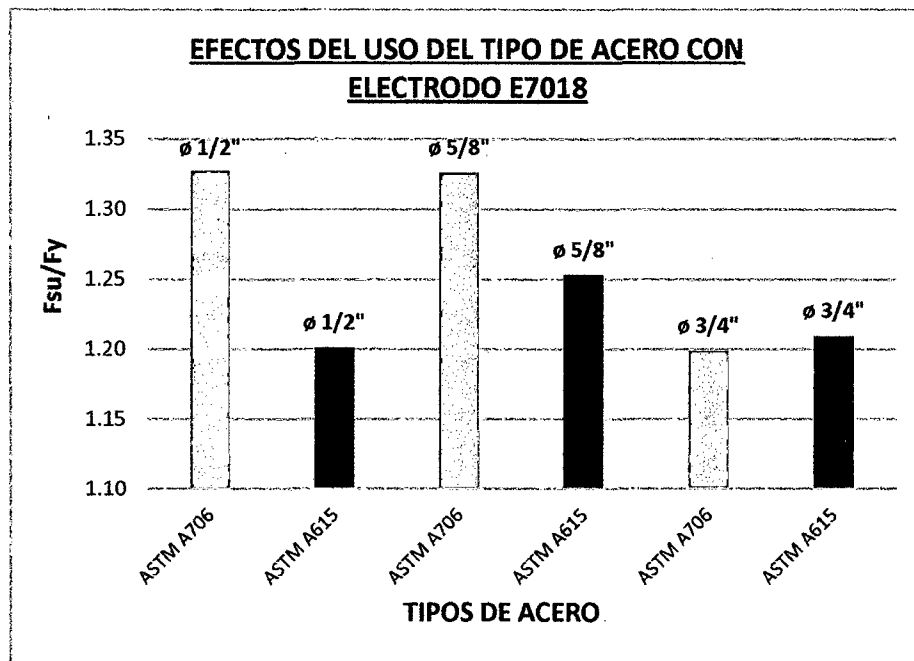


Figura 4.11: Comparación resultados máximos obtenidos de la relación F_{su}/F_y , en los ensayos a tracción de soldaduras según el uso del tipo de acero con el electrodo E7018.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos de la prueba de líquidos penetrantes en soldaduras en donde se utilizó electrodos E6011, presentan mayores discontinuidades superficiales, como grietas por solidificación, inclusión de escoria y salpicadura.
2. En las soldaduras en donde se utilizó electrodos E7018 se obtuvo mayor cantidad de poros interiores que en soldaduras realizadas con electrodos E6011.
3. La prueba por líquidos penetrantes en soldaduras de barras de la norma ASTM A 615 y ASTM A 706 realizadas tanto con electrodos E6011 y E7018, presentan similares indicaciones ya sea relevantes como irrelevantes. Por lo que concluimos que no existe grandes diferencias de discontinuidades presentadas en soldaduras de ambos tipos de acero.
4. La inspección por líquidos penetrantes en soldaduras de barras corrugadas no son tan confiables, ya que en algunas soldaduras la inspección por este método, presentó indicaciones irrelevantes en la superficie, sin embargo, al momento de verificar la sección de la soldadura luego de haber sido ensayada a tracción, presenta gran porosidad en su interior.
5. Las deformaciones máximas alcanzadas en soldaduras realizadas con el electrodo E7018, tuvo mejores resultados para ambos tipos de acero. Sin embargo el acero de la norma ASTM A 706, llega a deformaciones máximas del 0.05 a 0.06, el cual presenta mayores valores que el acero ASTM A 615 que alcanza valores máximos de deformación del 0.03 a 0.04.
6. Los valores obtenidos de la relación F_{su}/F_y en soldaduras en donde se utilizó electrodos E6011 para barra de la norma ASTM A 615 y ASTM A 706, alcanzaron valores por debajo del mínimo 1.25 recomendado por la norma ANSI/AWS D1.4-05.

7. Las barras de refuerzo de $\varnothing 5/8$ " soldadas con el electrodo E7018 de la norma ASTM A 615, alcanzaron mayores valores de la relación F_{su}/F_y , es decir que alcanzaron el valor mínimo de 1.25 recomendado por la norma AWS. Sin embargo las barras de $\varnothing 1/2$ " y $\varnothing 3/4$ " no llegaron al valor mínimo recomendado.
8. Los valores obtenidos de la relación F_{su}/F_y en soldaduras en donde se utilizó el electrodo E7018 en barras de la norma ASTM A 706 llegaron a valores mayores al mínimo especificado por la norma AWS. Las barras de $\varnothing 1/2$ " y $\varnothing 5/8$ " llegaron a valores por encima del 1.32.
9. El valor promedio de las deformaciones alcanzadas por barras de la norma ASTM A 615 soldadas con electrodos E6011 es el 97% del valor promedio de las deformaciones alcanzadas por barras ASTM A 706 soldadas con el mismo electrodo.
10. El valor promedio de las deformaciones alcanzadas por barras de la norma ASTM A 615 soldadas con electrodos E7018 es el 86% del valor promedio de las deformaciones alcanzadas por barras ASTM A 706 soldadas con el mismo electrodo.
11. Según los resultados de esta investigación, el valor promedio de la relación F_{su}/F_y alcanzadas por barras de la norma ASTM A 615 soldadas con electrodos E6011 es el 98% del valor promedio de dicha relación, alcanzadas por barras ASTM A 706 soldadas con el mismo electrodo.
12. El valor promedio de la relación F_{su}/F_y alcanzadas por barras de la norma ASTM A 615 soldadas con electrodos E7018 es el 95% del valor promedio de dicha relación, alcanzadas por barras ASTM A 706 soldadas con el mismo electrodo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda moderar el amperaje para tipo de electrodo para prevenir las excesivas salpicaduras en el material base y de aporte.
2. Realizar una limpieza de la junta, antes del proceso de la soldadura y durante la soldadura (entre pasadas), para prevenir posibles discontinuidades como gases atrapados e inclusiones de escoria.
3. Emplear una técnica de soldeo oscilante, que nos permita realizar la unión en el menor número de pasadas, para garantizar un gran aporte de calor.
4. Después de terminar la soldadura de la unión a tope directo, cubrir la junta inmediatamente, con un material aislante, para reducir la velocidad de enfriamiento y prevenir la formación de estructuras duras como la martensita o porosidades.
5. Se recomienda realizar más pruebas de inspección de soldaduras (END) en este tipo de barras, de tal manera que se pueda tener resultados más precisos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials, ASTM A 615 – 09b. Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement, 2009.

American Society for Testing and Materials, ASTM A 706 – 09b.

American Welding Society, ANSI/AWS D1.4 – 2005, STRUCTURAL WELDING CODE-REINFORCED STEEL, 2005.

Norma Técnica Peruana, NTP 341.031 Grado 60. Hormigón (Concreto) Barras de acero al Carbono con resaltes y lisas para hormigón armado. Especificaciones, 2008.

Norma Técnica Peruana, NTP 339.186 Grado 60. Hormigón (Concreto) Barras con resaltes y lisas de acero de baja aleación para hormigón armado. Especificaciones, 2008.

Rodríguez, M; Rodríguez, J. 2006. Se debe evitar la Soldadura de Barras de Refuerzo en Estructuras de Concreto Reforzado en Zonas Sísmicas de México. Revista de Ingeniería Sísmica N° 75 69-94. UNAM. Disponible en:

Sotero, A. 2004. Soldabilidad de Barras Corrugadas de Acero Para Construcción ASTM A 706 de 3/4”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Av. Universitaria 1801 Lima 32, Perú.

Hurtado, R. 2011. Estudio De La Soldabilidad De Barras Corrugadas De Acero Para Concreto Reforzado Belgo 60. Tesis Ing. Mecánica, PE, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Alvarado, D. 2009. “Procedimientos de Inspección Visual y por Líquidos Penetrantes de Barras de Refuerzo Soldadas”. Tesis Ing. Mecánico, ME, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (U.M.S.N.H.).

Casasola, I. 2008, “Líquidos Penetrantes, Un Método No Destructivo”, Tesis Ingeniero Mecánico, ME, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán. Instituto Politécnico Nacional.

Quezada, A. 2010, Efectos De La Soldadura En Empalmes De Acero De Refuerzo, Para Hormigón Armado. Memoria Ingeniero Civil, CH, Facultad De Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil. Universidad De Chile

American Society for Testing and Materials, ASTM A 370 – 09. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, 2009.

Ruiz, J. s.f. Guía para la Inspección Visual de Soldaduras AWS B1.1, Grupo de Ensayos No Destructivos GEND – PUCP.

American Society for Testing and Materials, ASTM E 165. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, 2001.

American Welding Society (AWS, 1998). “Structural Welding Code-Reinforcing Steel” NSI/AWS D1.4-98.

SOLDEXA S.A. Oerlikon, Manual de Soldadura y Catálogos de Productos. 7 ed. Lima, PE.

ANEXOS

**IMAGENES DE ESTRUCTURAS REALIZADAS
CON BARRAS DE REFUERZO**



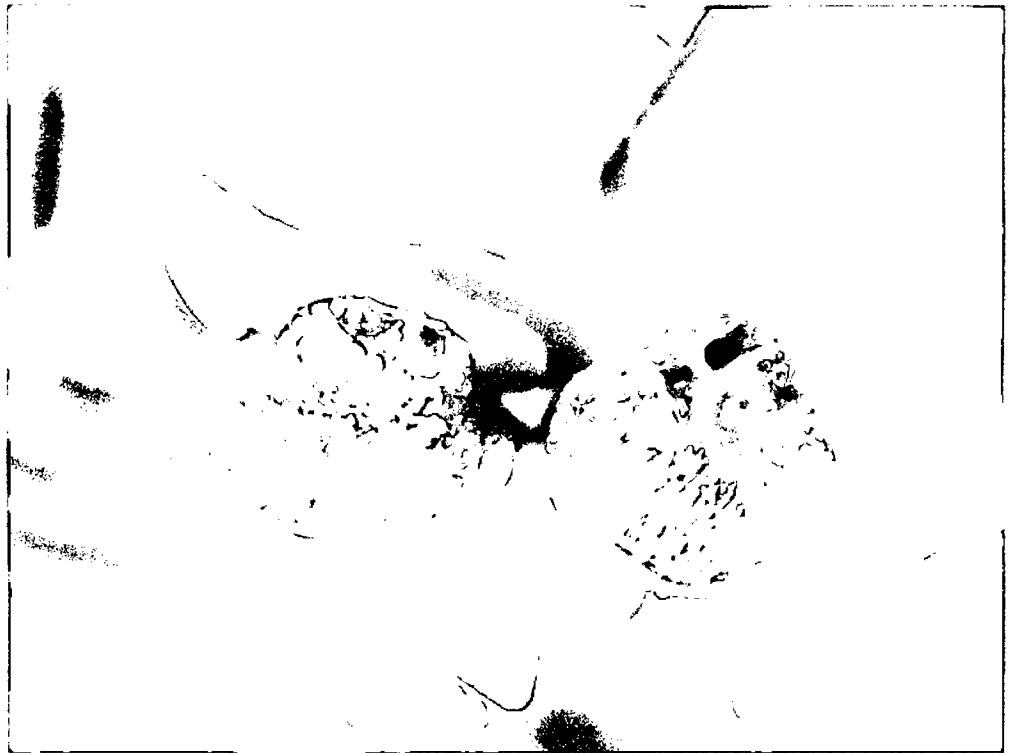
1. Realizacion de la soldadura de la barra corrugada.



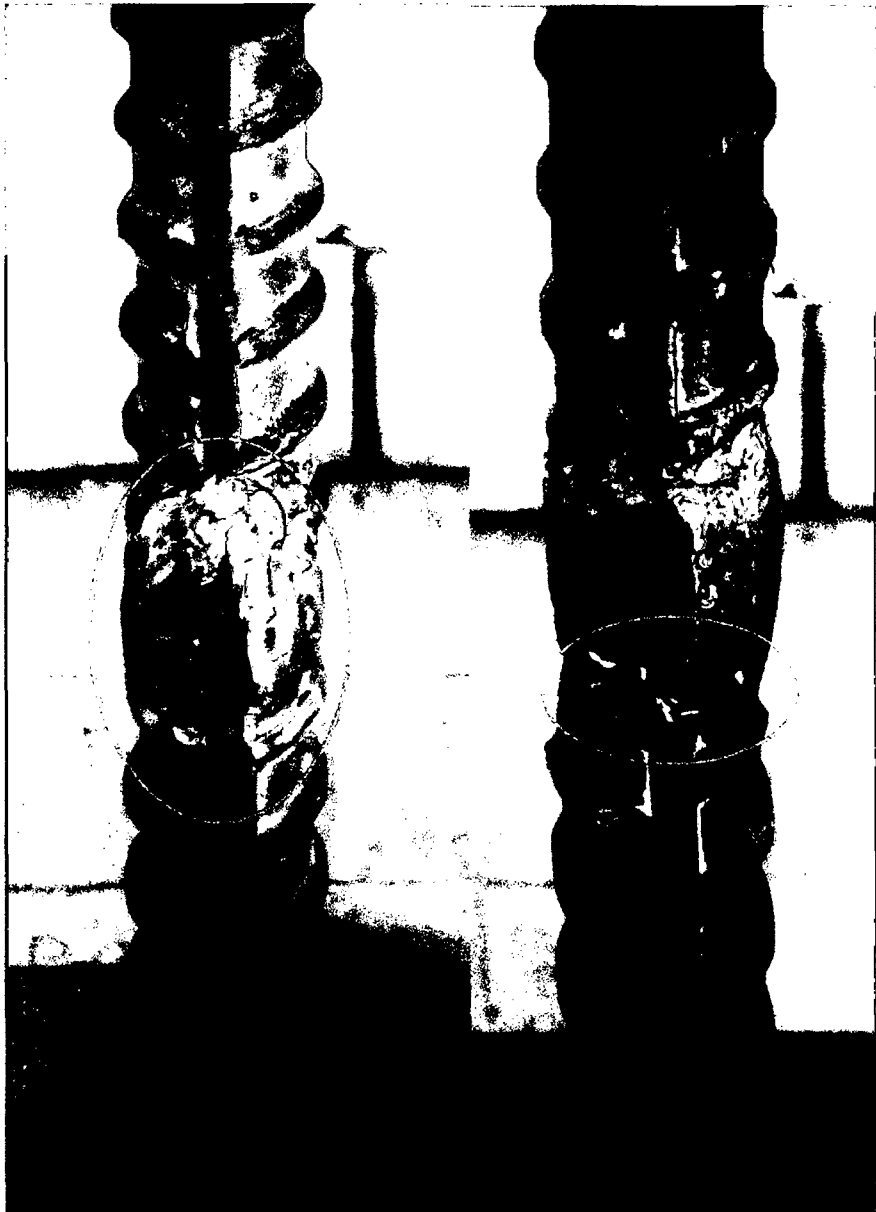
2. Imagen de barra soldada



3. Inspección de la soldadura durante el proceso de soldeo.



4. Inspección de algunas soldaduras después del ensayo a tracción.



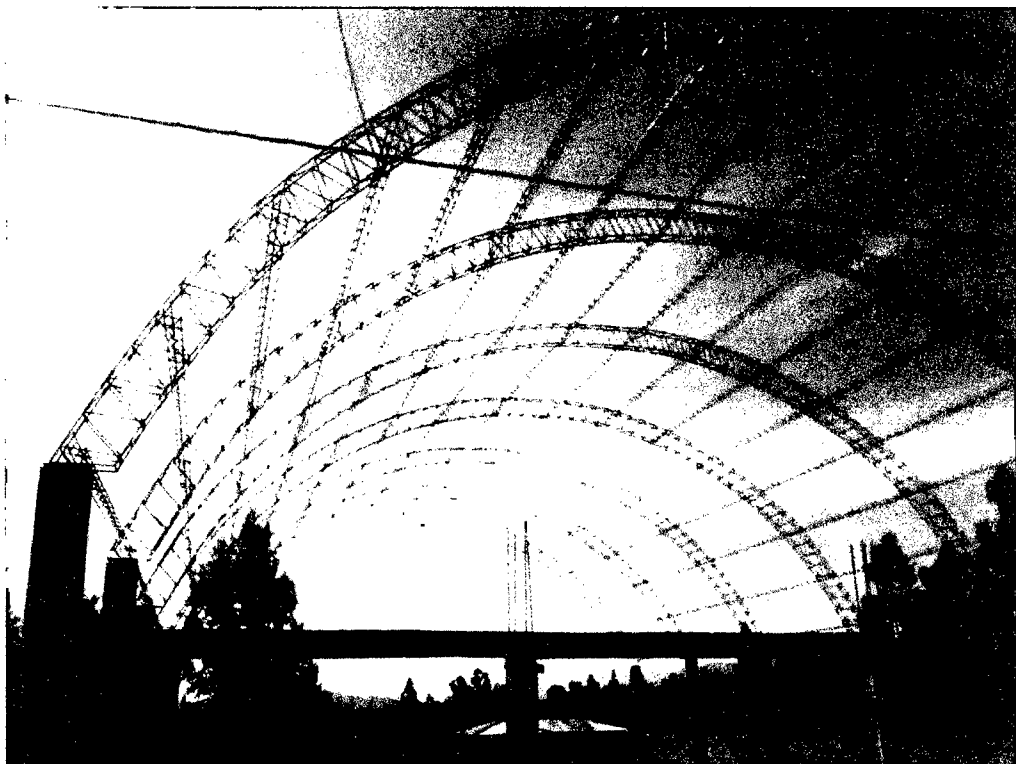
5. Rotura de la soldadura, en el proceso del ensayo a traccion.



6. Barra soldada con amperaje alto, lo provocó salpicadura en el material de aporte y material base.



7. Techo abovedado 1, realizado con barras corrugadas.



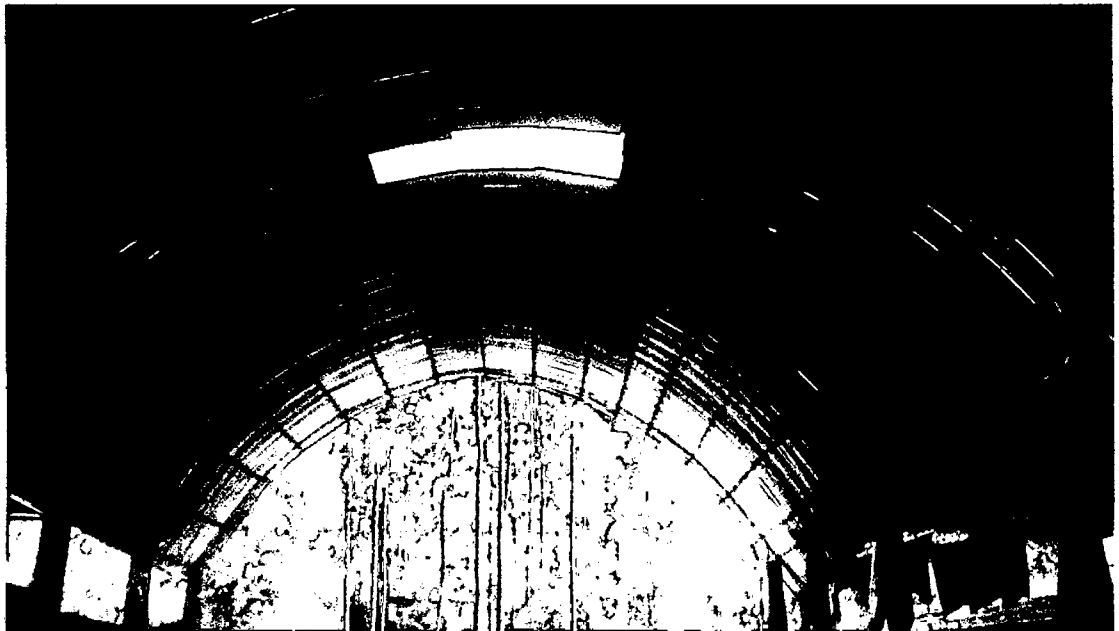
8. Techo abovedado 1, realizada con barras corrugadas geoméricamente estable.



9. Proceso de techado con calamina, en cobertura (armaduras) realizada con barras corrugadas.



10. Techo abovedado 2, de campo deportivo en buenas condiciones.

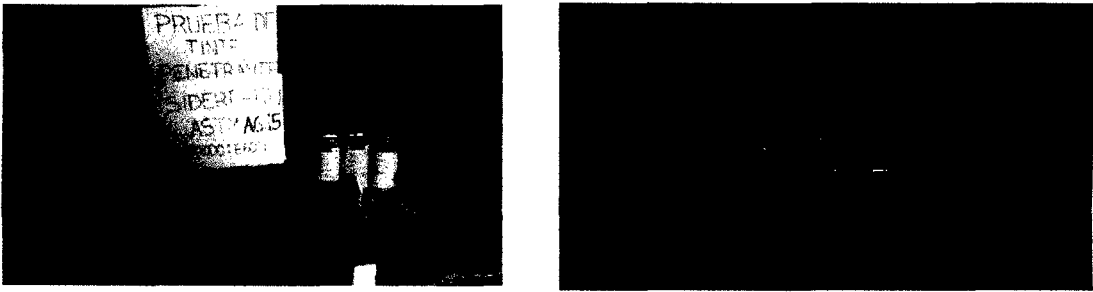


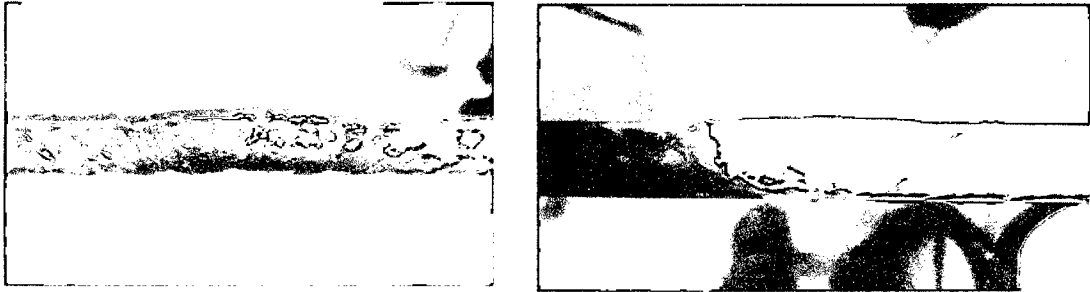
11. Techo abovedado 3 inestable, con errores geométricos y tijerales incompletos.

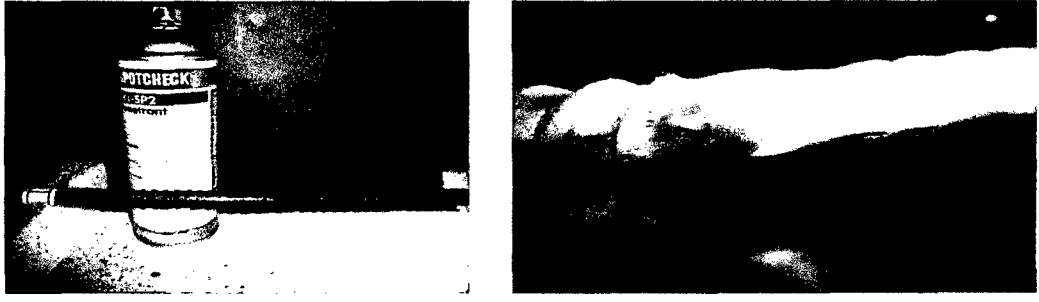


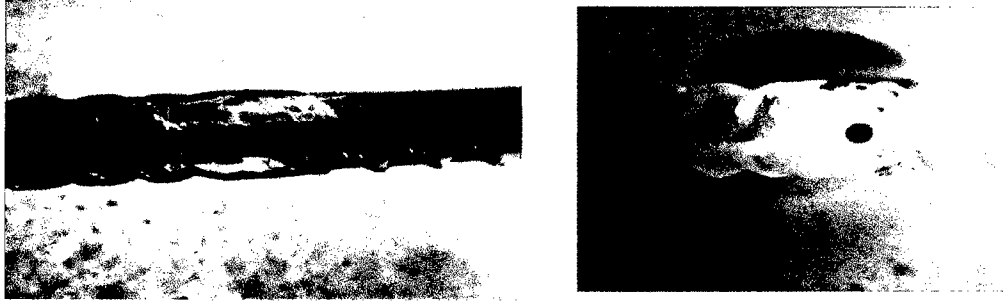
12. Techo abovedado 3, con errores en su geometría..

**FORMATOS DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS
PENETRANTES**

		PROBETA DE ENSAYO		Revisión:		
		PRUEBA DE TINTA PENETRANTE		Fecha: 25/10/14		
				Página:		
TITULO DE TESIS:	SOLDABILIDAD DEL ACERO CORRUGADO ASTM A615-GRADO 60 EN RELACION AL ACERO CORRUGADO ASTM A706 GRADO 60			Nº CORRELATIVO: 3		
CODIGO DE PROBETA:	P43 - #6SpC			FECHA: 25/10/14		
ESTRUCTURA:	PROBETA DE ENSAYO					
DATOS DE PIEZA						
DESCRIPCION DE LA PIEZA	Probeta da barra de refuerzo, con tipo de soldadura de junta a tope directo con borde en "V"					
DIMENSIONES	Barra de refuerzo # 6 (Ø3/4"), de 45 cm de longitud aprox.		CODIGO DE PARTE			
TIPO DE MATERIAL	ACERO CORRUGADO SIDERPERU ASTM A 615					
TIPO DE ELECTRODO	E6011					
ZONA INSPECCIONADA	Soldadura de la unión o junta a tope directo con borde en "V"					
INFORMACION SOBRE LA INSPECCION						
PROCEDIMIENTO	INSPECCION POR TINTA PENETRANTE	REVISION	2014	NORMA ASTM E-165		
METODO DE INSPECCION						
DISTANCIA MAX. AL SITIO	5 - 10 cm.	ANGULO APROX. DE LA SUPERFICIE	0° - 5°			
PARAMETROS DE INSPECCION						
	TIEMPO (min.)	LIMPIEZA	SECADO	PENETRACION	SECADO	REVELADO
		10	20	10	20	10
EQUIPO UTILIZADO						
MAGNIFICADOR	<input checked="" type="checkbox"/>	PODER DE MAGNIFICACION	LUPA 10X			
FUENTE DE ILUMINACION	<input checked="" type="checkbox"/>	TIPO	LUZ SOLAR			
HERRAMIENTAS DE MEDICION						
LINEAL	<input checked="" type="checkbox"/>	TIPO	Wincha metálica de 5m			
CALIBRADORES	<input type="checkbox"/>	TIPO				
EQUIPO FOTOGRAFICO	<input checked="" type="checkbox"/>	MARCA	LUMIX 10X - Panasonic DMC-SZ3			
MATERIALES						
PENETRANTE	PENETRANT (SKL-SP2)		MARCA	SPOTCHECK (MAGNAFLUX)		
REMOVEDOR	NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)		MARCA	SPOTCHECK (MAGNAFLUX)		
REVELADOR	DEVELADOR (SKD-S2)		MARCA	SPOTCHECK (MAGNAFLUX)		
SOLVENTE	THINNER		MARCA			
OTROS						
PANEL FOTOGRAFICO						
						
OBSERVACIONES						
<hr/> <hr/>						
ACEPTADO <input type="checkbox"/>		RECHAZADO <input type="checkbox"/>		CRITERIO DE ACEPTACION CON CORRECTIVOS SOLO EN CAMPO		
ELABORADO POR:		REVISADO POR:		APROBADO POR:		
Firma:		Firma:		Firma:		
Cargo:		Cargo:		Cargo:		
Nombre:		Nombre:		Nombre:		
Fecha:		Fecha:		Fecha:		

PROBETA DE ENSAYO		Revisión:												
PRUEBA DE TINTA PENETRANTE		Fecha: 17/10/14												
		Página:												
TITULO DE TESIS:	SOLDABILIDAD DEL ACERO CORRUGADO ASTM A615-GRADO 60 EN RELACION AL ACERO CORRUGADO ASTM A706 GRADO60	N° CORRELATIVO: 4												
CODIGO DE PROBETA:	P29 - #45pS	FECHA: 17/10/14												
ESTRUCTURA:	PROBETA DE ENSAYO													
DATOS DE PIEZA														
DESCRIPCION DE LA PIEZA	Probeta de barra de refuerzo, con tipo de soldadura de junta a tope directo con borde en "V"													
DIMENSIONES	Barra de refuerzo # 4 (Ø1/2"), de 45 cm de longitud aprox.	CODIGO DE PARTE												
TIPO DE MATERIAL	ACERO CORRUGADO SIDERPERU ASTM A 615													
TIPO DE ELECTRODO	E7018													
ZONA INSPECCIONADA	Soldadura de la unión o junta a tope directo con borde en "V"													
INFORMACION SOBRE LA INSPECCION														
PROCEDIMIENTO	INSPECCION POR TINTA PENETRANTE	REVISION 2014 NORMA ASTM E-165												
METODO DE INSPECCION														
DISTANCIA MAX. AL SITIO	5 - 10 cm.	ANGULO APROX. DE LA SUPERFICIE 0° - 5°												
PARAMETROS DE INSPECCION														
	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">TIEMPO</th> <th style="width: 15%;">LIMPIEZA</th> <th style="width: 15%;">SECADO</th> <th style="width: 15%;">PENETRACION</th> <th style="width: 15%;">SECADO</th> <th style="width: 15%;">REVELADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">(min.)</td> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">10</td> </tr> </tbody> </table>	TIEMPO	LIMPIEZA	SECADO	PENETRACION	SECADO	REVELADO	(min.)	10	20	10	20	10	
TIEMPO	LIMPIEZA	SECADO	PENETRACION	SECADO	REVELADO									
(min.)	10	20	10	20	10									
EQUIPO UTILIZADO														
MAGNIFICADOR	<input checked="" type="checkbox"/>	PODER DE MAGNIFICACION LUPA 10X												
FUENTE DE ILUMINACION	<input checked="" type="checkbox"/>	TIPO LUZ SOLAR												
HERRAMIENTAS DE MEDICION														
LINEAL	<input checked="" type="checkbox"/>	TIPO Wincha metálica de 5m												
CALIBRADORES	<input type="checkbox"/>	TIPO												
EQUIPO FOTOGRAFICO	<input checked="" type="checkbox"/>	MARCA LUMIX 10X - Panasonic DMC-SZ3												
MATERIALES														
PENETRANTE	PENETRANT (SKL-SP2)	MARCA SPOTCHECK (MAGNAFLUX)												
REMOVEDOR	NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)	MARCA SPOTCHECK (MAGNAFLUX)												
REVELADOR	DEVELADOR (SKD-S2)	MARCA SPOTCHECK (MAGNAFLUX)												
SOLVENTE	THINNER	MARCA												
OTROS														
PANEL FOTOGRAFICO														
														
OBSERVACIONES														
ACEPTADO <input type="checkbox"/>	RECHAZADO <input type="checkbox"/>	CRITERIO DE ACEPTACION CON CORRECTIVOS SOLO EN CAMPO												
ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:												
Firma:	Firma:	Firma:												
Cargo:	Cargo:	Cargo:												
Nombre:	Nombre:	Nombre:												
Fecha:	Fecha:	Fecha:												

PROBETA DE ENSAYO		Revisión:
PRUEBA DE TINTA PENETRANTE		Fecha: 23/10/14
		Página:
TITULO DE TESIS:	SOLDABILIDAD DEL ACERO CORRUGADO ASTM A515-GRADO 60 EN RELACION AL ACERO CORRUGADO ASTM A706 GRADO60	N° CORRELATIVO: 8
CODIGO DE PROBETA:	P11 - #5BC	FECHA: 23/10/14
ESTRUCTURA:	PROBETA DE ENSAYO	
DATOS DE PIEZA		
DESCRIPCION DE LA PIEZA	Probeta de barra de refuerzo, con tipo de soldadura de junta a tope directo con borde en "V"	
DIMENSIONES	Barra de refuerzo # 5 (Ø5/8"), de 45 cm de longitud aprox.	CODIGO DE PARTE
TIPO DE MATERIAL	ACERO CORRUGADO BELGO 60 ASTM A 706	
TIPO DE ELECTRODO	E6011	
ZONA INSPECCIONADA	Soldadura de la unión o junta a tope directo con borde en "V"	
INFORMACION SOBRE LA INSPECCION		
PROCEDIMIENTO	INSPECCION POR TINTA PENETRANTE	REVISION 2014 NORMA ASTM E-165
METODO DE INSPECCION		
DISTANCIA MAX. AL SITIO	5 - 10 cm.	ANGULO APROX. DE LA SUPERFICIE 0° - 5°
PARAMETROS DE INSPECCION		
TIEMPO (min.)	LIMPIEZA 10	SECADO 20
	SECADO 10	REVELADO 20
		REVELADO 10
EQUIPO UTILIZADO		
MAGNIFICADOR	<input checked="" type="checkbox"/>	PODER DE MAGNIFICACION LUPA 10X
FUENTE DE ILUMINACION	<input checked="" type="checkbox"/>	TIPO LUZ SOLAR
HERRAMIENTAS DE MEDICION		
LINEAL	<input checked="" type="checkbox"/>	TIPO Wincha metálica de 5m
CALIBRADORES	<input type="checkbox"/>	TIPO
EQUIPO FOTOGRAFICO	<input checked="" type="checkbox"/>	MARCA LUMIX 10X - Panasonic DMC-SZ3
MATERIALES		
PENETRANTE	PENETRANT (SKL-SP2)	MARCA SPOTCHECK (MAGNAFLUX)
REMOVEDOR	NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)	MARCA SPOTCHECK (MAGNAFLUX)
REVELADOR	DEVELADOR (SKD-S2)	MARCA SPOTCHECK (MAGNAFLUX)
SOLVENTE	THINNER	MARCA
OTROS		
PANEL FOTOGRAFICO		
		
OBSERVACIONES		
ACEPTADO <input type="checkbox"/>	RECHAZADO <input type="checkbox"/>	CRITERIO DE ACEPTACION CON CORRECTIVOS SOLO EN CAMPO
ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:	Firma:	Firma:
Cargo:	Cargo:	Cargo:
Nombre:	Nombre:	Nombre:
Fecha:	Fecha:	Fecha:

PROBETA DE ENSAYO		Revisión:
PRUEBA DE TINTA PENETRANTE		Fecha: 23/10/14
		Página:
TITULO DE TESIS:	SOLDABILIDAD DEL ACERO CORRUGADO ASTM A615-GRADO 60 EN RELACION AL ACERO CORRUGADO ASTM A706 GRADO60	N° CORRELATIVO: 10
CODIGO DE PROBETA:	P07 - #4BS	FECHA: 23/10/14
ESTRUCTURA:	PROBETA DE ENSAYO	
DATOS DE PIEZA		
DESCRIPCION DE LA PIEZA	Probeta de barra de refuerzo, con tipo de soldadura de junta a tope directo con borde en "V"	
DIMENSIONES	Barra de refuerzo # 4 (Ø1/2"), de 45 cm de longitud aprox.	CODIGO DE PARTE
TIPO DE MATERIAL	ACERO CORRUGADO BELGO 60 ASTM A 706	
TIPO DE ELECTRODO	E7018	
ZONA INSPECCIONADA	Soldadura de la unión o junta a tope directo con borde en "V"	
INFORMACION SOBRE LA INSPECCION		
PROCEDIMIENTO	INSPECCION POR TINTA PENETRANTE	REVISION 2014 NORMA ASTM E-165
METODO DE INSPECCION		
DISTANCIA MAX. AL SITIO	5 - 10 cm.	ANGULO APROX. DE LA SUPERFICIE 0° - 5°
PARAMETROS DE INSPECCION		
TIEMPO (min.)	LIMPIEZA 10	SECADO 20
		PENETRACION 10
		SECADO 20
		REVELADO 10
EQUIPO UTILIZADO		
MAGNIFICADOR	<input checked="" type="checkbox"/>	PODER DE MAGNIFICACION LUPA 10X
FUENTE DE ILUMINACION	<input checked="" type="checkbox"/>	TIPO LUZ SOLAR
HERRAMIENTAS DE MEDICION		
LINEAL	<input checked="" type="checkbox"/>	TIPO Wincha metálica de 5m
CALIBRADORES	<input type="checkbox"/>	TIPO
EQUIPO FOTOGRAFICO	<input checked="" type="checkbox"/>	MARCA LUMIX 10X - Panasonic DMC-SZ3
MATERIALES		
PENETRANTE	PENETRANT (SKL-SP2)	MARCA SPOTCHECK (MAGNAFLUX)
REMOVEDOR	NONDESTRUCTIVE TESTING MATERIAL (SKC-S)	MARCA SPOTCHECK (MAGNAFLUX)
REVELADOR	DEVELADOR (SKD-S2)	MARCA SPOTCHECK (MAGNAFLUX)
SOLVENTE	THINNER	MARCA
OTROS		
PANEL FOTOGRAFICO		
		
OBSERVACIONES		
<hr/> <hr/>		
ACEPTADO <input type="checkbox"/>	RECHAZADO <input type="checkbox"/>	CRITERIO DE ACEPTACION CON CORRECTIVOS SOLO EN CAMPO
ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:	Firma:	Firma:
Cargo:	Cargo:	Cargo:
Nombre:	Nombre:	Nombre:
Fecha:	Fecha:	Fecha:

DETALLES DE LOS ELECTRODOS UTILIZADOS

Electrodo revestido de tipo celulósico, con penetración profunda, diseñado para uso con corriente alterna o continua.

Su arco potente y muy estable produce depósitos de muy buena calidad.

Es aconsejable para la ejecución de pases de raíz y multipase en aceros de bajo contenido de carbono. Para la soldadura de unión en cualquier posición, en especial para vertical ascendente y sobrecabeza.

Clasificación	
AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1	E6011

Aprobaciones	Grados
ABS	3
LR	3m
GL	3

Análisis Químico del Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,07	0,55	0,30	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	-	-	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (-20°C) [J]
Sin tratamiento	450 - 550 (62 250 - 79 750)	mín. 360 (52 200)	22 30	mín. 60

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> Mantener en un lugar seco y evitar humedad. No requiere almacenamiento bajo horno.

Posiciones de Soldadura
P, H, Sc, Vd.

Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	[mm]	1,60	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo		30	50	80	110	140	180
Amperaje máximo		45	70	120	150	200	250

Aplicaciones

- Soldadura recomendable para aceros no templables (aceros dulces) con un máximo de 0,25% de carbono.
- Para soldar aceros de bajo carbono, cuando se desea penetración profunda, poca escoria, cordones no abultados y alta calidad del depósito de soldadura.
- Estructura metálica liviana.
- Para la soldadura de todas las uniones a tope que requieren una buena penetración en el primer pase.
- En la fabricación de construcciones navales, tanques, reservorios y uniones de tubos de acero de bajo carbono.

Electrodo revestido de tipo básico, de bajo hidrógeno con extraordinarias características mecánicas y de soldabilidad. Presenta un arco muy suave, bajo nivel de salpicaduras y la escoria es de muy fácil remoción. El contenido de hierro en polvo mejora su tasa de depósito. Dentro de su categoría es el producto que presenta los mejores niveles de resistencia a la tracción.

Clasificación	
AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1	E7018

Aprobaciones	Grados
ABS	3H15,3Y
LR	3m,3ym
GL	3Y


Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,05	1,00	0,60	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	-	-	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]
Sin tratamiento	520 - 610 (75 400 - 88 450)	mín. 400 (58 000)	mín.23	[-30 °C (-22 °F)] mín. 70 (57)

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> Mantener en un lugar seco y evitar humedad. Almacenamiento en horno: 125 - 150°C. Resecado de 300°C a 350 °C por 2 horas.

Posiciones de Soldadura
P, H, Va, Sc.


Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	[mm]	1,60	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo	-	60	90	120	170	210	
Amperaje máximo	-	90	140	190	240	280	

Aplicaciones

- Para aceros de mediano a alto contenido de carbono, alta resistencia y baja aleación.
- Para aceros de alto contenido de azufre y fácil fresado.
- Para aceros laminados al frío.
- Por sus características de resistencia y su fácil manejo, especialmente adecuado para: Soldaduras de tuberías de vapor, calderas de alta presión, piezas de maquinaria pesada, instalaciones de la industria petrolera, petroquímica y minera.

Nota: El precalentamiento está en función al tipo y espesor del material a soldar.

**ELECTRODO ESPECÍFICO UTILIZADO PARA
BARRAS DE REFUERZO ASTM A 615**

Electrodo revestido de tipo básico de alta resistencia a la fisuración, diseñado para soldar aceros estructurales de grano fino y alta resistencia mecánica. Presenta un arco estable, lo que le permite realizar con facilidad pases de raíz y soldaduras en posiciones forzadas.

Clasificación	
AWS A5.5 / ASME-SFA 5.5	E9018-G






Análisis Químico del Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,05	1,50	0,30	máx. 0,03	máx. 0,03	0,40	1,10	-	máx. 0,10	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]
Sin tratamiento	630 - 750 (91 350 - 108 750)	mín. 560 (81 200)	mín. 17	[-50°C (-58°F)] mín. 50 (37)

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> Mantener en un lugar seco y evitar humedad. Almacenamiento en horno: 120 a 150°C. Resecado de 340°C a 360°C por 2 horas.

Posiciones de Soldadura				
P, H, Va, Sc.				
				
1G	2G	3G	4G	5G

Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna(AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	[mm]	1,60	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo		-	65	90	130	180	-
Amperaje máximo		-	95	140	180	240	-

Tratamiento Térmico

- Tratamiento térmico en función al tipo de aplicación.

Aplicaciones

- Para soldar aceros estructurales de grano fino, aceros de mediano carbono, aceros de baja aleación y alta resistencia p.e. ASTM A615 Gr 60 (Barras de Construcción).
- Para soldar aceros al carbono resulfurizado del tipo C1110, C1112, C1113, C1115, C1117, C1132.
- Para soldar aceros del tipo SAE: 2317, 2330, 2340, 2345, 2515.
- Para soldar aceros de baja aleación al Cr-Ni, al Ni-Mo y al Ni-Cr-Mo.

Nota: El precalentamiento está en función al tipo y espesor del material a soldar.

**COMPORTAMIENTO A FATIGA DE UNA UNIÓN
SOLDADA**

COMPORTAMIENTO A FATIGA DE UNA UNIÓN SOLDADA

3.1. INTRODUCCIÓN

El fallo por fatiga comienza por la formación de una pequeña grieta que luego se propaga. El origen de la formación de esta grieta es muy diverso y hay una gran cantidad de factores que contribuyen a dicho origen, siendo uno de los más importantes la concentración de tensiones originada por los cambios bruscos de geometría.

En todos los nudos de una estructura existen inevitablemente puntos de concentración de tensiones, siendo por tanto dichos puntos los más indicados para que se origine el fallo por fatiga.

Si el nudo es soldado además de la concentración de tensiones propias de la macro geometría de la estructura se producirán otras debidas a que el proceso de soldadura introduce una variación de las propiedades físicas del material, de su composición y de su estructura cristalográfica, así como concentraciones de tensión debidas a las inevitables inclusiones y porosidades que se producen en el proceso de soldeo. Además la gran aportación de calor puntual produce una distribución no uniforme de temperaturas en la zona soldada que creará tensiones residuales del orden del límite elástico que influirán en la tensión real de fatiga en los distintos puntos afectados por el calor.

3.3. CONCEPTOS BÁSICOS DE FATIGA

3.3.1. Rotura por fatiga.

En toda rotura por fatiga aparecen tres zonas diferenciadas:

1. Incubación (origen de la grieta): la grieta se produce normalmente en la superficie de la pieza, propagándose hacia el interior de la misma. No obstante, en algunas piezas soldadas que presenten defectos internos, la grieta puede originarse en el interior y progresar hacia el exterior.
2. Propagación: una vez iniciada la grieta, ésta progresa en la dirección perpendicular a la dirección de la tensión principal máxima de las tensiones que la causan. Esta región tiene una apariencia suave y sedosa, y llega hasta los límites de la propia fractura. Esta región tiende a crecer lentamente, pero de forma progresiva, y con una textura cada vez más rugosa a medida que la distancia al núcleo de la grieta por fatiga aumente. Si se observa cuidadosamente esta parte de la fractura, frecuentemente se comprueba la existencia de anillos concéntricos alrededor del núcleo, junto con líneas radiales que parten de dicho punto.
3. Rotura final: a medida que la grieta progresa la tensión en la sección transversal restante aumenta, con lo que también lo hace la velocidad de propagación de la grieta. En la última etapa, cuando el área que resta es insuficiente para soportar la carga aplicada, se produce la rotura final. Por

lo tanto, si el área final de rotura es pequeña, implica un nivel bajo de tensiones, mientras que por contra, si el área final de rotura es grande implica un nivel alto de tensiones. La superficie de la rotura final puede ser o bien cristalina o bien fibrosa dependiendo de si la fractura final ha sido frágil o dúctil.

La figura 3.3-1 muestra las fases de la rotura por fatiga:

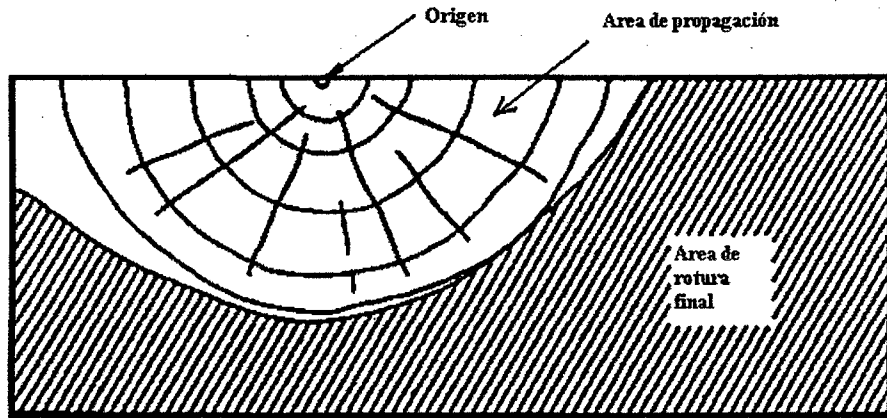


Fig. 3.3-1

3.3.2. Resistencia a fatiga. Curva s-n.

La resistencia a fatiga de un elemento en particular y bajo unas condiciones de carga dadas, se determina experimentalmente.

La forma de presentar los resultados obtenidos es representando en una gráfica el número de ciclos de carga que se deben dar para que la probeta, sometida a un nivel de tensiones dado, rompa. Los puntos obtenidos para diversos niveles de tensión pueden aproximarse por una curva que recibe el nombre de curva de Wöhler o curva S-N (figura 3.3-2).

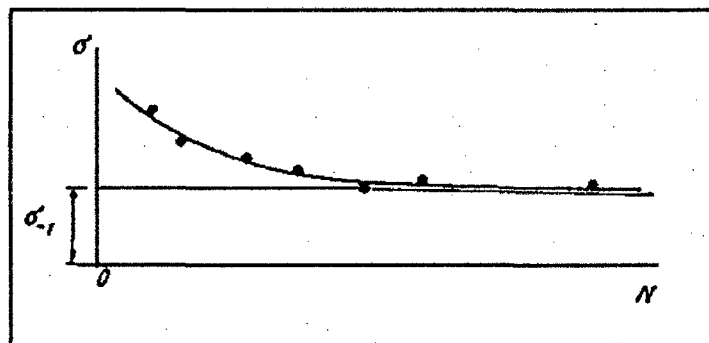


Fig. 3.3-2

La curva muestra que el máximo nivel de tensiones decrece a medida que aumenta el número de ciclos hasta un determinado valor por debajo del cual el material no rompe aunque se aumente el número de ciclos hasta el infinito.

Para el diseño a fatiga de uniones soldadas se emplean curvas S-N de carácter

experimental. Habitualmente se suelen representar las curvas en escala logarítmica (figura 3.3-3), de forma que la curva se transforma en dos rectas, siendo una de ellas horizontal, y estando el punto de intersección de ambas a partir de un número de ciclos en torno a 10^6 ciclos, punto al cual se le suele denominar límite de fatiga, y se representa por σ^{-1}

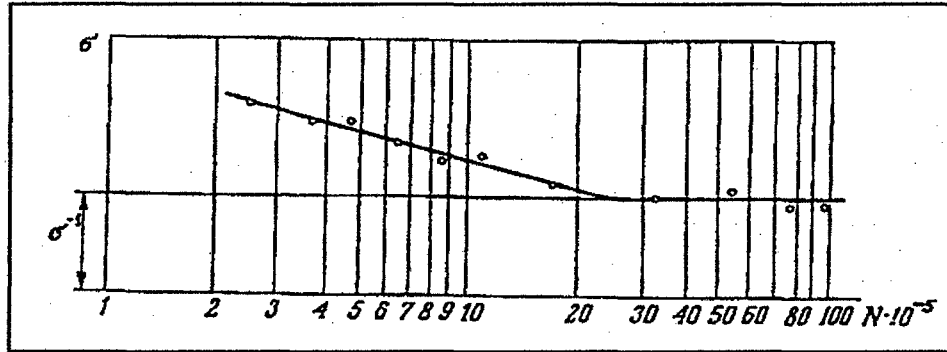


Fig. 3.3-3

Hay cuatro posibles parámetros básicos que se pueden usar para definir el ciclo de tensiones:

- La tensión mínima en el ciclo (σ_{\min})
- La tensión máxima en el ciclo (σ_{\max})
- La tensión media ($\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_{\min} + \sigma_{\max})$)
- El rango de tensiones ($\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$)

El ciclo queda completamente definido si se tienen dos de los cuatro valores anteriores. A menudo es conveniente, sin embargo, referirse al ciclo de carga por la relación de tensiones R , que viene definida por $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, considerando tensiones de tracción positivas y de compresión negativas. Este valor de R es usado en algunos códigos para determinar, en caso de tensiones residuales despreciables, cómo se puede aumentar la categoría de fatiga de un detalle soldado.

- Tensión pulsante: en el que la tensión varía desde cero hasta la tensión máxima ($R=0$)
- Tensión alterna: en el que la tensión máxima y mínima son iguales en amplitud pero opuestas en signo ($R=-1$).
- Media tracción: caso particular en el que tanto la máxima como la mínima tensión son de tracción, siendo la tensión máxima el doble de la tensión mínima y por tanto el valor de R es 0.5.

Es necesario indicar que las cargas variables, a las que está sometida una estructura en condiciones de operación, no tienen por qué ser de los tipos anteriores, sino que en general varían de forma aleatoria.

3.3.3. Factores que afectan a la resistencia a fatiga.

Hay una gran cantidad de factores que afectan al límite de fatiga, y en consecuencia a la resistencia a fatiga de una pieza soldada, entre los cuales los más importantes son:

- Concentración de tensiones
- Efecto de las tensiones residuales
- Defectos de forma. Perfiles incorrectos.
- Efecto de escala o de tamaño
- Material
- Efecto de las discontinuidades
 - Porosidades
 - Inclusiones de escorias
 - Falta de fusión
 - Falta de penetración
 - Grietas
- Otros factores
 - Corrosión
 - Temperatura

3.3.4.1. Concentración de tensiones

Los cambios bruscos de sección originan concentraciones locales de tensión.

Bajo el supuesto de carga estática, dicha concentración carece de importancia en materiales dúctiles, dado que la plastificación producirá una redistribución de tensiones sin mermar de forma apreciable la capacidad portante del elemento. Sin embargo, bajo sollicitaciones variables de carga, la presencia de estos concentradores hace que las tensiones a las que estará sometido el material sean mayores que si no existiera el concentrador, con lo que la resistencia a fatiga de dicho elemento será considerablemente menor.

En la figura 3.3-5 se muestra un ensayo de fatiga realizado sobre tres elementos diferentes, pero del mismo material. Como puede observarse, aún siendo el efecto del concentrador de tensiones en el borde del agujero similar al que se produce en la soldadura, la respuesta a fatiga es bastante peor para el caso de la soldadura, lo cual indica que en las uniones soldadas, aparte del efecto del concentrador de tensiones, existen otros muchos factores que afectan al límite a fatiga.

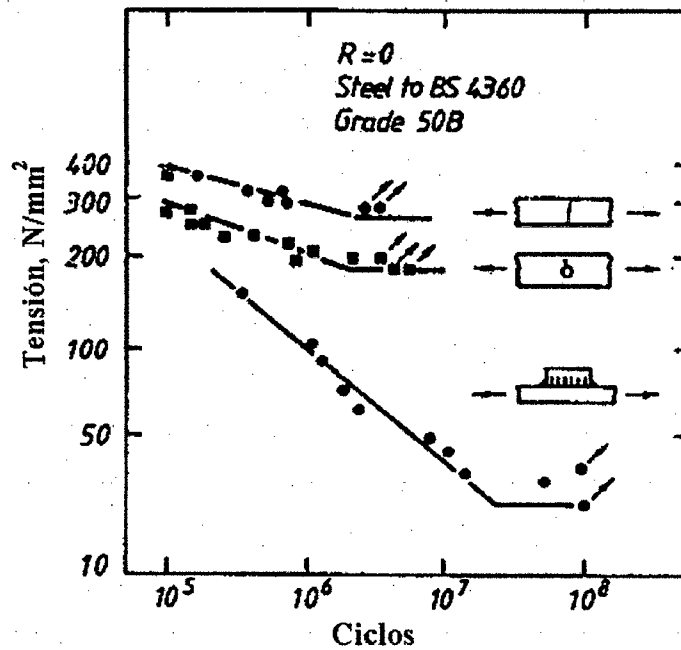
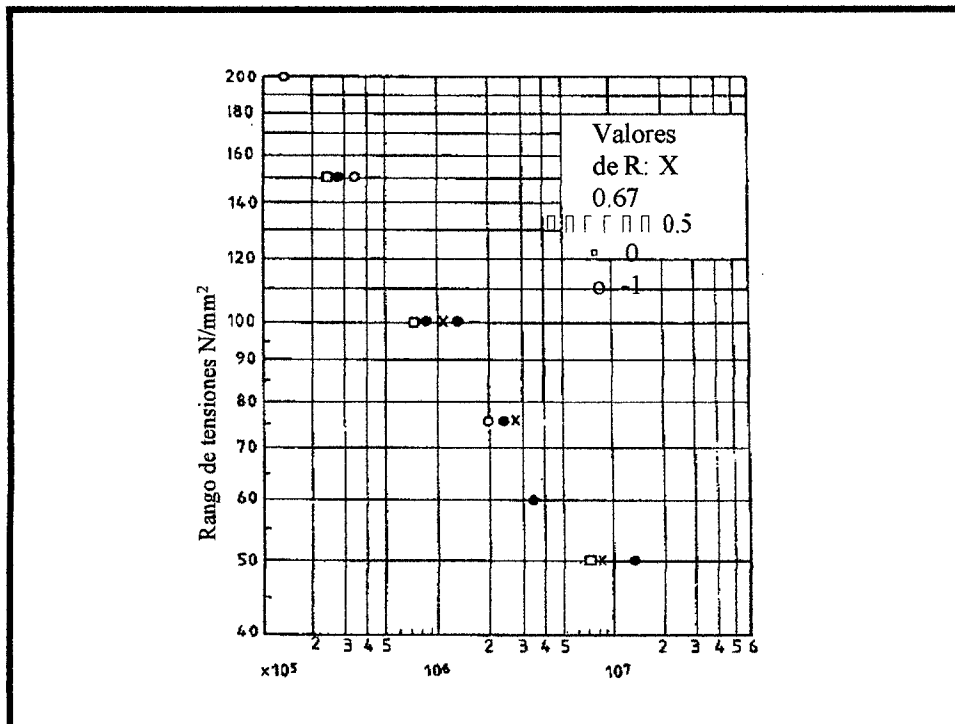


Fig. 3.3-5

3.3.4.2. Efecto de las tensiones residuales

Las tensiones residuales son un sistema de tensiones internas autoequilibradas. En las uniones soldadas, el origen de las tensiones residuales es el enorme aporte térmico y el posterior enfriamiento. Esto origina dilataciones y contracciones en el metal base y en el de aportación que provoca un estado de tensiones cuya magnitud en las proximidades del cordón soldado puede ser del orden del límite elástico del material.

Así, cuando una carga cíclica se aplica a la estructura, las tensiones que provoca se superponen al campo de tensiones residuales existente, con lo que las tensiones reales que actúan en la unión soldada pueden variar en torno al límite elástico. El rango de cada ciclo permanece inalterado, pero la tensión media puede ser sensiblemente diferente a la nominal aplicada. Por lo tanto, el valor del campo de tensiones resultante será del orden de las tensiones residuales, por lo que la tensión nominal media aplicada (σ_m) deja de ser importante y la vida a fatiga pasa a estar controlada por el rango de tensiones ($\Delta\sigma$). La figura 3.3-6 muestra los resultados experimentales de soldaduras longitudinales en ángulo [12] donde se observa que el comportamiento a fatiga es independiente de la relación de tensiones para el caso de soldaduras no distensionadas.



Numero de Ciclos

Fig. 3.3-6

En caso de conseguir, mediante el uso de tratamientos térmicos posteriores al proceso de soldeo, que las tensiones residuales sean despreciables, la resistencia a fatiga de la pieza mejora. Esto está recogido en distintos códigos, y así el Eurocódigo 3 [1] considera, en caso de detalles soldados distensionados, una carrera de tensión efectiva a considerar para el cálculo a fatiga, determinada por la suma de la parte en tracción de la carrera de tensión y por el 60% de la parte de compresión de la misma. El Instituto Internacional de la Soldadura [2] considera, para detalles soldados con tensiones residuales despreciables, un aumento de la categoría de fatiga en función del valor de R (relación de tensiones).

3.3.4.3. Defectos de forma. Perfiles incorrectos

Los perfiles incorrectos de soldaduras afectan, como consecuencia de las concentraciones locales de tensiones, a la resistencia a la fatiga. La figura 3.3-7 muestra los resultados de soldaduras a tope transversales [12] donde se observa cómo varía la resistencia a fatiga a medida que varía el ángulo del perfil.

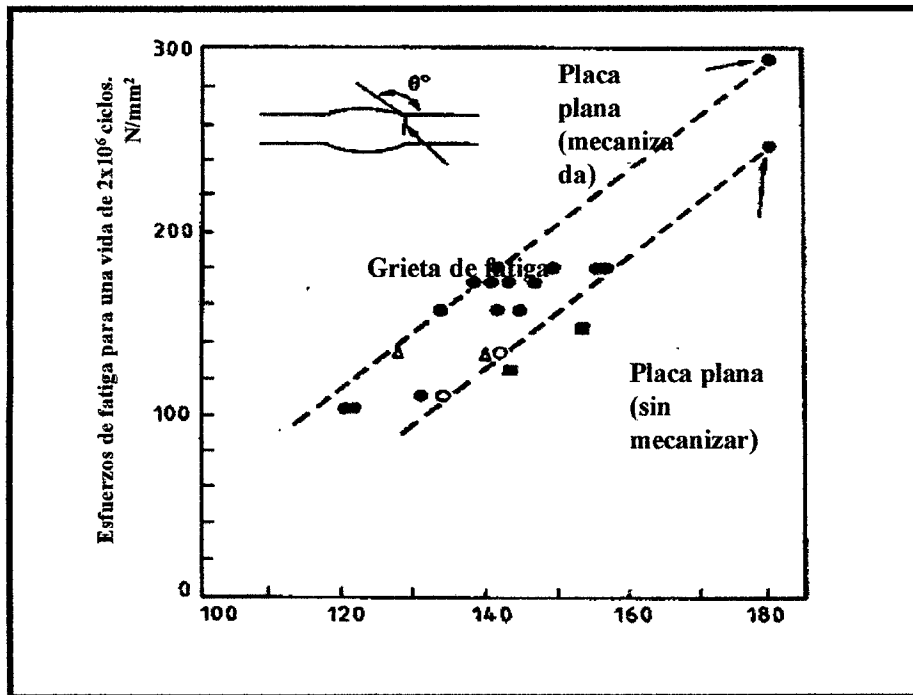


Fig. 3.3-7: Ángulo de refuerzo, θ (Grados)

3.3.4.4. Efecto de escala o de tamaño

Se ha observado que entre piezas semejantes, las de mayor tamaño son más sensibles a la fatiga. Esto es debido a que, en piezas grandes, el gradiente de tensiones es menor y en consecuencia hay una zona mayor sometida a tensiones mayores, además de que en piezas de espesores grandes las tensiones residuales son mayores y de que existe mayor probabilidad de defectos internos en las secciones grandes que en las pequeñas.

3.3.4.5. Material

Se ha comprobado que para aceros de límite elástico inferior a 700 N/mm^2 , la resistencia a fatiga de uniones soldadas es independiente de las propiedades mecánicas a tracción del material. Para uniones trabajando en ambientes corrosivos o para uniones que hayan sufrido un tratamiento tras el proceso de soldeo para mejorar la resistencia a fatiga, la resistencia del acero sí puede afectar a la resistencia a fatiga.

3.3.4.6. Efecto de las discontinuidades

Las discontinuidades que se pueden originar en una soldadura, por una incorrecta ejecución de la misma, pueden afectar al límite de fatiga como consecuencia principalmente del efecto de concentración de tensiones que se origina.

3.3.4.6.1. Porosidades

La forma habitual de tener en cuenta el efecto de la porosidad sobre la resistencia a fatiga es viendo como varía la resistencia a fatiga en función de la reducción de área originada por la presencia de poros. Además, algunas normas [2] suelen limitar el diámetro más grande del poro con objeto de no producir una concentración de tensiones excesiva.

3.3.4.6.2. Inclusiones de escorias

La forma habitual de tener en cuenta el efecto de las inclusiones de escorias sobre la resistencia a fatiga es viendo como varía la resistencia a fatiga en función de la longitud de la inclusión.

3.4.4.6.3. Falta de fusión

La falta de fusión es una discontinuidad grave. Es tanto más grave cuanto más perpendiculares a la discontinuidad sean las tensiones aplicadas. Así, el IIW [2] marca, como requisito que debe cumplir una soldadura para poder ser calculada a fatiga usando las curvas S-N indicadas en el mismo código, que no exista falta de fusión. En caso de existir falta de fusión, la resistencia a fatiga debe ser calculada a través de la mecánica de la fractura.

3.3.4.6.4. Falta de penetración

La influencia de la falta de penetración, en lo que a resistencia a fatiga se refiere, es similar a la que se produce como consecuencia de la falta de fusión.

3.3.4.6.5. Grietas

Las grietas originan una intensificación de tensiones en el borde de las mismas y una disminución drástica de la resistencia a fatiga de la pieza. La influencia de las mismas se debe realizar basándose en la mecánica de la fractura.

En el diseño a fatiga de uniones soldadas, se presupone que la pieza está libre de grietas y entallas, no siendo de aplicación las curvas de resistencia a fatiga en caso contrario.

3.3.4.7. Otros factores

3.3.4.7.1. Corrosión

La corrosión progresa más deprisa cuando las cargas actuantes fluctúan, y por otro lado, la presencia de corrosión como consecuencia de un ambiente agresivo puede provocar entallas y mordeduras en la pieza, lo que contribuye a disminuir la resistencia a la fatiga.

3.3.4.7.2. Temperatura

A altas temperaturas la resistencia a fatiga decrece. Así, el Eurocódigo 3 [1] indica que los procedimientos de comprobación a fatiga dados en dicho código sólo son aplicables a estructuras sometidas a temperaturas que no excedan de los 150°C, mientras que el IIW [2] da una gráfica para poder reducir la resistencia a fatiga en función de la temperatura, la cual empieza a tomar valores inferiores a 1 para temperaturas superiores a 100°C.