



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EFFECTOS DE LA SOLDADURA EN EMPALMES DE
ACERO DE REFUERZO, PARA HORMIGÓN ARMADO.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL.

ARIEL FELIPE QUEZADA RIVERA

PROFESOR GUÍA:

FERNANDO YAÑEZ URIBE

MIEMBROS COMISIÓN:

LEONARDO MASSONE SANCHEZ

RENE LAGOS CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE

JUNIO 2010

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES GENERALES.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Antecedentes históricos.....	1
1.3	Contenido de carbono y soldabilidad de las barras.....	2
1.3.1	Carbono equivalente	2
1.4	Electrodos a usar.....	4
1.5	Trabajos anteriores sobre el tema	5
2	LA SOLDADURA	7
2.1	Conceptos fundamentales	7
2.1.1	Soldadura ideal.....	7
2.1.2	Naturaleza de las superficies reales	8
2.2	Clasificación de los procesos de soldadura	8
2.3	Procesos de soldadura por arco eléctrico	9
2.3.1	Naturaleza y características del arco eléctrico.....	9
2.3.2	Soldadura con electrodo manual (SMAW o MMA).....	10

2.3.3	Soldadura por electrodo no consumible protegido (TIG).....	12
2.3.4	Soldadura por electrodo consumible protegido (MIG y MAG)	15
2.3.5	Soldadura por arco sumergido (SAW)	17
2.4	Electrodos	20
2.5	Influencia de los elementos del acero sobre la soldabilidad.....	22
2.6	Función de los principales elementos de adición	23
2.6.1	Carbono	23
2.6.2	Manganeso.....	23
2.6.3	Silicio	24
2.6.4	Níquel.....	24
2.6.5	Cromo	24
2.6.6	Aluminio	24
2.6.7	Molibdeno.....	24
2.6.8	Cobre	25
2.6.9	Azufre y Fósforo (impurezas).....	25
2.7	Cuidado de los electrodos y fundentes	26

2.8	Soldabilidad de las calidades de aceros	29
2.8.1	Calidad A440-280H	30
2.8.2	Calidad A630-420H	32
3	RECOMENDACIONES DE LA NORMA AWS (AMERICAN WELDING SOCIETY) PARA SOLDADURAS	33
3.1	Esfuerzo en la soldadura	33
3.2	Áreas, longitudes y espesores efectivos en la soldadura	35
3.2.1	Empalme a tope directo y soldaduras biseladas	35
3.2.2	Soldadura con cordones longitudinales	35
3.3	Detalles estructurales	37
3.3.1	Excentricidad	37
3.3.2	Tipos de empalmes permitidos	37
3.3.3	Empalmes a tope directo	37
3.3.4	Empalmes a tope indirecto	37
3.3.5	Empalmes a solapo	38
3.4	Temperatura de precalentamiento y temperatura de interpasada	42
3.5	Requerimientos para el metal de aporte	43

3.6	Procedimiento de control	44
3.7	Electrodos para soldadura al arco	45
3.8	Calificación WPS	46
3.8.1	Tipos de ensayos y su propósito	46
3.8.2	Preparación de probetas	46
3.8.3	Metodología de ensayo	47
3.8.4	Resultados requeridos en los ensayos	48
4	DEFINICIÓN DE VARIABLES EN ENSAYO DE BARRAS A TRACCIÓN	49
4.1	Descripción del problema	49
4.2	Metodología de ensayo	49
4.3	Técnica de soldadura	52
4.3.1	Soldaduras a tope	52
4.3.2	Soldadura a solapo.....	54
4.4	Determinación de variables involucradas en el proceso de soldadura	57
4.4.1	Proceso de soldadura.....	57
4.4.2	Posición de la soldadura.....	57

4.4.3	Electrodos a usar.....	58
4.4.4	Amperaje, voltaje y velocidad de avance.....	60
4.4.5	Temperatura de precalentamiento y de interpasada.....	60
4.5	Forma de colocación de la soldadura.....	61
4.6	Espesor requerido de la soldadura.....	61
4.7	Especificaciones para ensayos de tracción.....	63
4.8	Ensayos de las probetas soldadas.....	63
4.8.1	Registro.....	64
5	ENSAYO DE BARRAS A TRACCIÓN.....	65
5.1	Esquema de barras a ensayar.....	65
5.2	Parámetros de la soldadura.....	68
5.2.1	Raíz E6010.....	68
5.2.2	Electrodos de relleno.....	68
5.3	Pruebas previas al soldado de probetas.....	69
5.4	Macroataque.....	69
5.5	Confección de probetas.....	72

5.6	Resultado ensayos	77
5.6.1	Acero A630-420H	77
5.6.2	Acero A440-280H	82
5.7	Comentarios	87
5.7.1	Fluencia y Rotura	87
5.7.2	Ductilidad.....	88
5.7.3	Cumplimiento de la norma NCh 204 Of.2006	91
5.7.4	Plateau de Fluencia.....	93
5.8	Utilización de electrodos.....	93
5.9	Comparaciones con trabajo anterior	93
6	COMPORTAMIENTO CÍCLICO DE LAS BARRAS DE ACERO DE REFUERZO.	98
6.1	Fatiga de materiales	98
6.2	Proceso de fatiga.....	98
6.3	Daño por fatiga y agrietamiento (Ashby, y otros, 2007)	99
6.4	Fatiga de bajos ciclos y fatiga de altos ciclos.....	99
6.4.1	Fatiga de altos ciclos o fatiga controlada por tensión (HCF)	99

6.4.2	Fatiga de bajos ciclos o fatiga controlada por deformación (LCF).....	100
6.5	Teoría y realidad.....	101
6.6	Ensayos experimentales.....	102
6.6.1	Ensayos realizados por Mander et al (Mander, y otros, 1994)	102
6.6.2	Ensayos realizados por Brown (Brown, y otros, 2004).....	104
7	DISEÑO DEL ENSAYO DE FATIGA DE BAJO CICLO (LOW CYCLE FATIGUE) 107	
7.1	Descripción del problema	107
7.2	Estudio de antecedentes	108
7.3	Metodología de ensayo	108
7.4	Primer diseño	109
7.4.1	Diseño del sistema para provocar pandeo en las barras	112
7.4.2	Diseño del sistema de pandeo.....	114
7.4.3	Sistema de guías.....	115
7.5	Segundo diseño.....	117
7.5.1	Diseño de los muros sometidos a ensayo.....	119
7.5.2	Resumen diseño.....	121

7.6	Desplazamientos laterales y resultados esperados	122
8	CONCLUSIONES	123
8.1	Ensayo a tracción	123
8.2	Diseño ensayo cíclico	125
8.3	Conclusiones Finales.....	126
9	BIBLIOGRAFÍA	127
A	ANEXOS.....	130
A.1	Fichas de electrodos utilizados.....	131
A.1.1	Electrodo E-6010.	131
A.1.2	Electrodo E-6011.	132
A.1.3	Electrodo E-7018.....	133
A.1.4	Electrodo E-8018-C1	134
A.2	Resultados de los ensayos a tracción.....	135
A.2.1	Acero A630-420H soldado a tope indirecto.....	135
A.2.2	Acero A630-420H soldado a solapo.....	142
A.2.3	Acero A440-280H soldado a tope indirecto.....	143

A.2.4 Acero A630-420H soldado a tope indirecto.....	152
A.2.5 Acero A440-280H soldado a tope indirecto con máquina MFL (600 kN) ...	155
A.2.6 Resumen ensayos a tracción.....	156
A.2.7 Cumplimiento Normativa NCh 204. Of.2006 de las barras ensayadas a tracción (Detalle).....	159
A.3 Diseño 1 del sistema cíclico (detalles)	161
A.3.1 Diseño de placa soportante para el gato hidráulico.....	161
A.3.2 Cuñas de sostenimiento de los bloques de hormigón	165
A.3.3 Diseño perfil “C” inferior	168
A.3.4 Diseño perfil “C” superior (que sostiene al hormigón)	174
A.3.5 Detalles piezas	179
A.4 Diseño 2 del sistema cíclico (detalles)	185
A.4.1 Diseño sección interacción pernos de anclaje y refuerzo vertical.....	185
A.4.2 Diseño viga de fundación.....	186
A.4.3 Longitud de desarrollo barras en tracción	190
A.4.4 Resumen diseño (detalles)	192

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1: Composición química de una barra de diámetro 8 mm (en %)	3
Tabla 1.2: Electroodos de bajo contenido de hidrógeno	4
Tabla 1.3: Rango de composiciones químicas y carbono equivalente de las barras usadas en la memoria de Capelli.	6
Tabla 2.1: Guía para la estabilización de fundentes	28
Tabla 2.2: Composición química de barra A630-420H, de 8 mm	29
Tabla 2.3: Composición química de barra A630-420H, de 10 mm	29
Tabla 2.4: Composición química de barra A630-420H, de 12 mm	29
Tabla 2.5: composición química de barra A440-280H, de 8 mm	29
Tabla 2.6: composición química de barra A440-280H, de 10 mm	29
Tabla 2.7: composición química de barra A440-280H, de 12 mm	30
Tabla 3.1 Tensiones permitidas en soldaduras (extracto tabla 2.1 AWS D1.4-98)	34
Tabla 3.2: Temperatura de precalentamiento y de interpasada	42
Tabla 3.3: Requerimientos del metal de aporte (extracto norma AWS D1.4-2005)	43
Tabla 4.1: Detalle utilización barras de refuerzo A440-280H	50

Tabla 4.2: Nomenclatura utilizada para los distintos tipos de probetas	51
Tabla 4.3: Espesores efectivos requeridos	62
Tabla 5.1: Parámetros de la soldadura para el electrodo raíz	68
Tabla 5.2 : Parámetros de la soldadura para los electrodos de relleno	68
Tabla 5.3: Tabla comparativa entre la deformación de un elemento soldado y un elemento sin soldar	89
Tabla 5.4: Requisitos ensayo a tracción según NCh 204 Of.2006	92
Tabla 5.5: Coeficiente K para la determinación de alargamiento admisible	92
Tabla 5.6: Comparación en los diferentes ítems de cada memoria para acero A440-280H	94
Tabla 5.7: Comparación en los diferentes ítems de cada memoria para acero A630-420H	94
Tabla 7.1: Fluencia y rotura según el tipo de acero para 12 mm de diámetro	112
Tabla 7.2: Corte máximo admisible según el tipo de acero.	119

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1: Soldadura al arco eléctrico	9
Figura 2.2: Esquema de soldadura al arco	10
Figura 2.3: Esquema Soldadura TIG	13
Figura 2.4: Esquema soldadura MIG	15
Figura 2.5: Esquema soldadura por arco sumergido	17
Figura 2.6: Equipamiento para la realización de la soldadura	19
Figura 3.1: Ancho efectivo para soldaduras de ranura	36
Figura 3.2 : Soldadura a tope directo	39
Figura 3.3: Soldadura a tope indirecta	40
Figura 3.4: Soldadura de solapo	41
Figura 3.5: posición de la soldadura	45
Figura 4.1: Soldadura a tope directo	52
Figura 4.2: Soldadura a tope indirecto	54
Figura 4.3: Solapo con barras en contacto	56

Figura 4.4: Empalmes soldados por solapo.	56
Figura 4.5: Ubicación de la raíz de la soldadura	59
Figura 4.6: Ancho efectivo requerido para la soldadura	62
Figura 4.7: Máquina para ensayos a tracción	63
Figura 4.8: Cuñas entre las que se colocan las probetas	64
Figura 5.1: Esquema de barras a ensayar para tope indirecto con dos barras auxiliares	65
Figura 5.2: Esquema de barras a ensayar para empalme con las barras traslapadas	66
Figura 5.3: Barras soladas a tope indirecto con dos barras de empalme	66
Figura 5.4: Barras soladas a solapo.	67
Figura 5.5: Pulido de la barra de acero	70
Figura 5.6: Aplicación solución química	70
Figura 5.7: Perfil transversal barra 10 mm y de acero A630-440H	71
Figura 5.8: Perfil transversal barra 10 mm y de acero A440-280H	71
Figura 5.9: Raíz E6010 en una barra de 12 mm a tope indirecto con dos barras de empalme	72
Figura 5.10: Raíz E6010 en una barra de 10 mm a solapo	73

Figura 5.11: Probetas enfriadas en cuarzo	74
Figura 5.12: Superficies en condiciones previas, antes de lijar con esmeril	75
Figura 5.13: Probetas terminadas (aun sin quitar la escoria)	76
Figura 5.14: Barras de 10 mm de calidad A630-420H soldadas a solapo	78
Figura 5.15: Barras de 8 mm de calidad A630-420H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares	78
Figura 5.16: Barras de 10 mm de calidad A630-420H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares	79
Figura 5.17: Barras de 8 mm de calidad A630-420H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares	79
Figura 5.18: Comparativa curvas de probeta soldada y sin soldar para diámetro 8 mm	80
Figura 5.19: Comparativa curvas de probeta soldada y sin soldar para diámetro 10 mm.	81
Figura 5.20 : Comparativa curvas de probeta soldada y sin soldar para diámetro 12 mm	82
Figura 5.21 : Comparativa de curvas de probetas soldadas y sin soldar para empalme a solapo, con barras de 10 mm.	82
Figura 5.22: Barras de 8 mm de calidad A440-280H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares.	83
Figura 5.23: Barras de 10 mm de calidad A440-280H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares	83

Figura 5.24: Barras de 12 mm de calidad A440-280H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares	84
Figura 5.25: Comparativa de curvas de probetas soldadas y sin soldar para empalme a tope indirecto, con barras de 8 mm y calidad A440-280H.	85
Figura 5.26: Comparativa de curvas de probetas soldadas y sin soldar para empalme a tope indirecto, con barras de 10 mm y calidad A440-280H.	85
Figura 5.27: Comparativa de curvas de probetas soldadas y sin soldar para empalme a tope indirecto, con barras de 12 mm y calidad A440-280H.	86
Figura 5.28: Rotura de probeta soldada de 8 mm de diámetro	90
Figura 5.29: Rotura de probeta soldada de 10 mm de diámetro	90
Figura 5.30: Probetas soldadas a solapo con barras de acero A63-42H rotas en la soldadura	96
Figura 5.31: Probetas soldadas a solapo con barras de acero calidad A63-42H rotas en la zona térmicamente afectada en la memoria de Bruno Capelli, a excepción de la quinta probeta que falló en los filetes de soldadura	96
Figura 5.32: Probetas soldadas a solapo con barras de acero A63-42 en la memoria de Bruno Capelli	97
Figura 6.1 Propagación de grietas según el tipo de fatiga	101
Figura 6.2: Condiciones in situ de la barra de refuerzo	103
Figura 6.3: Calibración inicial de las deformaciones registradas por los LVDTs	105
Figura 6.4: Desplazamiento lateral de la mordaza superior	105

Figura 6.5: Curvas de vida a la fatiga	106
Figura 7.1: Ruptura de barras. (Castilla C, y otros, 2001)	108
Figura 7.2: Vista en planta de mecanismo del ensayo cíclico	110
Figura 7.3: Vista lateral de mecanismo del ensayo cíclico	111
Figura 7.4: Comportamiento empotrado de la barra	114
Figura 7.5: Formación de rótulas en el sistema de ensayo	115
Figura 7.6: Esquema sistema guía del sistema de ensayo (no se incluye otros elementos)	116
Figura 7.7: Esquema ilustrativo de los muros a ensayar.	117
Figura 7.8: Gato Hidráulico	118
Figura 7.9: conexión del gato hidráulico con el muro.	118
Figura 7.10: Secciones críticas en la base del anclaje	120
Figura 7.11: Detalle de la armadura de refuerzo de los muros ensayados	121
Figura 7.12: Tensión versus deformación para diversos valores de e/d y l/d	122
Figura 8.1: Gráfico comparativo del cociente entre la tensión de rotura y fluencia de los diversos tipos de probetas	124
Figura 8.2: Gráfico comparativo de la deformación máxima de los distintos tipos de probetas y del mínimo requerido según norma.	124

Siglas

ASM: American Society for Metals

ASTM: American Section of the International Association for Testing Materials

AWS: American Welding Society

CE: Carbono equivalente

MAG: Metal Active Gas

MIG: Metal Inert Gas

MMA: Manual Metal Arc Welding

SAW: Submerged Arc Welding

SMAW: Shielded Metal Arc Welding

TIG: Tungsten Inert Gas

WPS: Welding Procedure Specification

ZAT: Zona afectada térmicamente

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a mi profesor guía, Sr. Fernando Yáñez Uribe, por su entusiasmo, su generosidad para compartir sus conocimientos, su constante apoyo y disposición a escucharme, y su paciencia durante el desarrollo de esta tesis.

Gracias a los profesores de la comisión Sr. Leonardo Massone Sánchez y Rene Lagos Contreras por su preocupación, dedicación y guía.

Agradezco a IDIEM y todos quienes colaboraron en la realización de los ensayos de esta memoria, en especial quisiera destacar la participación de Carlos Cubas, Perla Valdés, Juan Contreras, Pedro Kacic, Raúl Varas, Gonzalo López y Mario Aravena por su gran disposición a ayudar y por siempre hacerse un tiempo para atenderme en mis dudas y problemas.

Finalmente quiero agradecer a mis padres por la educación que me han otorgado, por los valores que me han inculcado, por su paciencia y comprensión, y por la confianza que siempre han tenido en mí.

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: ARIEL QUEZADA R.
FECHA: 22/07/2010
PROF. GUÍA: Sr. FERNANDO YAÑEZ U.

“EFECTOS DE LA SOLDADURA EN EMPALMES DE ACERO DE REFUERZO,
PARA HORMIGÓN ARMADO”

Las barras de refuerzo fabricadas en Chile no son de soldabilidad garantizada de acuerdo a las normas que establecen los requisitos de fabricación (NCh 204 Of.2006). Sin embargo, excepcionalmente ocurren problemas en obra que obligan a soldar éstas. En esta memoria se han realizado ensayos para establecer la eficacia de las soldaduras, mediante carga monotónica.

Para este efecto se ensayaron 21 empalmes soldados de barras: 6 de diámetro 8 mm, 9 de diámetro de 10 mm y 6 de diámetro de 12 mm, 50% de calidad A630-420H y 50 % de calidad A440-280H, junto a su correspondiente barra de control sin soldar. Se ensayaron 2 tipos de empalmes: a tope indirecto y a solapo. Las soldaduras de las barras se llevaron a cabo siguiendo los procedimientos exigidos en la norma AWS D1.4 del 2005 de la American Welding Society. El rango de carbono equivalente (CE) de las barras es de 0,21-0,29 % para calidad A440-280H y de 0,51-0,56% para calidad A630-420H.

Los resultados indican que no hay grandes diferencias entre una unión soldada y una sin soldar en términos de ductilidad y resistencia, sin embargo existe evidencia que otras barras con un valor muy distinto de CE se comportaban de manera distinta. Adicionalmente es importante recalcar que este tipo de uniones deben ser soldadas con un gran cuidado, requiriendo personas especializadas y familiarizadas con las indicaciones de la norma AWS D1.4. Esto es tan importante como las propiedades químicas específicas de estas barras.

Finalmente, se proponen dispositivos para hacer ensayos cíclicos de empalmes soldados.

1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Introducción

En el campo de la construcción es práctica común que para lograr continuidad en barras de acero para refuerzo de hormigón, se tenga que recurrir a técnicas como el traslape. Cuando el traslape no es una solución práctica, o no lo permitan los reglamentos de construcción, se recurre a técnicas como los conectores mecánicos y la soldadura con arco eléctrico con electrodo cuando el acero es soldable. Esta última no es aceptada dentro de los criterios de diseño y en la normativa chilena actual en relación a barras de acero para hormigón armado. Además la soldadura de barras de refuerzo de acero es deseable para el caso de estructuras prefabricadas y de conexión de estas mismas con otras estructuras (prefabricadas o no).

Si se considera que la seguridad de las construcciones en las cuales se utiliza barras de refuerzo soldadas no sólo depende de la resistencia de las barras, sino también de las uniones soldadas, se infiere que es relevante conocer el comportamiento de estas uniones ante distintos tipos de solicitaciones.

En el presente trabajo se realiza un ensayo cíclico de barras soldadas para analizar su comportamiento y compararlas con aquellas no soldadas. Adicionalmente se diseñan dos sistemas para un ensayo de bajo ciclo con el cual, en una continuación a esta memoria, indicaría el comportamiento de estas barras a esfuerzos cíclicos.

1.2 Antecedentes históricos

Experiencias recientes en Northridge, EEUU (1994), en Kobe, Japón (1995) y en Cariaco, Venezuela (1997), han demostrado que pueden ocurrir sismos severos que superen las expectativas de los movimientos propuestos para el diseño de estructuras sismoresistentes. Ante esta situación es muy probable que algunas edificaciones se vean seriamente exigidas y por lo tanto sus fuentes de disipación de energía inelástica resulten comprometidas con la ocurrencia de uno de estos terremotos.

La ocurrencia de los mecanismos frágiles atenta contra el modo de falla y por lo tanto puede comprometer la estabilidad de una edificación.

Fue mala la experiencia con las barras de acero soldadas en la armadura principal de las pilas del viaducto de la autopista de la ciudad de Kobe durante el terremoto de Hyogo-Ken Nambu del 17-01-1995, donde más de 600 m de vía colapsaron de manera frágil (Association Française du Genie Parasismique, 1995). Definitivamente esta situación impidió la ocurrencia de los mecanismos dúctiles y con ello la necesidad de disipar energía inelástica.

1.3 Contenido de carbono y soldabilidad de las barras

1.3.1 Carbono equivalente

Por su contenido de carbono los aceros se clasifican en aceros de bajo carbono, que son los que tienen hasta 0.30%; de contenido medio de carbono desde 0.30 % hasta 0.60 % ; y alto carbono con más de 0.60 % (American Society for Metals). Como se describe en lo que sigue, el contenido de carbono es relevante para lograr que la región soldada sea más resistente que el metal base. En los aceros con menos del 0.25% de carbono, esta condición se logra por el bajo contenido de carbono. Durante el proceso de soldadura, el metal base adyacente a la soldadura se calienta, provocando cambios en la microestructura del acero que al enfriarse puede llevar a la creación de nuevas estructuras con propiedades mecánicas diferentes del metal base. Como los aceros de bajo carbono tienen una baja templeabilidad¹ rara vez aumentan su dureza en el proceso de soldadura. Los problemas de poca soldabilidad generalmente aparecen en los aceros con un contenido de carbono mayor a 0.45%, ya que en este caso se requiere generalmente un precalentamiento para reducir los efectos provocados por el calor en las propiedades mecánicas del acero.

Según lo indicado en la NCh204.Of2006 se deben tener las siguientes consideraciones con respecto a la soldabilidad de las barras de refuerzo:

¹ Templeabilidad: Facilidad con la que un acero puede aumentar su dureza.

“Aunque los aceros de esta norma no son de soldabilidad garantizada, en casos muy especiales, puede ser especificado por ingeniería el empalme soldado, siempre y cuando este considere la soldabilidad del acero en cuanto a su composición química o *índice de carbono equivalente (CE)* y cuente con la aprobación de un laboratorio acreditado, así como también esta actividad sea realizada por personal calificado y adecuadamente controlado.

Estas uniones soldadas no se deberán usar en puntos críticos de la estructura. “

De manera simplemente informativa, se obtiene el índice de carbono equivalente para una barra de 8 mm cualquiera calculado de la siguiente manera:

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

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

Tabla 1.1: Composición química de una barra de diámetro 8 mm (en %)

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Sn	Mo	V	Nb	N1	CE (1)	CE(2)
0,383	0,791	0,013	0,033	0,14	0,384	0,127	0,075	0,028	0,025	0,001	0,002	0,0089	0,51	0,54

Según las recomendaciones indicadas en la AWS D1.4-98, los valores del carbono equivalente no deben exceder el 0.55%, mostrando esta medición la pobre soldabilidad de estas barras.

1.4 Electrodo a usar

Los electrodos más adecuados para las soldaduras de aceros al carbono son aquellos cuyo revestimiento produce poco o nada de hidrógeno. La clasificación AWS de estos tipos de electrodos está compuesta por la letra E y cuatro dígitos.

Los electrodos disponibles en el mercado, con características de bajo contenido de hidrógeno son los indicados en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2: Electrodo de bajo contenido de hidrógeno

Acero de baja aleación	E7010-A1
	E7018-A1
	E7018-G
	E8018-B2
	E8018-B6
	E8018-B8
	E8018-C1
	E8018-C2
	E8018-C3
	E8018-W2
	E9018-B3
	E9018-M
	E11018-M

Todos estos electrodos tienen un revestimiento rutílico potásico, y aquellos en los que el último dígito es 8 contienen además polvo de hierro en el revestimiento, lo que mejora la conductividad obteniéndose un arco más estable.

Son electrodos para soldar en todas las posiciones, lo que queda de manifiesto por el número 1 que aparece en el penúltimo dígito. La soldadura se debe realizar con corriente alterna o corriente continua y polaridad invertida.

Su revestimiento ácido produce una escoria vidriosa y da lugar a un arco muy estable con baja tensión de cebado. Para los electrodos que poseen hierro en polvo en su

revestimiento se debe usar una corriente ligeramente mayor (EXX18), que para aquellos que no lo contengan (EXX16).

1.5 Trabajos anteriores sobre el tema

Anteriormente se ha abordado el tema de la soldadura en las barras de refuerzo en Chile. Existe una memoria de 1987 dirigida por Alfonso Larraín y cuyo memorista fue Bruno Capelli, donde se analiza el comportamiento de barra de refuerzo soldadas a tope y a solapo para diámetros de 8, 12, 18,25 y 32 mm, con aceros de calidades A630-420H y A440-280H, incluyéndose los siguientes empalmes:

Soldadura a solapo:

- Con barras traslapadas
- Con dos barras como cubrejuntas (dos o cuatro filetes de soldadura)
- Con un perfil L como cubrejunta.

Soldadura a tope:

- Con bordes en X

En general en esta memoria se obtuvieron los siguientes resultados:

- El alto contenido de carbono hace que las barras CAP (véase Tabla 1.3) sean de difícil soldabilidad, sobre todo las de clase A630-420H. Esto quedó en evidencia cuando al realizarse los ensayos, la rotura se produjo en la soldadura apreciándose numerosos poros interno u otros defectos propios de las soldaduras de aceros al carbono.
- Muchas de las probetas soldadas mostraron un notable descenso de la ductilidad que se notó en una disminución del alargamiento o en la rotura de la

barra al realizar el ensayo de doblado. Este fenómeno ocurre por el efecto de la temperatura asociada al proceso y los ciclos de calentamiento y enfriamiento, que producen un endurecimiento en la zona afectada térmicamente, cuando esta es sometida a sollicitaciones. Este tipo de rotura frágil en la zona afectada térmicamente se produjo en algunos casos al realizar los ensayos, pero sólo en las barras A630-420H.

- En general se observa un mejor comportamiento de las barras A440-280H con soldadura que con las A630-420H.

Tabla 1.3: Rango de composiciones químicas y carbono equivalente de las barras usadas en la memoria de Capelli.

Calidad acero	Diámetro nominal [mm]	Contenido de (rangos)					Carbono Equivalente %
		C %	Mn %	P %	S %	Si %	
A44-28H	12	0,35-0,36	0,79-0,85	0,04	0,04	0,02-0,06	0,47-0,52
	6 a 10 y 16 a 36	0,33-0,37	0,45-0,60	0,04	0,04	0,02-0,06	0,41-0,47
A63-42H	8 a 10	0,50-0,54	1,10-1,30	0,04	0,04	0,02-0,06	0,68-0,76
	12	0,53-0,56	1,15-1,30	0,04	0,04	0,02-0,06	0,72-0,78
	16 a 36	0,41-0,45	1,10-1,30	0,04	0,04	0,02-0,06	0,59-0,67

2 LA SOLDADURA²

2.1 Conceptos fundamentales

Para comprender los procesos de soldadura es necesario analizar los fenómenos que intervienen cuando se produce el contacto de dos superficies metálicas.

En general, los metales están constituidos por granos o cristales (metal policristalino). Los bordes de grano constituyen un defecto cristalino importante en la determinación de las propiedades mecánicas de un metal.

Un átomo en el interior de un cristal se halla ligado a sus vecinos por fuerzas de interacción y puede decirse que tal configuración es estable y de baja energía (en general de mínima energía). Sin embargo, un átomo ubicado en la superficie libre no goza de tal estado, ya que no puede completar sus enlaces. Si, en estas condiciones, se ponen en adecuado contacto dos superficies del tipo mencionado; se establecerán dichos enlaces. La interfase así formada constituirá un ente equivalente a un borde de grano. La posibilidad de reproducir en forma controlada este fenómeno es lo que da origen a los procesos de soldadura.

2.1.1 Soldadura ideal

Al acercar dos superficies y dejarlas en íntimo contacto (en condiciones ideales), se producirá una reordenación de enlaces de tal forma que en el nuevo sólido formado, los átomos tenderán a alcanzar la posición de equilibrio o de mínima energía. En tal caso se obtendrá un único cristal, constituido por una unión metálica o soldadura ideal.

² Este capítulo se basa en los textos de (Zuzuki, 1982) y (Capelli Ghiglino, 1987), que pueden revisarse en la bibliografía de esta memoria.

2.1.2 Naturaleza de las superficies reales

En realidad, las superficies reales presentan un cierto grado de rugosidad, además de la presencia de agentes no metálicos como óxidos y otros que impiden establecer el contacto perfecto antes mencionado.

A causa de estas irregularidades, sólo unos pocos átomos podrían entrar en contacto ideal. Sin embargo, los agentes como óxidos y humedad también impiden el contacto.

La soldadura se ocupa de estudiar los medios prácticos para producir uniones átomo a átomo a través de uniones preexistentes y en un número suficiente para otorgar resistencia mecánica satisfactoria. Los recursos empleados para lograr tal objetivo permiten clasificar los procesos de soldadura.

2.2 Clasificación de los procesos de soldadura

Una forma de lograr el contacto íntimo de dos superficies necesario para la producción de una soldadura, es someter a las mismas a una presión recíproca. Si ésta es de magnitud adecuada será capaz de romper las capas de óxido y humedad y deformar la superficie de manera de lograr el contacto necesario. Esto da origen a la soldadura por presión o soldadura en fase sólida.

Tal proceso puede ser asistido por energía térmica, aunque la temperatura debe ser siempre inferior a la temperatura de fusión de los materiales que se sueldan. El efecto térmico permite reducir la tensión de fluencia de los materiales que se sueldan, así como disociar los óxidos y eliminar la humedad.

Otra forma de lograr una soldadura es emplear energía térmica para fundir localmente las piezas que se desean unir y así lograr la eliminación de las capas de óxido y

humedad y el íntimo contacto de las piezas por coalescencia³ de material en estado líquido. Este es el concepto básico de la familia de procesos de soldadura por fusión.

2.3 Procesos de soldadura por arco eléctrico

2.3.1 Naturaleza y características del arco eléctrico



Figura 2.1: Soldadura al arco eléctrico

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.

³ 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.

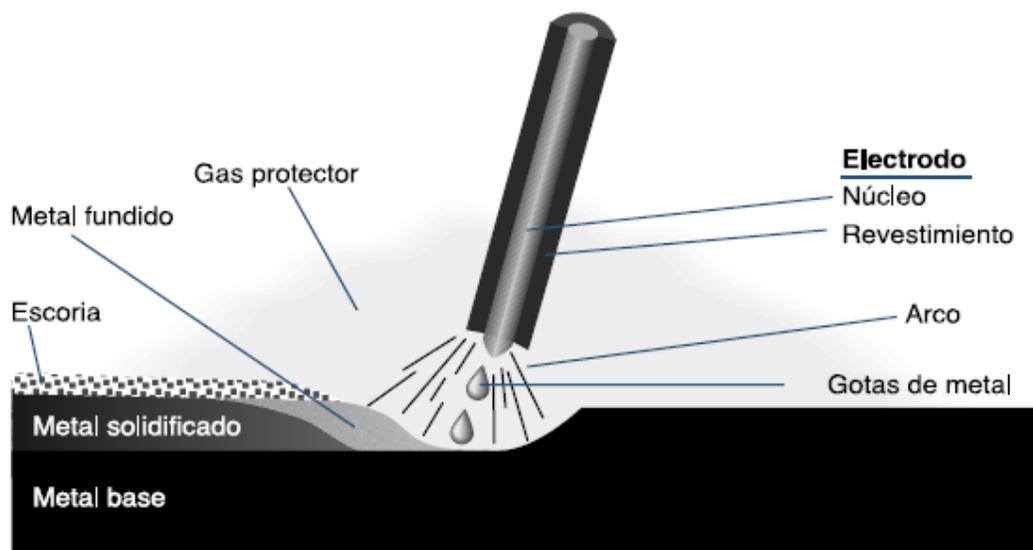


Figura 2.2: Esquema de soldadura al arco

2.3.2 Soldadura con electrodo manual (SMAW o MMA)

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.

2.3.3 Soldadura por electrodo no consumible protegido (TIG)

El objetivo fundamental en cualquier operación de soldadura es el de conseguir una junta con la misma característica del metal base. Este resultado sólo puede obtenerse si el baño de fusión está completamente aislado de la atmósfera durante toda la operación de soldeo. De no ser así, tanto el oxígeno como el nitrógeno del aire serán absorbidos por el metal en estado de fusión y la soldadura quedará porosa y frágil. En este tipo de soldadura se utiliza como medio de protección un chorro de gas que impide la contaminación de la junta. Tanto este como el siguiente proceso de soldeo tienen en común la protección del electrodo por medio de dicho gas. La soldadura por electrodo no consumible, también llamada Soldadura TIG (siglas de Tungsten Inert Gas), se caracteriza por el empleo de un electrodo permanente que normalmente, como indica el nombre, es de tungsteno.

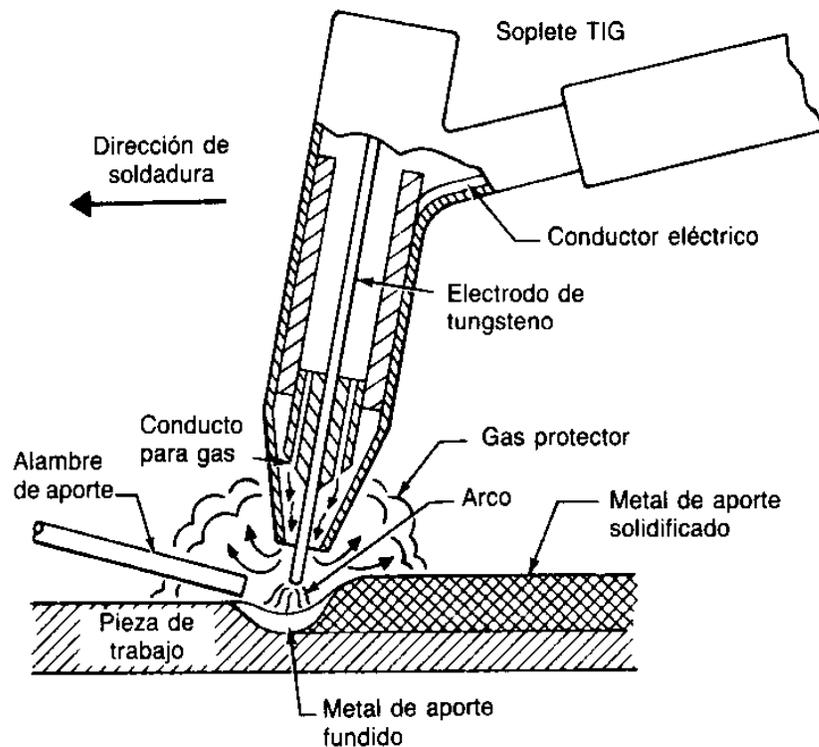


Figura 2.3: Esquema Soldadura TIG

La inyección del gas a la zona de soldeo se consigue mediante una canalización que llega directamente a la punta del electrodo, rodeándolo. Dada la elevada resistencia a la temperatura del tungsteno (funde a 3410 °C), acompañada de la protección del gas, la punta del electrodo apenas se desgasta tras un uso prolongado. Es conveniente, eso sí, repasar la terminación en punta, ya que una geometría poco adecuada perjudicaría en gran medida la calidad del soldado. Respecto al gas, los más utilizados son el argón, el helio, y mezclas de ambos. El helio, gas noble (inerte, de ahí el nombre de soldadura por gas inerte) es más usado en los Estados Unidos, dado que allí se obtiene de forma económica en yacimientos de gas natural.

Este gas deja un cordón de soldadura más achatado y menos profundo que el argón. Este último, más utilizado en Europa por su bajo precio en comparación con el helio, deja un cordón más triangular y que se infiltra en la soldadura. Una mezcla de ambos gases proporcionará un cordón de soldadura con características intermedias entre los

dos. La soldadura TIG se trabaja con corrientes continua y alterna. En corriente continua y polaridad directa, las intensidades de corriente son del orden de 50 a 500 amperios. Con esta polarización se consigue mayor penetración y un aumento en la duración del electrodo. Con polarización inversa, el baño de fusión es mayor pero hay menor penetración; las intensidades oscilan entre 5 y 60 A. La corriente alterna combina las ventajas de las dos anteriores, pero en contra da un arco poco estable y difícil de cebar.

La gran ventaja de este método de soldadura es, básicamente, la obtención de cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que en el resto de procedimientos, ya que el gas protector impide el contacto entre la atmósfera y el baño de fusión. Además, dicho gas simplifica notablemente el soldeo de metales no ferrosos, por no requerir el empleo de desoxidantes, con las deformaciones o inclusiones de escoria que pueden implicar. Otra ventaja de la soldadura por arco con protección gaseosa es la que permite obtener soldaduras limpias y uniformes debido a la escasez de humos y proyecciones; la movilidad del gas que rodea al arco transparente permite al soldador ver claramente lo que está haciendo en todo momento, lo que repercute favorablemente en la calidad de la soldadura. El cordón obtenido es por tanto de un buen acabado superficial, que puede mejorarse con sencillas operaciones de acabado, lo que incide favorablemente en los costes de producción. Además, la deformación que se produce en las inmediaciones del cordón de soldadura es menor.

Como inconvenientes está la necesidad de proporcionar un flujo continuo de gas, con la subsiguiente instalación de tuberías, bombonas, etc., y el encarecimiento que supone. Además, este método de soldadura requiere una mano de obra muy especializada, lo que también aumenta los costes. Por tanto, no es uno de los métodos más utilizados sino que se reserva para uniones con necesidades especiales de acabado superficial y precisión.

2.3.4 Soldadura por electrodo consumible protegido (MIG y MAG)

Este método resulta similar al anterior, con la salvedad de que en los dos tipos de soldadura por electrodo consumible protegido, MIG (Metal Inert Gas) y MAG (Metal Active Gas), es este electrodo el alimento del cordón de soldadura. El arco eléctrico está protegido, como en el caso anterior, por un flujo continuo de gas que garantiza una unión limpia y en buenas condiciones.

En la soldadura MIG, como su nombre indica, el gas es inerte; no participa en modo alguno en la reacción de soldadura. Su función es proteger la zona crítica de la soldadura de oxidaciones e impurezas exteriores. Se emplean usualmente los mismos gases que en el caso de electrodo no consumible, argón, menos frecuentemente helio, y mezcla de ambos.

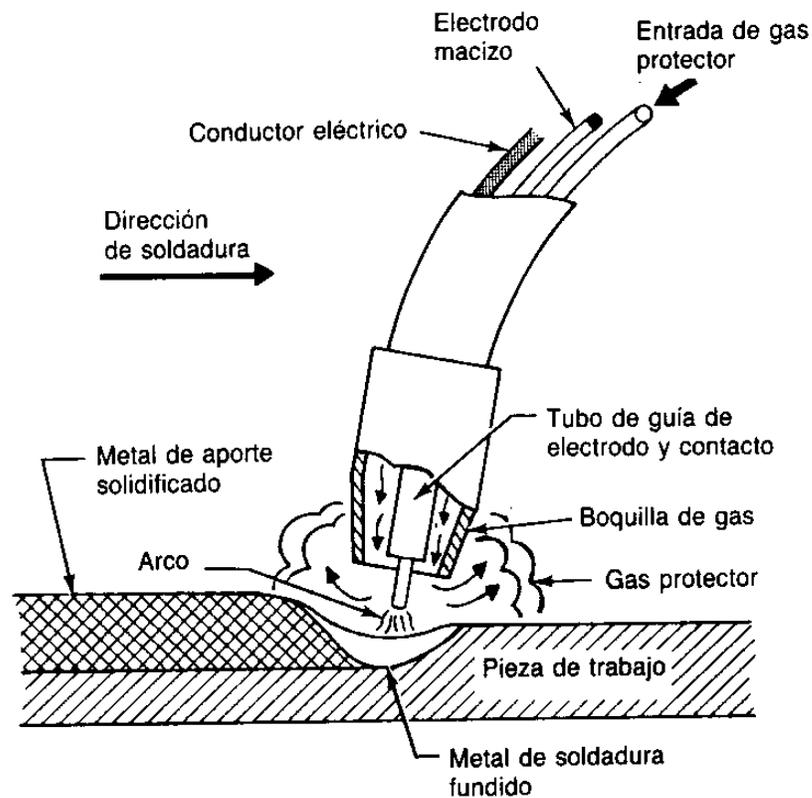


Figura 2.4: Esquema soldadura MIG

En la soldadura MAG, en cambio, el gas utilizado participa de forma activa en la soldadura. Su zona de influencia puede ser oxidante o reductora, ya se utilicen gases como el dióxido de carbono o el argón mezclado con oxígeno. El problema de usar CO₂ en la soldadura es que la unión resultante, debido al oxígeno liberado, resulta muy porosa. Además, sólo se puede usar para soldar acero, por lo que su uso queda restringido a las ocasiones en las que es necesario soldar grandes cantidades de material y en las que la porosidad resultante no es un problema a tener en cuenta. El uso de los métodos de soldadura MIG y MAG es cada vez más frecuente en el sector industrial. En la actualidad, es uno de los métodos más utilizados en Europa occidental, Estados Unidos y Japón en soldaduras de fábrica. Ello se debe, entre otras cosas, a su elevada productividad y a la facilidad de automatización, lo que le ha valido abrirse un hueco en la industria automovilística. La flexibilidad es la característica más sobresaliente del método MIG / MAG, ya que permite soldar aceros de baja aleación, aceros inoxidable, aluminio y cobre, en espesores a partir de los 0,5 mm y en todas las posiciones. La protección por gas garantiza un cordón de soldadura continuo y uniforme, además de libre de impurezas y escorias. Además, la soldadura MIG / MAG es un método limpio y compatible con todas las medidas de protección para el medio ambiente.

En contra, su mayor problema es la necesidad de aporte tanto de gas como de electrodo, lo que multiplica las posibilidades de fallo del aparato, además del lógico encarecimiento del proceso. La soldadura MIG/MAG es intrínsecamente más productiva que la soldadura MMA, donde se pierde productividad cada vez que se produce una parada para reponer el electrodo consumido.

Las pérdidas materiales también se producen con la soldadura MMA, cuando la parte última del electrodo es desechada. Por cada kilogramo de electrodo revestido comprado, alrededor del 65% forma parte del material depositado (el resto es desechado). La utilización de hilos sólidos e hilos tubulares han aumentado esta eficiencia hasta el 80-95%. La soldadura MIG/MAG es un proceso versátil, pudiendo depositar el metal a una gran velocidad y en todas las posiciones. El procedimiento es muy utilizado en espesores delgados y medios, en fabricaciones de acero y estructuras

de aleaciones de aluminio, especialmente donde se requiere un gran porcentaje de trabajo manual. La introducción de hilos tubulares está encontrando cada vez más, su aplicación en los espesores fuertes que se dan en estructuras de acero pesadas.

2.3.5 Soldadura por arco sumergido (SAW)

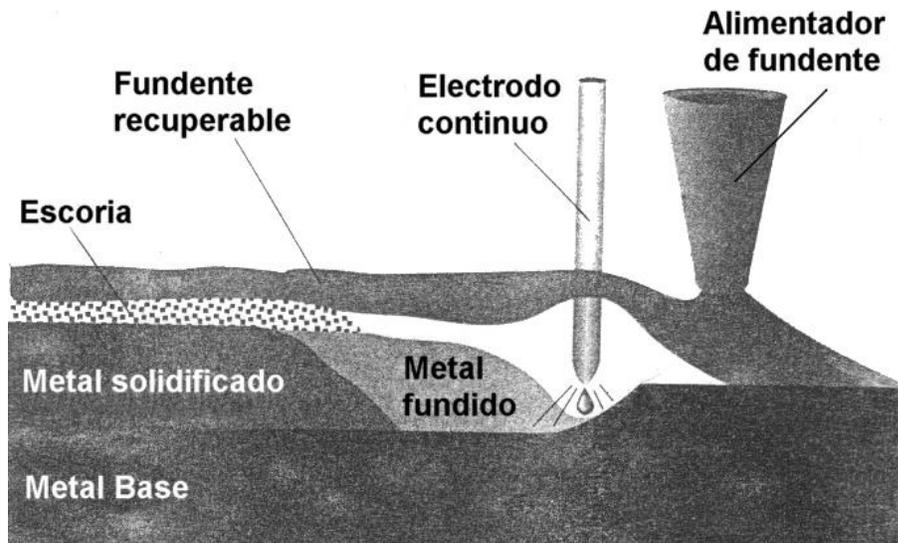


Figura 2.5: Esquema soldadura por arco sumergido

El proceso de soldadura por arco sumergido, también llamado proceso SAW (Submerged Arc Welding), tiene como detalle más característico el empleo de un flujo continuo de material protector en polvo o granulado, llamado flux. Esta sustancia protege el arco y el baño de fusión de la atmósfera, de tal forma que ambos permanecen invisibles durante la soldadura. Parte del flux funde, y con ello protege y estabiliza el arco, genera escoria que aísla el cordón, e incluso puede contribuir a la aleación. El resto del flux, no fundido, se recoge tras el paso del arco para su reutilización. Este proceso está totalmente automatizado y permite obtener grandes rendimientos.

El electrodo de soldadura SAW es consumible, con lo que no es necesaria aportación externa de fundente. Se comercializa en forma de hilo, macizo o hueco con el flux

dentro (de forma que no se requiere un conducto de aporte sino sólo uno de recogida), de alrededor de 0,5 mm de espesor.

El flux, o mejor dicho, los fluxes, son mezclas de compuestos minerales varios (SiO_2 , CaO , MnO , etc...) con determinadas características de escorificación, viscosidad, etc. Obviamente, cada fabricante mantiene la composición y el proceso de obtención del flux en secreto, pero, en general, se clasifican en fundidos (se obtienen por fusión de los elementos), aglomerados (se cohesionan con aglomerantes; cerámicos, silicato potásico, etc.) y mezclados mecánicamente (simples mezclas de otros fluxes). Ya que el flux puede actuar como elemento fundente, la adición en él de polvo metálico optimiza bastante el proceso, mejora la tenacidad de la unión y evita un indeseable aumento del tamaño de grano en el metal base.

Dependiendo del equipo y del diámetro del hilo de electrodo, este proceso se trabaja con intensidades de hasta 1600 amperios, con corrientes continuas (electrodo positivo y base negativa) o alternas.

Este proceso es bastante versátil; se usa en general para unir metales férreos y aleaciones, y para recubrir materiales contra la corrosión (overlay). Además, permite la soldadura de piezas con poca separación entre ellas. El arco actúa bajo el flux, evitando salpicaduras y contaminación del cordón, y alimentándose, si es necesario, del propio flux, que además evita que el arco se desestabilice por corrientes de aire. La soldadura SAW puede aplicarse a gran velocidad en posiciones de sobremesa, para casi cualquier tipo de material y es altamente automatizable. El cordón obtenido en estos soldeos es sano y de buen aspecto visual. Una característica mejora del proceso SAW es la soldadura en tándem, mediante la cual se aplican dos electrodos a un mismo baño. Así se aumenta la calidad de la soldadura, ya que uno de los electrodos se encarga de la penetración y el volumen del cordón, mientras que el segundo maneja los parámetros de geometría y tamaño.

En cambio, la mayor limitación de este proceso es que solo puede aplicarse en posiciones de sobremesa y cornisa, ya que de otra manera el flux se derramaría. Flux

que ha de ser continuamente aportado, lo cual encarece el procedimiento y aumenta sus probabilidades de fallo (hay que alimentar tanto el rollo de electrodo como el flux); además, si se contamina por agentes externos, la calidad del cordón disminuye bastante. A pesar de que puede unir materiales poco separados, no es recomendable para unir espesores menores de 5mm.

Este proceso tiene su mayor campo de aplicación en la fabricación de tuberías de acero en espiral y, en general, en la soldadura de casi cualquier tipo de aceros (especialmente los inoxidables).

Equipamiento para la realización de la soldadura:

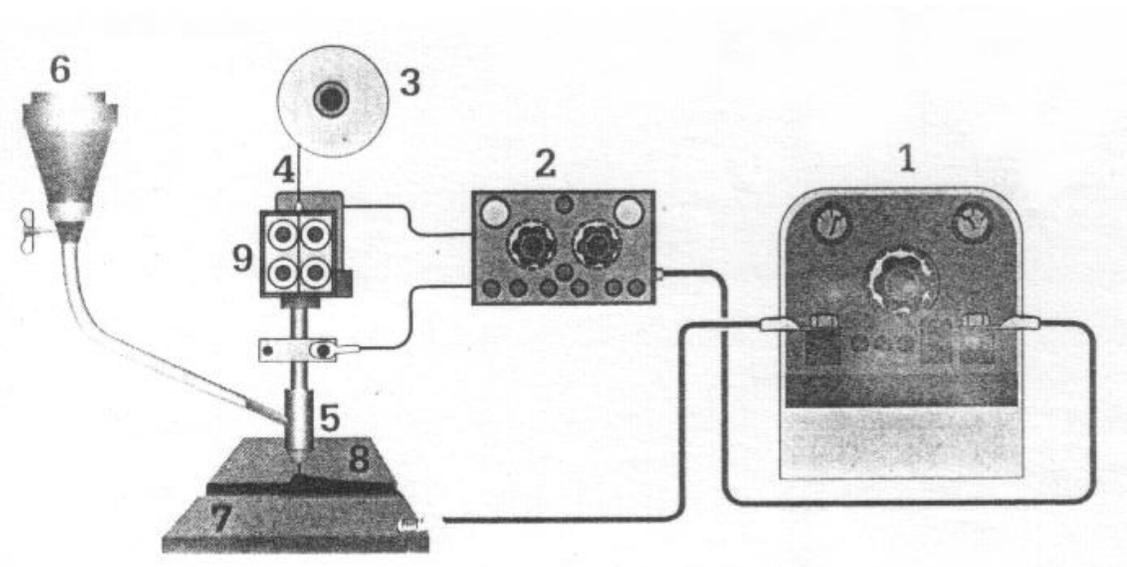


Figura 2.6: Equipamiento para la realización de la soldadura

Se utiliza el siguiente equipamiento mostrado en la Figura 2.6:

- 1- Fuente de poder de CC o CA (100% ciclo de trabajo).
- 2- Sistema de control.
- 3- Porta carrete de alambre.
- 4- Alambre-electrodo.
- 5- Tobera para boquilla.
- 6- Recipiente porta-fundente.
- 7- Metal base.
- 8- Fundente.
- 9- Alimentador de alambre.

2.4 Electroodos

Dado que, como se acaba de mencionar, el alambre que se emplea en la fabricación de los electrodos para aceros al carbono y de baja aleación es el mismo en todos los casos, la clasificación de los distintos tipos se efectúa en base a las características del revestimiento. Existen en la actualidad cuatro tipos de electrodos caracterizados por sus respectivos recubrimientos:

1. Electroodos de revestimiento celulósico.
2. Electroodos de revestimiento ácido.
3. Electroodos de revestimiento rútilico.
4. Electroodos de revestimiento básico (o de bajo hidrógeno)

Los electrodos del tipo celulósico, contienen en su revestimiento un 30% de material celulósico. Este revestimiento se quema en el arco generando una atmósfera de H_2 , CO_2 y CO , muy reductora, que ofrece una adecuada protección al metal que

evoluciona a alta temperatura. Además estos electrodos producen una muy alta penetración y son aptos para trabajos de soldadura “en posición”.

Los electrodos denominados ácidos, poseen revestimientos con alto contenido de óxido de hierro, óxido de manganeso y silicatos. Producen al quemarse, escaso volumen de gases pero proveen en cambio una escoria densa y abundante que interactúa con el metal fundido protegiéndolo de la contaminación atmosférica. La característica de la escoria hace que estos electrodos no sean aptos para trabajo “en posición” (véase Figura 3.5 en el capítulo siguiente)

Los electrodos rútilicos vinieron a reemplazar a los ácidos, al estar constituido su revestimiento por más de 50% de TiO_2 (rutilo). Este compuesto favorece la estabilidad del arco y produce una escoria que por sus características, permite la soldadura “en posición”. La protección del metal fundido se efectúa en forma mixta por los vapores de la combustión del revestimiento y por el manto de escoria generado. Son electrodos muy versátiles, aptos para soldadura en corriente continua o alterna, capaces de producir depósitos de adecuada resistencia mecánica, aunque no muy alta ductilidad.

Los electrodos de revestimiento básico, o de bajo hidrógeno, tienen revestimientos a base de CO_3Ca , F_2Ca . Producen al quemarse una escoria de reacción básica, de alto poder de desoxidación y una atmósfera reductora de CO/CO_2 , sin hidrógeno. Son los electrodos que mejores propiedades mecánicas producen en un depósito, especialmente en materiales aleados o con alto contenido de azufre o fósforo. Requieren una mayor habilidad por parte del operador para su manipulación, pero las características de la escoria son tales que son aptos para trabajos “en posición”. Debe darse especial cuidado al secado previo a su utilización, para mantener los valores de humedad en el revestimiento (y por lo tanto de hidrógeno en el arco), en valores aceptables.

2.5 Influencia de los elementos del acero sobre la soldabilidad

Los elementos del acero ordinario: 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, se tienen los siguientes fenómenos que intervienen sobre la soldabilidad:

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, ya por los elementos presentes en el acero utilizado como metal de aportación.

A la temperatura de fusión se alcanza un estado que está lejos del de equilibrio debido a la velocidad de la operación de soldadura. No obstante, en estado líquido, siendo muy reducidas las resistencias pasivas y además, estando activadas las reacciones por el aporte suplementario de elementos de afinado que se encuentran en el revestimiento de los electrodos, se puede admitir que las reacciones finales están muy próximas a las de equilibrio. En estas condiciones puede estudiarse la reducción del óxido de hierro estable FeO por los elementos reductores del acero: carbono, manganeso y silicio.

El metal de base experimenta en las proximidades de la soldadura una fusión parcial sobre una extensión más o menos amplia, según el procedimiento y los métodos de unión. Para las regiones más alejadas de la soldadura, el metal de base es asiento de un tratamiento térmico que varía en cada punto. Esto conduce a una doble preocupación desde el punto de vista metalúrgico; presencia de sopladuras siguiendo la línea de ligazón participante en la fusión y poder templante del acero.

Para el primer defecto, hay que conformarse con lo que ya se ha dicho sobre la calidad de los metales de aportación. Por el contrario, para un acero dado, el poder templante depende del ciclo térmico de la soldadura.

Este problema está esencialmente ligado a la soldabilidad metalúrgica del acero y puede ponerse de manifiesto por una exploración casi puntual de las propiedades mecánicas de la unión.

2.6 Función de los principales elementos de adición

2.6.1 Carbono

El carbono es siempre el elemento base para fijar la soldabilidad. Interviene, sea para aumentar el poder de temple (unión frágil), sea para dar precipitados de carburo complejos (aceros inoxidable) actuando sobre la resistencia química de la unión.

2.6.2 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. En general, su contenido rara vez sobrepasa el 2%; por otra parte es un desoxidante enérgico.

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.

2.6.3 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.

2.6.4 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.

2.6.5 Cromo

El cromo asociado con otros elementos (Ni, Mo) aumenta la templabilidad del acero. La soldadura oxiacetilénica de los aceros al cromo, exige el empleo de un flujo decapante capaz de disolver el óxido de cromo. 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.

2.6.6 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.

2.6.7 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%.

2.6.8 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.

2.6.9 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, además de romperse fácilmente cuando se calienta al rojo, por que la combinación azufre-hierro funde a los 985°C y el azufre se inclina a la segregación. Por esta causa se recomienda mantener la proporción de azufre bajo el 0,1%.

El fósforo actúa en el momento de la solidificación originando el fosfuro de hierro (FeP_3) que da fragilidad al metal y además aumenta el tamaño del grano del metal fundido.

El sulfuro de hierro (FeS) toma lugar en la unión de los granos transformando en caliente el metal, esta transformación hace que sea muy frágil la unión.

2.7 Cuidado de los electrodos y fundentes

El fundente que cubre los electrodos, especialmente los de bajo hidrogeno, tiende a atraer la humedad efecto que se conoce como Higroscopia, la humedad es una de las mayores causas de grietas y porosidad en la soldadura. Es verdad que agua sola no puede estropear la soldadura, pero el calor del arco tiene un efecto directo en la humedad, separando sus elementos básicos, hidrogeno y oxígeno. Estos elementos por separado cuando están presentes en la soldadura no son más que portadores de defectos que pueden amenazar seriamente la calidad de la soldadura, además del agua, existen otras fuentes de contaminación que traen hidrogeno como el aceite, la grasa, sucio y la misma capa de fundente.

Los átomos de hidrogeno producidos de la descomposición de la humedad presente en el momento del arco de la soldadura, se asientan en los vacíos atómicos estructurales de la solución, si el metal se enfría lo suficientemente rápido, no todo el hidrogeno es absorbido, algunos emigran a la zona afectada térmicamente (ZAT) del metal base. Algunos forman gasificaciones o simplemente se evaporan y otros ayudan a formar esas impurezas indeseables en la soldadura.

La capacidad del acero de absorber hidrogeno, se incrementa con la temperatura, en el momento de estar en su estado líquido (fundido), la soldadura puede absorber más de 0.0024% de hidrogeno y cuando la temperatura alcanza los 1426 Grados Centígrados (2600 F) cuando llega al punto austenítico, la solubilidad del hidrogeno es alrededor de 0.001%. Cuando la estructura es ferrítica a 871 Grados Centígrados (1600 F) la solubilidad del hidrogeno cae a cerca de 0.00025% y a una temperatura normal de 22 grados Centígrados (70 F) es de alrededor de 0.0002%. Como el contenido de los depósitos de electrodos estándar va desde 0.0001% hasta 0.002%, hay un riesgo significativo de generar suficiente nivel de hidrogeno para sobresaturar la soldadura fundida, el operador debe reducir al mínimo el hidrogeno presente en la capa de fundente de los electrodos si desea soldaduras de calidad.

Cuando la temperatura de la soldadura es elevada al punto crítico (el punto de temperatura donde ocurre la transformación de una fase metalúrgica a la otra) y se convierte en austenítico completamente, si enfriado lentamente se convierte en una estructura martensítica quebradiza. Enfriado rápidamente, el austenítico no se convierte en martensítico rígido.

Cuando el austenítico cambia muy lentamente a martensítico desde una temperatura de 205 Grados centígrados (400 F) a temperatura ambiente se genera una transformación retardada, el metal se micro agrieta y fisura, si a esto se suman las tensiones, las grietas podrían agravarse siendo fácilmente detectables, el defecto puede aparecer en la soldadura en las áreas de transición o en el mismo metal base, dependiendo de cómo se halla movido el hidrógeno o las condiciones en las que fue atrapado.

No está claramente establecido de que la causa pura de la aparición de porosidad en la soldadura sea el hidrógeno, pero si se sabe que influye en la cantidad de porosidad concentrada. Prevenir las quebraduras por hidrógeno es crítico, detectar un defecto es difícil y frecuentemente es encontrado después que la soldadura es ya puesta en servicio, al igual que el cáncer crece y empeora con el tiempo. Los aceros de alta resistencia dependen de cuan alta es la cantidad de carbón que contienen o sus bajas propiedades de transformación al martensítico, esto demanda una vigilancia muy cuidadosa a las posibilidades de que la soldadura absorba hidrógeno durante el proceso ya que esto afecta su composición química.

Tabla 2.1: Guía para la estabilización de fundentes

Guía para la estabilización de fundentes			
Especificación AWS	Almacenados en aire acondicionado antes de abrir RH=humedad relativa	En el horno despues de abiertos	Despues de una exposición a la humedad por suficiente tiempo para afectar la calidad de la soldadura
Celulosa EXX10 EXX11 EXX20	21-49°C 50% Max RH	38-49°C	No recomendado
Titaniia (Rutílicos) EXX12 EXX13 EXX14	21-49°C 50% Max RH	38-49°C	121-149°C 1 hora
Polvo de hierro M.S EXX24 EXX27	21-49°C 50% Max RH	38-49°C	204-260°C 1/2 hora
Polvo de hierro Bajo hidrogeno EXX18 EXX28 Bajo hidrógeno EXX15 EXX16 Bajo hidrógeno alta resistencia EXXX15 EXXX16 EXXX18	21-49°C 50% Max RH	121-149°C	343-399 °C
Inoxidables EXXX-15 EXXX-16	4.5-49°C 60% (+/-10) Mx RH	122-149°C	260-346 1 Hora
IncoNnel Monel Nickel De endurecimiento	4.5-49°C 60% (+/-10) Mx RH	63-93°C	No recomendado
Latón Bronze	4.5-49°C 60% (+/-10) Mx RH	63-93°C	No recomendado
Fundentes Granulados o aglomerados	4.5-49°C 60% (+/-10) Mx RH	38-93°C	Sólo bajo instrucciones del fabricante
Alambres tubulares EXXT-1 EXXT-2 EXXT-5 EXXT-G	4.5-49°C 60% (+/-10) Mx RH	122-149°C	Sólo bajo instrucciones del fabricante

2.8 Soldabilidad de las calidades de aceros

Un dato relevante en los tipos de aceros que se usan para los aceros de refuerzo es la cantidad de carbono equivalente que poseen, tal como se indicó en el punto 1.3 de esta memoria. A continuación se muestra la composición química de las barras usadas para realizar las probetas soldadas y sin soldar.

Tabla 2.2: Composición química de barra A630-420H, de 8 mm

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Sn	Mo	V	Nb	N1	CE
0,42	0,816	0,012	0,039	0,153	0,392	0,121	0,069	0,031	0,021	0,002	0,002	0,0123	0,56

Tabla 2.3: Composición química de barra A630-420H, de 10 mm

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Sn	Mo	V	Nb	N1	CE
0,396	0,783	0,013	0,028	0,152	0,351	0,143	0,111	0,035	0,031	0,002	0,002	0,0089	0,53

Tabla 2.4: Composición química de barra A630-420H, de 12 mm

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Sn	Mo	V	Nb	N1	CE (1)
0,388	0,741	0,013	0,025	0,17	0,37	0,1	0,071	0,024	0,018	0,001	0,001	0,0112	0,51

Tabla 2.5: composición química de barra A440-280H, de 8 mm

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Sn	Mo	V	Nb	N1	CE (1)
0,199	0,536	0,009	0,04	0,155	0,466	0,111	0,05	0,028	0,028	0,001	0,001	0,062	0,29

Tabla 2.6: composición química de barra A440-280H, de 10 mm

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Sn	Mo	V	Nb	N1	CE (1)
0,115	0,553	0,016	0,036	0,119	0,443	0,098	0,08	0,028	0,015	0,002	0,002	0,0111	0,21

Tabla 2.7: composición química de barra A440-280H, de 12 mm

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Sn	Mo	V	Nb	N1	CE (1)
0,122	0,556	0,012	0,033	0,207	0,383	0,097	0,071	0,052	0,022	0,001	0,001	0,0101	0,21

2.8.1 Calidad A440-280H

Por el contenido de carbono y el carbono equivalente de este acero, y desde el punto de vista de la soldabilidad, puede ser clasificado como un acero soldable pero bajo ciertas condiciones, esto es que pueden soldarse con resultados aceptables mediante métodos especiales, o bien, con los métodos usuales tomando algunas precauciones de seguridad.

El contenido de fósforo de este acero alcanza un 0.016% y está dentro del rango recomendado el cual debe ser menor al 0,1%; ocurriendo lo mismo con el azufre, que está incluido en una proporción menor que la recomendada (también 0,1%). Por lo recién expuesto, no debería producirse un problema grave en la soldabilidad por causa de estas impurezas.

Siendo el contenido de Manganeso bastante superior que el del Silicio, se puede deducir que los efectos perjudiciales en la soldadura ocasionados por este último serán anulados por el Manganeso (punto 2.6.2 y 2.6.3). Por otra parte, el efecto del Manganeso sobre la soldabilidad es aproximadamente cuatro veces menor que el del Carbono, lo que se refleja en la expresión para el cálculo del Carbono equivalente como índice de soldabilidad. Un aumento de Manganeso produce un aumento de la dureza sin bajar considerablemente la soldabilidad.

Generalmente, al soldar un acero con un contenido de carbono aproximado de 0,4%, no se endurece demasiado procurando no calentarlo ni enfriarlo rápidamente, con objeto de evitar grietas, poros, u otros perjuicios ocasionados por el proceso de soldadura.

Cuando un acero con 0,4% de carbono (como el acero en estudio) se enfría rápidamente, se transforma a 204° C en una estructura de martensita, que es el contenido más duro obtenido del acero al carbón. Esta zona endurecida en general es indeseable porque conserva tensiones residuales y, en consecuencia, agrietamientos.

2.8.2 Calidad A630-420H

Este es un acero de alto contenido de carbono y por consiguiente poco soldable. Las dificultades que se pueden presentar al soldar un acero con más del 0.45% de carbono se ilustran a continuación, no siendo demasiado serias si el acero contiene una poción de carbono ligeramente superior a 0.45%, pero su importancia aumentará al subir el contenido de carbono.

- Agrietamiento en el metal de soldadura, pudiendo ser las grietas transversales o longitudinales (más frecuentes estas últimas); en algunas ocasiones son interiores no notándose a simple vista.
- Porosidad en el metal fundido
- Excesivo endurecimiento en el metal base
- Agrietamiento en el metal base, tanto debajo de la zona de fusiones como radiales, extendidas adentro del metal base.

Como en el caso anterior, el elemento decisivo para determinar la soldabilidad de este tipo de acero es el carbono; ya que otros elementos (Manganeso, Silicio, Fósforo y Azufre) se encuentran en proporciones que, aunque influyen en la soldabilidad, no tienen la importancia del carbono.

Con frecuencia se presentan en la soldadura porosidades finas, que se distribuyen a lo largo de la misma y que no son visibles a simple vista, haciéndose difícil la soldadura del acero de alto Carbono. Dicha porosidad se debe a la tendencia de estos aceros a absorber tanto el carbono como el monóxido de carbono, gases que son solubles en los cristales del metal y que son despedidos al solidificarse el mismo, situación ésta que aumenta las dificultades con la presencia de azufre, fósforo o silicio, que se combinan con los gases. En tales condiciones, lo indicado es soldar lentamente para que los gases sean expulsados antes de la solidificación de la superficie.

3 RECOMENDACIONES DE LA NORMA AWS (AMERICAN WELDING SOCIETY) PARA SOLDADURAS⁴

3.1 Esfuerzo en la soldadura

La tensión admisible a tracción o compresión en los empalmes a tope directo con juntas de penetración completos y soldaduras acanaladas en V, deberá ser el mismo que la tensión admisible correspondiente al metal base, bajo la condición de que el metal de aporte usado tenga una resistencia a la tracción que a lo menos sea igual a la del material que se está soldando.

En soldaduras con cordones longitudinales, el esfuerzo admisible en la sección transversal del filete deberá estar de acuerdo con la Tabla 3.1.

⁴ Este capítulo es un resumen de la norma AWS. D1.4-2005 y tiene un enfoque hacia lo que es necesario de conocer para determinar las variables en los ensayos de esta memoria.

Tabla 3.1 Tensiones permitidas en soldaduras (extracto tabla 2.1 AWS D1.4-98)

Tipo de soldadura	Tipo de esfuerzo en la soldadura		Tensiones admisibles	Resistencia requerida del metal de aporte
Junta de penetración completa Soldadura de ranura	Tracción normal al área efectiva		Igual que en el metal base	Se deberá utilizar un metal de aporte adecuado, según lo indicado en la Tabla 3.3.
	Compresión normal al área efectiva		Igual que en el metal base	Se deberá utilizar un metal de aporte con un nivel de resistencia igual o una clasificación (10 ksi [70 Mpa]) menor
	Corte en el área efectiva		0,30 x Resistencia nominal a la tracción del metal de aporte, exceptuando el esfuerzo de corte en el metal base el cual no debe exceder 0,40 x tensión de fluencia del metal base	Se puede utilizar un metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor al metal de aporte seleccionado
Con garganta de medio bisel o con bisel en V Soldadura de ranura	Compresión normal al área efectiva	Unión no diseñada al aplastamiento	0,5 X Resistencia nominal a tracción del metal de aporte, exceptuando esfuerzos en el metal base los cuales no deben exceder 0,60 x tensión de fluencia del metal base	Se puede utilizar un metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor al metal de aporte seleccionado
		Unión diseñada al aplastamiento	Igual que en el metal base	
	Corte en el área efectiva		0,30 x Resistencia nominal a la tracción del metal de aporte, exceptuando el esfuerzo de corte en el metal base el cual no debe exceder 0,40 x tensión de fluencia del metal base	
	Tracción normal al área efectiva		0,30 x Resistencia nominal a la tracción del metal de aporte, exceptuando el esfuerzo de corte en el metal base el cual no debe exceder 0,60 x tensión de fluencia del metal base	
Soldadura de filete	Corte en el área efectiva		0,30 x Resistencia nominal a la tracción del metal de aporte	Se puede utilizar un metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor al metal de aporte seleccionado

^a Para la definición del área neta efectiva ver el punto 3.4

^b Para la fatiga o cargas dinámicas consúltese los códigos actuales de construcción o especificaciones para valores admisibles de cargas

^c El ingeniero debe tener precaución con la resistencia de los alambres soldados en frío, puesto que esta puede reducirse al soldar

^d Para la selección del metal de aporte, véase la Tabla 3.3.

3.2 Áreas, longitudes y espesores efectivos en la soldadura

3.2.1 Empalme a tope directo y soldaduras biseladas

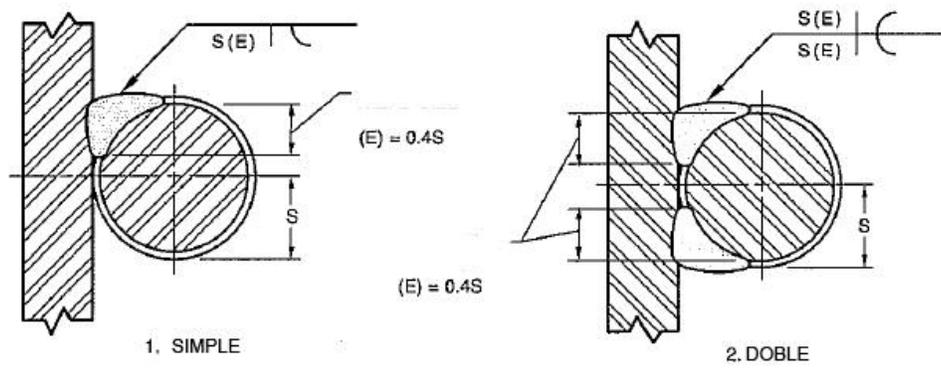
El área transversal efectiva de la soldadura será igual a la sección transversal efectiva de las barras a ser empalmadas. Si las barras a unir son de tamaños diferentes, el área efectiva de la soldadura deberá ser igual a la sección transversal nominal de la menor de las barras.

3.2.2 Soldadura con cordones longitudinales

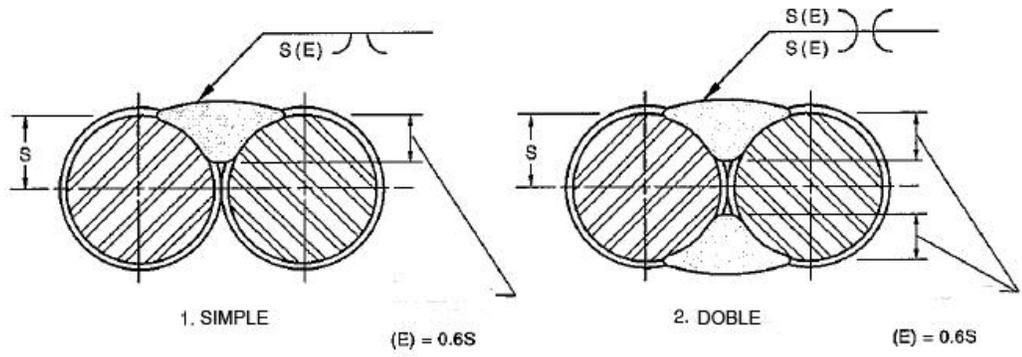
El área efectiva de la soldadura deberá ser igual a la longitud del cordón multiplicada por el espesor efectivo de la garganta del filete de soldadura (véase Figura 3.1)

El largo mínimo del cordón de soldadura no debe ser menor que dos veces el diámetro de la barra, o dos veces el diámetro de la barra más pequeña si el empalme se realiza entre barras de distinto diámetro.

El espesor de la garganta del filete de soldadura no debe ser menor que dos veces el diámetro de la barra, y cuando se unan dos barras de distinto diámetro, esta dimensión deberá ser dos veces el diámetro de la barra más pequeña.



(A) GARGANTA EN MEDIO BISEL



(B) GARGANTA CON BISEL EN V

Notas:
 1. S=Radio de la barra de refuerzo

Figura 3.1: Ancho efectivo para soldaduras de ranura

3.3 Detalles estructurales

3.3.1 Excentricidad

Cuando se usa un empalme a solapo (Figura 3.4) o un empalme a tope indirecto (Figura 3.3), el hormigón que rodea al empalme deberá ser lo suficientemente colaborante para prevenir fisuras causadas por la tendencia de la junta a deformarse debido a la excentricidad de la carga.

3.3.2 Tipos de empalmes permitidos

Las armaduras pueden ser unidas mediante empalme a tope directo (Figura 3.2), empalme a tope indirecto (Figura 3.3) o empalme soldado a solapo (Figura 3.4); sin embargo; la práctica ha demostrado que es preferible usar empalme a tope directo, excepto para barras número 6 (19 mm) y menores.

3.3.3 Empalmes a tope directo

Se define un empalme a tope directo como la unión entre dos barras cuyos ejes son aproximadamente colineales, realizándose la unión con una completa penetración y fusión de la soldadura en la garganta por ambos lados o por un solo lado.

Los empalmes a tope directo se realizarán preferentemente con borde en “V” simple o doble “V” que forme ángulos entre 45 y 60 grados.

3.3.4 Empalmes a tope indirecto

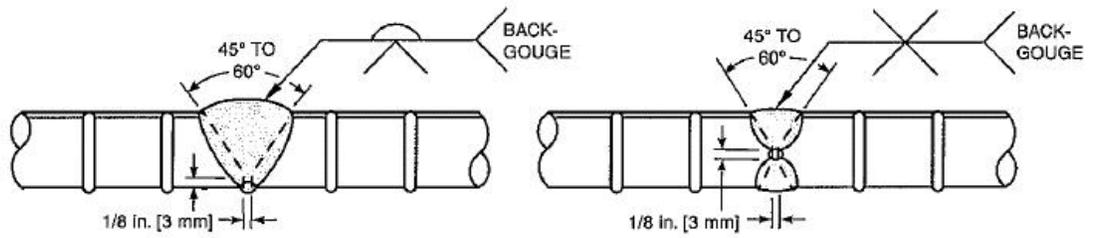
Se define un empalme a tope indirecto como la unión entre dos barras cuyos ejes son aproximadamente colineales, y soldadas con cordones longitudinales a un miembro de empalme común que pueden ser: platinas, ángulos, barras u otro perfil aprobado por un experto.

Los miembros de empalme usados deberán tener un área transversal capaz de entregar a lo menos igual resistencia que las barras a empalmar.

3.3.5 Empalmes a solapo

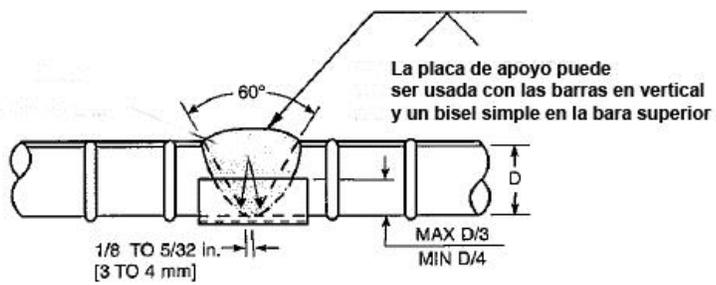
Se define un empalme a solapo en forma directa (Figura 3.4 a), como la unión entre dos barras cuyos ejes son aproximadamente paralelos y aproximadamente en el mismo plano, estando las barras en contacto y soldadas por cordones longitudinales. A menos que la junta sea accesible por un solo lado, es preferible realizar la soldadura por ambos lados.

Se define un empalme soldado en forma indirecta (Figura 3.4 b) como la unión entre dos barras cuyos ejes son aproximadamente paralelos y aproximadamente en el mismo plano, pero que se sueldan separadamente a una platina de empalme común mediante cordones longitudinales.

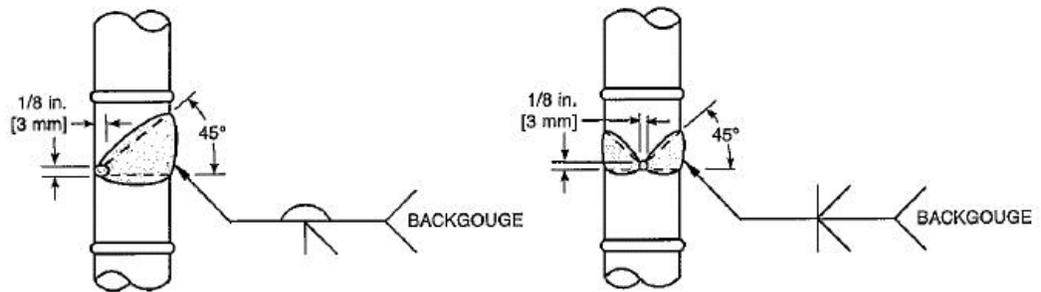


(A) SOLDADURA CON BORDES EN V

(B) SOLDADURA CON BORDES EN X



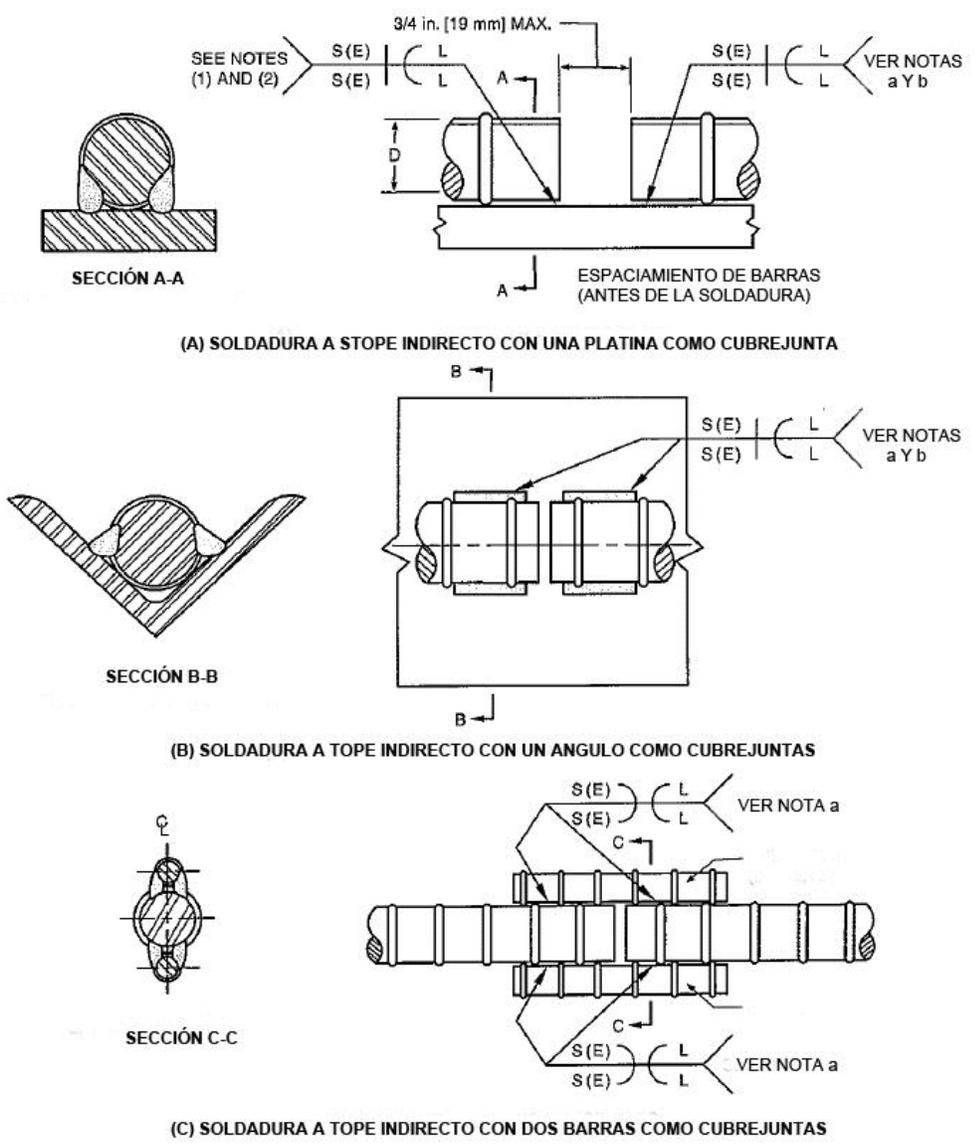
(C) SOLDADURA CON BORDES EN V CON PLACA DE APOYO



(D) SOLDADURA CON BISEL SIMPLE

(E) SOLDADURA CON BISEL DOBLE

Figura 3.2 : Soldadura a tope directo



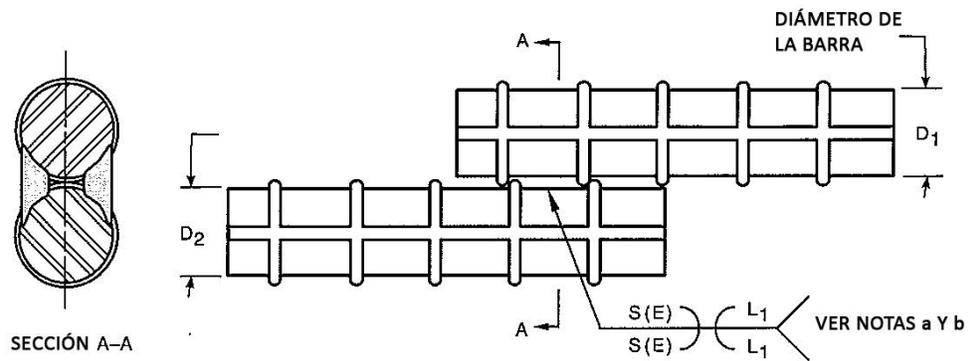
a $L=2D$ (min)

b Se permite la variación de esta soldadura utilizando una soldadura de bisel simple en V, siempre y cuando sea considerada la excentricidad o las restricciones del diseño de la unión.

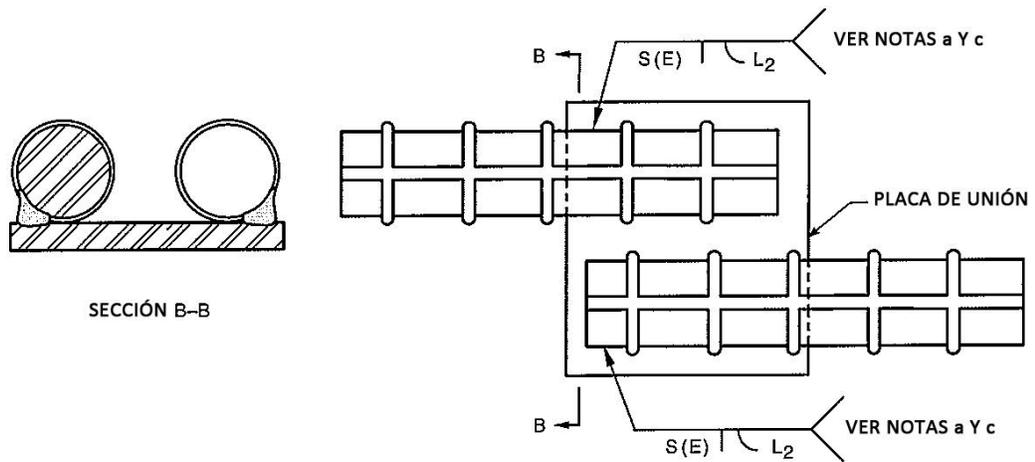
Notas:

1. Espacio entre las barras y la platina podrían variar dependiendo de la magnitud de las deformaciones
2. Las deformaciones mostradas en las vistas son solo ilustrativos.

Figura 3.3: Soldadura a tope indirecta



(A) SOLAPO INDIRECTO CON BARRAS EN CONTACTO



(B) SOLAPO INDIRECTO CON BARRAS SEPARADAS

^a Los efectos de la excentricidad deben ser considerados o restringidos según el diseño de la unión.

^b $L_1 = 2 D_1$ (min); $D_1 \leq D_2$.

^c $L_2 = 2 \times$ diámetro de la barra (min).

Nota: Los espacios entre las barras y la placa pueen variar dependiendo la magnitud de las deformaciones.

Figura 3.4: Soldadura de solapo

3.4 Temperatura de precalentamiento y temperatura de interpasada

La temperatura de precalentamiento y la temperatura de interpasada⁵ que deben poseer las barras en el proceso de soldadura dependen del carbono equivalente que estas tengan y de su diámetro. La tabla siguiente describe ambas temperaturas en función de las variables recién mencionadas.

Tabla 3.2: Temperatura de precalentamiento y de interpasada

Carbono equivalente (CE)	Tamaño de la barra	Temp. mínima de precalentamiento y temp. de interpasada
[%]	[mm]	[°C]
C,E < 0,40	Hasta N°11 (36 mm)	Ninguna*
	14 a 18 (43 a 57 mm)	10
0,41 < C.E < 0,45	Hasta N°11 (36 mm)	Ninguna*
	14 a 18 (43 a 57 mm)	40
0,45 < C.E < 0,55	Hasta N°6 (19 mm)	Ninguna*
	7 a 11 (22 a 36 mm)	10
	14 a 18 (43 a 57 mm)	90
0.55 < C.E < 0.65	Hasta N°6 (19 mm)	40
	7 a 11 (22 a 36 mm)	90
	14 a 18 (43 a 57 mm)	150
0.65 < C.E < 0.75	Hasta N°6 (19 mm)	150
	7 a 18 (22 a 57 mm)	200
C.E > 0.75	7 a 18 (22 a 57 mm)	260

(*): Cuando la temperatura del metal base sea inferior a 0°C, se debe precalentar hasta por lo menos 21°C y mantener esta temperatura mínima durante la soldadura.

⁵ La temperatura de interpasada es la temperatura que tiene la barra cuando se ha depositado un cordón de soldadura (en u proceso de soldadura con varias capas), antes que el siguiente sea depositado.

3.5 Requerimientos para el metal de aporte

Para los empalmes a tope directo, el electrodo a usar deberá estar de acuerdo con la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Requerimientos del metal de aporte (extracto norma AWS D1.4-2005)

Selección del acero de aporte (electrodo)												
Especificaciones del acero a soldar				Especificaciones del metal de aporte								
				Mínimo punto de fluencia		Mínimo punto de tensión última		Especificación de los electrodos		Mínimo punto de fluencia		Mínimo punto de tensión última
ksi		MPa		ksi		MPa				ksi		MPa
I	ASTM A615	Grade 40	40	—	70	—	SMAW AWS A5.1 and A5.5					
			—	300	—	500	E7015, E7016, E7018, E7028		53-72	365-496	70	482
	ASTM A615M	Grade 300	—	300	—	500	E7015-X, E7016-X, E7018-X		57-60	390-415	70-75	480-520
							GMAW AWS A5.18					
							ER70S-X, E70C-3, E70C-6		58	400	70	480
							FCAW AWS A5.20 and A5.29					
						E7XT-X		58	400	70	480	
						E7XTX-X		58	400	70-90	480-620	
						(Except -2, -3, -10, -13, -14, -GS)						
II	ASTM A706	Grade 60	60	—	80	—	SMAW AWS A5.5					
			—	420	—	550	E8015-X, E8016-X, E8018-X		67	460	80	550
	ASTM A706M	Grade 420	—	420	—	550	GMAW AWS A5.28					
							ER80S-X, E80C-X, E90C-X		68	470	80	550
							FCAW AWS A5.29					
							E8XTX-X		68	470	80-100	550-690
III	ASTM A615	Grade 60	60	—	90	—	SMAW AWS A5.5					
			—	420	—	600	E9015-X, E9016-X, E9018-X		77	530	90	620
	ASTM A615M	Grade 420	—	420	—	600	GMAW AWS A5.28					
							ER90S-X		78	540	90	620
							FCAW AWS A5.29					
							E9XTX-X		78	540	90-110	620-760
IV	ASTM A615	Grade 75 ^c	75	—	100	—	SMAW AWS A5.5					
			—	520	—	700	E10015-X, E10016-X, E10018-X		87	600	100	690
	ASTM A615M	Grade 520 ^d	—	520	—	700	E10018-M		88-100	610-690	100	690
							GMAW AWS A5.28					
							ER100S-X, E100C-X		88	610	100	690
							FCAW AWS A5.29					
						E10XTX-X		88	610	100-120	690-830	

a Se pueden utilizar aceros de aporte de los grupos B3, B3L, B4L, B5, B5L, B6, B6L, B7, B7L, B8, B8L, o B9 estipulados en AWS A5.5, A5.28, o A5.29 si son aprobados por el ingeniero.
b Esta tabla esta basada en las propiedades del acero de aporte soldado. Los valores entregados son los mínimos requeridos. Los valores que se muestran con un guiñon indican valores máximos y mínimos.
c Aplicable a barras del n°6 al n°18
d Aplicable a barras del n° 19 al n° 57.

3.6 Procedimiento de control

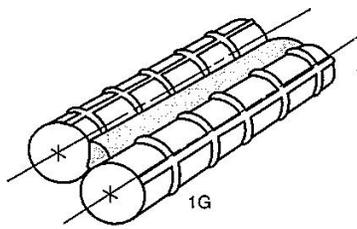
La calificación de los procedimientos de las uniones soldadas deberá quedar establecida para cada especificación y tipo de armadura a ser soldada. Para las barras con alto contenido de carbono se deberá realizar un proceso de calificación.

La persona experta responsable, a su criterio, puede aceptar evidencia de previa calificación del procedimiento de junta soldada a ser usado.

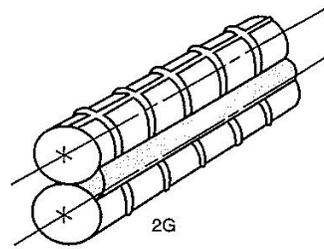
Para el proceso de soldadura al arco, los siguientes cambios serán considerados importantes:

- Un incremento en el diámetro del electrodo usado.
- Un cambio en la posición en la cual la soldadura es realizada.
- Un cambio superior al 10% de la especificación media de voltaje y amperaje del arco, para cada tamaño de electrodo usado.

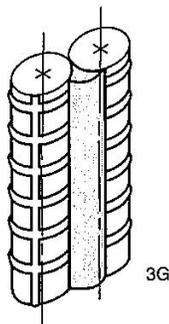
Todo empalme a tope directo deberá ser calificado de acuerdo con la posición para la cual el procedimiento será calificado.



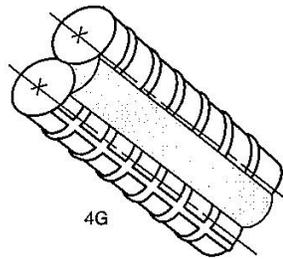
(A) POSICIÓN DE ENSAYO: ACOSTADA



(B) POSICIÓN DE ENSAYO : HORIZONTAL



(C) POSICIÓN DE ENSAYO : VERTICAL



(D) POSICIÓN DE ENSAYO: SUPERIOR

Figura 3.5: posición de la soldadura

3.7 Electrodo para soldadura al arco

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.

Los electrodos de bajo contenido de hidrógeno fabricados bajo las especificaciones de AWS A5.5, deberán adquirirse en envases herméticamente sellados o secarse durante una hora por lo menos a una temperatura entre 371°C y 427°C, antes de usarlos.

Inmediatamente después de sacar los electrodos del envase o del horno de secado, deberán almacenarse en hornos a una temperatura no menor de 120°C.

Los electrodos E70XX que no sean usados dentro de una hora y los electrodos E80XX que no sean usados dentro de una hora y media, deberán acometerse nuevamente al proceso de secado.

No deberán usarse electrodos que se hayan humedecido.

3.8 Calificación WPS

3.8.1 Tipos de ensayos y su propósito

A continuación se indican los ensayos tendientes a determinar la tensión y grado de penetración de las uniones soldadas realizadas bajo las especificaciones de esta norma.

1. Ensayo de tensión a sección completa. (para resistencia a tracción)
2. Ensayo de Macroataque (para determinar la penetración de la soldadura)

3.8.2 Preparación de probetas

3.8.2.1 Ensayo de resistencia

El tamaño y longitud de las probetas a realizar deben ser como siguen:

1. *Uniones a tope directo*: las probetas tienen una longitud de al menos de 16 veces el diámetro de la barra, con la soldadura colocada centralmente. Se buscará conservar esta medida salvo que sea necesaria una mayor.
2. *Uniones a tope indirecto*: La longitud de la soldadura debe ser tal que la capacidad de corte en ella sea al menos 0,6 veces la tensión nominal requerida.

3.8.2.2 Ensayo Macroataque

Las probetas para el ensayo de macroataque se preparan como sigue:

1. *Uniones a tope directo*: Los ensayos deben ser mecánicamente cortados en un punto transversal a la dirección de la soldadura. La probeta debe mostrar completamente la sección longitudinal, la raíz y cualquier refuerzo en la soldadura
2. *Uniones a tope indirecto*: Cada probeta debe ser cortada en una posición transversal a la dirección de la soldadura.

3.8.3 Metodología de ensayo

3.8.3.1 Ensayo de resistencia

La mínima distancia entre mordazas debe ser igual a lo siguiente:

1. Al menos ocho veces el diámetro de las barras para soldaduras a tope directo.
2. Al menos ocho veces el diámetro de la barra más la longitud de la conexión para uniones a tope indirecto.

Las probetas deben ser ensayadas hasta la rotura mediante tracción y se debe determinar la máxima carga obtenida.

3.8.3.2 Ensayo de Macroataque

Se pulen las superficies transversales obtenidas en el punto anterior y se les aplica una solución química capaz de entregar una clara visión de la soldadura.

3.8.4 Resultados requeridos en los ensayos

3.8.4.1 Ensayo de resistencia

La resistencia a la tracción no debe ser menor a un 125% de la tensión mínima de fluencia especificada para el tipo y calidad de las barras ensayadas, a menos que se indique lo contrario en las especificaciones.

3.8.4.2 Ensayo de Macroataque

Se debe examinar la muestra en busca de cualquier tipo de discontinuidad, además de analizar si hubo penetración completa de la soldadura en el metal base para las soldaduras de ranura en "V" o doble "V"

4 DEFINICIÓN DE VARIABLES EN ENSAYO DE BARRAS A TRACCIÓN

4.1 Descripción del problema

El objetivo de este ensayo consiste en evaluar el comportamiento de las barras de acero de refuerzo soldadas bajo cargas severas de carga axial de tracción. Para ello se ensayan cerca de 54 barras de acero A630-420H y 54 barras de acero A440-280H cuyo procedimiento experimental se detalla posteriormente a las cuales se les obtiene curvas esfuerzo-deformación hasta la ruptura de las barras.

En este capítulo se fijarán las variables que entran en el proceso de la soldadura al arco en los aceros tratados (ver punto 4.4), para posteriormente planificar una serie de ensayos finales.

4.2 Metodología de ensayo

En esta investigación se sueldan y ensayan un total de 24 barras de acero A630-420H y 18 barras de acero A440-280H repartidas tanto en barras soldadas y no soldadas, como también por tipo de técnica de soldadura, tal como se indica en la tabla mostrada a continuación.

En el anexo de esta memoria se encuentra un resumen con la identificación de cada barra utilizada, así como también el resultado obtenido al ensayarlo.

Tabla 4.1: Detalle utilización barras de refuerzo A440-280H

Detalle utilización barras de refuerzo					
Diámetro	Tipo de Acero	Técnica de soldadura	Unidades		
			Soldado	No soldado	Total
8 mm	A440-280H	Tope indirecto	3	3	6
	A630-420H	Tope indirecto	3	3	6
Total			6	6	12

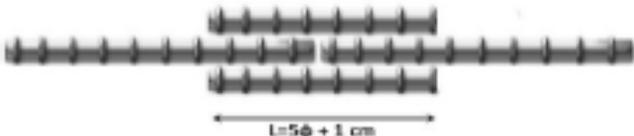
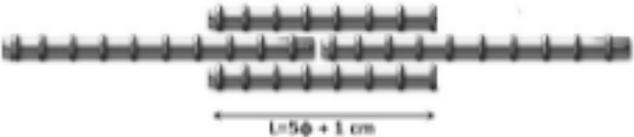
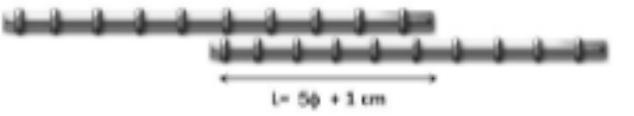
Diámetro	Tipo de Acero	Técnica de soldadura	Unidades		
			Soldado	No soldado	Total
10 mm	A440-280H	Tope indirecto	3	3	6
	A630-420H	Tope indirecto	3	3	6
	A630-420H	Solapo	3	3	6
Total			9	9	18

Diámetro	Tipo de Acero	Técnica de soldadura	Unidades		
			Soldado	No soldado	Total
12 mm	A440-280H	Tope indirecto	3	3	6
	A630-420H	Tope indirecto	3	3	6
Total			6	6	12

Las barras se sueldan en laboratorio por un soldador calificado. Los ensayos abarcaran un tipo de unión: el empalme a tope y el empalme a solapo, estos se llevan a cabo mediante una máquina de tipo Universal de 200 ton de capacidad.

Así mismo se utilizará la nomenclatura indicada en la Tabla 4.2 para identificar los distintos tipos de uniones y calidades y se le agregará un número dependiendo del diámetro de la barra. Un esquema completo de la forma de tabulación de los ensayos puede encontrarse en el anexo A.2.5.

Tabla 4.2: Nomenclatura utilizada para los distintos tipos de probetas

Tipo de Probeta		Esquema
A		
Cantidad	9	
Acero	A440-280H	
B		
Cantidad	9	
Acero	A630-420H	
C		
Cantidad	3	
Acero	A630-420H	
D		
Cantidad	9	
Acero	A440-280H	
E		
Cantidad	6	
Acero	A630-420H	
F		
Cantidad	2	
Acero	A630-420H	

4.3 Técnica de soldadura

4.3.1 Soldaduras a tope

Soldaduras a tope directo

Las barras se sitúan perfectamente alineadas y se procede al depósito de los cordones en la secuencia indicada en la Figura 3.2 . En términos simples, lo anterior consiste en una preparación previa de los biseles a 60° aproximadamente a sierra y refrentado con un disco desbastador y/o esmeril.

La barras se sitúan de forma completamente colineal y se procede al depósito de los cordones en la secuencia indicada en la Figura 4.1. Entre cada paso es necesario esperar un periodo de tiempo para que enfríe el material depositado, con el fin de no originar un calentamiento excesivo que pudiera producir pérdida de resistencia en la unión. Este periodo de tiempo se usa para escorificar el cordón depositado y realizar las soldaduras de otras barras.

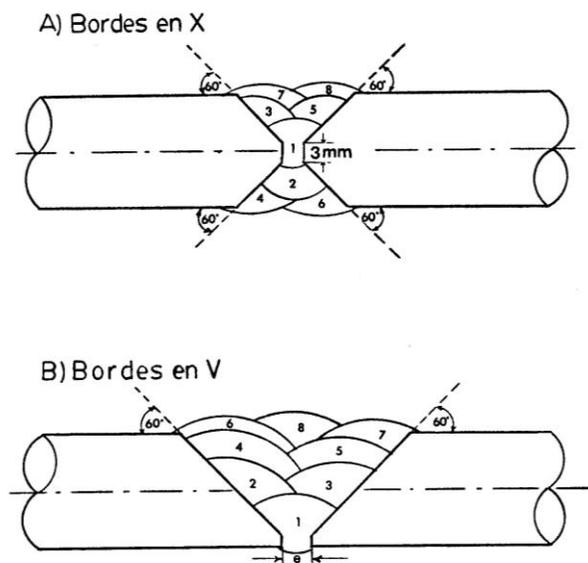


Figura 4.1: Soldadura a tope directo

Notas:

- La separación entre barras “e” debe ser aproximadamente igual al diámetro del electrodo que se está usando.
- La secuencia de la soldadura es la que se indica en las figuras.
- El ancho de los cordones no debe ser superior a tres veces el diámetro del electrodo en uso; por este motivo, cuando se sueldan barras de diámetros grandes es necesario aplicar muchos cordones de soldadura para completar el relleno (aplicando un solo cordón por capa)
- El método de soldadura a tope no es aplicable en barras de diámetros pequeños, por la excesiva concentración de calor que se produce en la unión y también por problemas de ejecución.
- El sobreespesor del relleno de soldadura puede llegar al 10 o 20% del diámetro de la barra.

Finalmente no se utiliza este tipo unión de barras y se opta debido a su mejor comportamiento para barras de diámetros menores por soldaduras a tope indirecto, esto se basa en recomendaciones indicadas en distintos manuales de hormigón armado (Jimenez Montoya, y otros, 2000), donde se indica que no debe utilizarse con diámetros menores a 20 mm.

Soldaduras a tope indirecto

Se realiza utilizando dos barras auxiliares del mismo diámetro y tipo que la barra principal, tal como se indica en la Figura 4.2 y según las indicaciones de 3.3.5.

El largo de las barras auxiliares se deduce del planteamiento indicado en punto siguiente sobre barras a solapo.

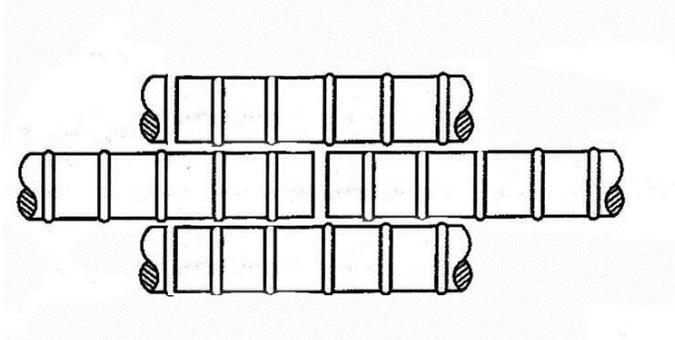


Figura 4.2: Soldadura a tope indirecto

4.3.2 Soldadura a solapo

El método consiste en la unión entre barras, o entre ellas y su respectivo elemento de unión mediante filetes de soldadura, como se indica en la Figura 4.2.

La longitud del cordón de soldadura depende de las características mecánicas de la barra y del electrodo. Para determinar la longitud se impone la condición de que la probeta soldada alcance un 100% de la resistencia a tracción de la barra, confiando la transmisión del esfuerzo al cordón.

El procedimiento de empalme por solapo no debe emplearse con diámetros muy gruesos mayores de 25 mm (Jimenez Montoya, y otros, 2000).

De acuerdo con lo anterior, la longitud del cordón de soldadura se obtiene a partir de las siguientes condiciones:

- Resistencia al corte del cordón de soldadura: $0,65 \cdot a \cdot L \cdot \sigma_{el}$
- Resistencia a tracción de la barra: $A \cdot \sigma_{barra}$

Dónde:

L: longitud total del cordón

a: espesor del cordón de soldadura; se adopta un valor fijo de $0,2\Phi$, siendo Φ el diámetro de la barra correspondiente.

A: área de la sección transversal de la barra.

σ_{el} : resistencia a la tracción del electrodo

σ_{barra} : tensión de rotura de la barra.

La resistencia al corte del cordón depositado se considerará del 65 % de la resistencia a tracción del electrodo correspondiente.

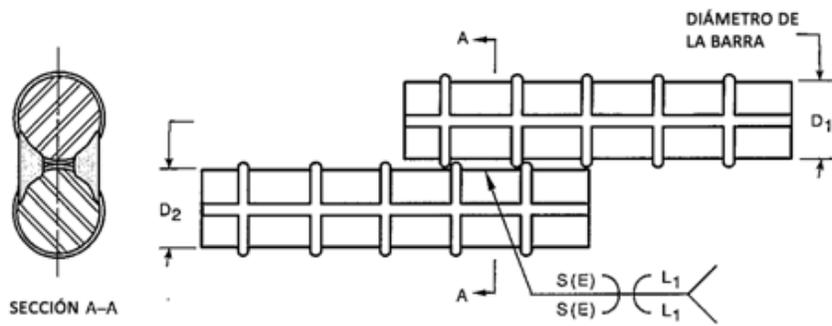
Tomando un coeficiente de seguridad de 1,5 y estableciendo la igualdad entre la resistencia a la tracción de la barra y la resistencia al corte del electrodo, se obtiene la siguiente fórmula:

$$L = 9.07 \cdot \frac{\sigma_{barra}}{\sigma_{el}} \cdot \Phi$$

Para esta memoria se utiliza un valor de $L = 10 \cdot \Phi$, en virtud de lo recomendado por normativa Europea y respaldado por el Comité Europeo del Hormigón, y que muestra la utilización de esta medida en diferentes casos, tal como se muestra en la Figura 4.4.

En este ensayo se realizarán soldaduras de solapo con barras traslapadas, para la cual se deben ubicar una junto a la otra con sus ejes longitudinales lo más paralelamente posible y traslapadas con una longitud igual a la mitad que la calculada por la fórmula anterior.

Posteriormente se deposita la longitud del cordón en dos mitades (una a cada lado) y en sentido contrario, esperando un periodo de tiempo adecuado entre ambos para evitar excesiva transmisión de calor.



SOLAPO INDIRECTO CON BARRAS EN CONTACTO

Figura 4.3: Solapo con barras en contacto

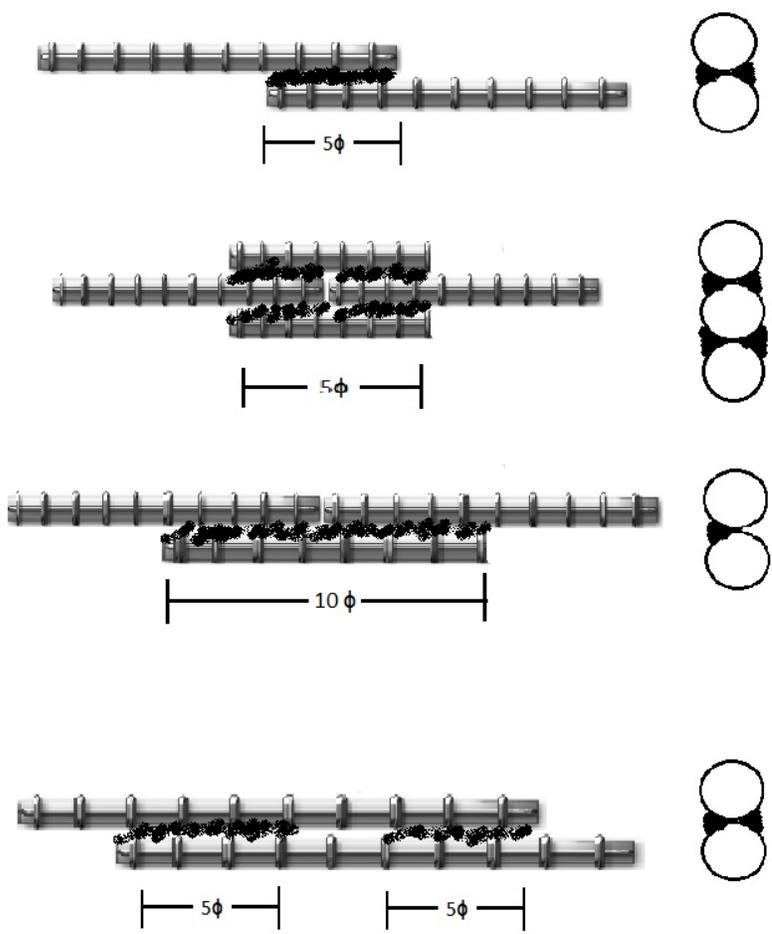


Figura 4.4: Empalmes soldados por solapo.

4.4 Determinación de variables involucradas en el proceso de soldadura

De modo de poder cumplir lo indicado en la normativa AWS D1.4 y la normativa AWS D1.1 y con ello lograr “calificar” la soldadura realizada, se deben determinar una serie de parámetros, los cuales inciden directamente en el resultado final logrado. Estos parámetros son los siguientes:

- Proceso de soldadura
- Posición de la soldadura
- Electrodo a usar
- Amperaje, voltaje y velocidad de avance
- Temperatura de precalentamiento e interpasada
- Forma de colocación de la soldadura
- Espesor requerido de la soldadura

4.4.1 Proceso de soldadura

Como se ha indicado en capítulos anteriores este será soldadura al arco, también conocida como SMAW.

4.4.2 Posición de la soldadura

La posición de la soldadura se determina según la Figura 3.5 ,en este caso para la soldadura a tracción se utiliza la posición 3G, simplemente porque la máquina tracciona en forma vertical.

4.4.3 Electrodo a usar

En el punto 2.4 de esta memoria se mencionaron los electrodos de bajo contenido de hidrógeno como los más adecuados para la soldadura de las armaduras. De este grupo de electrodos es necesario seleccionar aquellos que producen las mejores soldaduras en los aceros estudiados.

Un importante parámetro al momento de elegir un electrodo, es la resistencia a la tracción del metal base y del material de aporte; considerando esto, la resistencia a la tracción de las armaduras debe ser menor que la ofrecida por el material depositado.

Para el acero de calidad A440-280H se deben emplear electrodos cuya resistencia a la tracción sea superior a los $4400 \frac{kg}{cm^2}$ que resisten estas armaduras. Los electrodos de menor resistencia mecánica que cumplen estos requisitos son el E7016 y el E7018.

Del mismo modo, los electrodos aplicables para la soldadura del acero A630-420H son el E8018, E9018, el E10018 o el E11018.

Estos electrodos mencionados para soldar las armaduras en estudio se encuentran contenidos en la Tabla 3.3 que es un extracto de las recomendaciones de la AWS.

Se elige finalmente un electrodo E8018-C1 para las barras de acero A630-420H y un electrodo E7018 para el acero A440-280H. Esto se hace puesto que son los electrodos más económicos que cumplen con las condiciones de resistencia mecánica necesaria, además el electrodo E8018-C1, tiene una proporción elevada de níquel, componente que ayuda a “absorber” un poco el alto contenido de carbono del acero A630-420H, mejorando sus condiciones de ductilidad.

En la elección del diámetro del electrodo se debe hacer mediante una prueba de penetración en las barras, para lo cual se realizan probetas de cada diámetro a realizar

y para cada tipo de acero. Luego se selecciona el diámetro de electrodo que mejor penetre en la unión de las barras.

Asimismo por recomendaciones tanto fabricante (Indura) como de Iidem, en la raíz de las barras se les coloca un electrodo E6010 de modo de conseguir una mejor resistencia y ductilidad en este punto más susceptible de fallar. Esto se logra mediante las propiedades sobresalientes de resistencia mecánica y ductilidad de este electrodo (véase ficha en el anexo), lo cual se explica por la buena penetración en la raíz de la unión de las barras producto del diámetro pequeño seleccionado (2,4 mm) y al ser un electrodo positivo, que provoca un filete angosto y profundo.

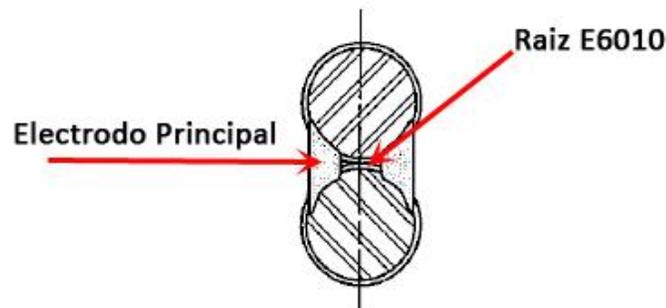


Figura 4.5: Ubicación de la raíz de la soldadura

Además de lo anterior se debe seleccionar el diámetro a utilizar para el caso de los electrodos de relleno. Para ello se utilizan probetas de prueba para evaluar entre un diámetro de $3/32''$ (2,4 mm) y $1/8''$ (3,2 mm) cual posee un mejor comportamiento y facilidad de uso para el soldador, así como también cual utiliza menor material para cumplir la normativa.

4.4.4 Amperaje, voltaje y velocidad de avance

Estas variables son fundamentales para calibrar los equipos de soldadura utilizados, siendo variables dependiendo el tipo de diámetro de las barras y el tipo de acero. Para poder determinar estas variables se deben realizar ensayos previos y analizar las más adecuadas para el propósito.

4.4.5 Temperatura de precalentamiento y de interpasada

Las temperaturas de precalentamiento y de interpasada que se aplicarían a las barras que así lo requirieran aparecen en la Tabla 3.2.

La temperatura de precalentamiento se logra mediante el uso de un soplete con gas oxiacetilénico, y se controló con tizas térmicas para mantenerla durante la operación.

De modo de evitar una disminución brusca en la unión al enfriarse rápidamente la juntura producto de la baja temperatura del ambiente (lo cual produce una unión frágil que compromete la ductilidad esperada en esta unión) se coloca luego de soldada la probeta en un tiesto con cuarzo.

El proceso de soldadura a solapo es bastante más rápido que el que se realiza en el caso de la soldadura a tope, ya que normalmente se depositan 2 o 4 filetes de soldadura (según sea el caso) en una sola capa.

También en este tipo de empalmes se realizó un trabajo en serie, aprovechando el tiempo en que se realizaba la soldadura para escorificar las probetas recién soldadas y esperar que se alcanzara la temperatura de interpasada.

4.5 Forma de colocación de la soldadura

Según las recomendaciones indicadas por el fabricante del electrodo (Indura), la colocación de las soldaduras de bajo hidrógeno (E7018, E8018) se realiza como sigue:

El arco debe mantenerse lo más corto posible en todo momento, pudiendo usarse una oscilación muy suave para controlar la forma y ancho del cordón. En soldadura plana no debe oscilarse más de 2,5 veces el diámetro del electrodo.

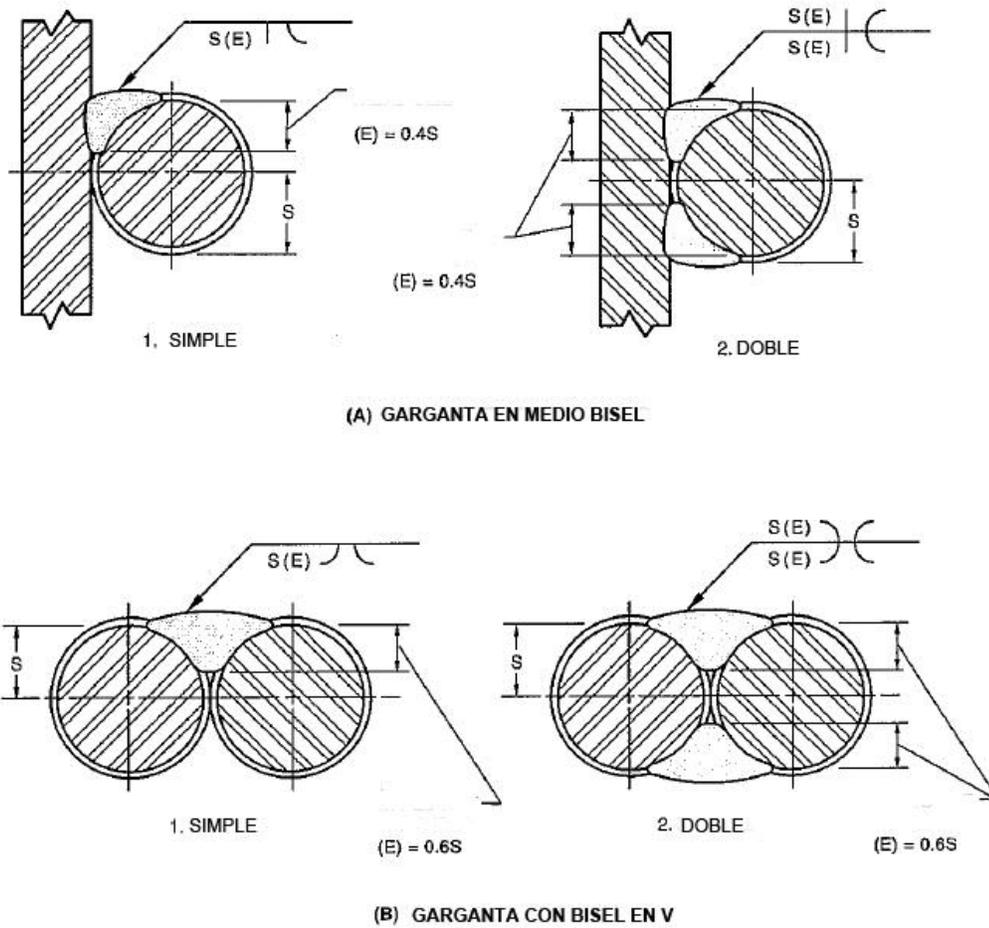
El cordón de raíz debe hacerse ascendente, con un arco corto y muy poco movimiento en sentido de avance. El electrodo no debe ser movido bruscamente hacia arriba y por ningún motivo alargar el arco. Es preferible para este cordón usar un movimiento en forma de "V". El electrodo se mantiene un instante en el vértice de la "V" para lograr penetración y remoción de escoria. El largo de la "V" no debe ser mayor de 3,2 mm. El segundo cordón y los sucesivos pueden hacerse con un movimiento oscilatorio de lado a lado, deteniéndose en los costados para permitir que la escoria atrapada en el primer cordón pueda salir a la superficie.

4.6 Espesor requerido de la soldadura

De modo de cumplir lo indicado en la norma AWS D1.4, sobre el ancho efectivo requerido de la soldadura, y que se encuentra estipulado en la Figura 3.1 y en la Figura 4.1, donde el término S, se refiere al radio del diámetro de la barra. Así se tienen los valores indicados en la Tabla 4.3 para el espesor de la soldadura según el tipo de diámetro de la barra.

Tabla 4.3: Espesores efectivos requeridos

Diámetro [mm]	$0,6 \cdot S$ [mm]
8	2,4
10	3
12	3,6



Notas:

1. S =Radio de la barra de refuerzo

Figura 4.6: Ancho efectivo requerido para la soldadura

4.7 Especificaciones para ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se realizan de acuerdo a las normas chilenas Nch204 Of. 2006 y la NCh200 Of.72.

4.8 Ensayos de las probetas soldadas

Se realizaron los ensayos de tracción en el laboratorio del IDIEM de la Universidad de Chile, de acuerdo a lo indicado en la norma NCh200.Of 72 y NCh204.Of 2006.

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina de ensaye universal, provisto de dos mordazas dentadas antideslizantes de plano inclinado (del tipo universal) , dispositivos reguladores de la velocidad de la carga y de un mecanismo para trazar gráficos carga-deformación (véase Figura 4.7).



Figura 4.7: Máquina para ensayos a tracción

4.8.1 Registro

Para el registro de las deformaciones se utilizan los datos extraídos de la cuña de la máquina de tracción directamente (ver Figura 4.8). Estos datos fueron posteriormente digitalizados (sin modificarlos) y comparados entre sí.



Figura 4.8: Cuñas entre las que se colocan las probetas

5 ENSAYO DE BARRAS A TRACCIÓN

5.1 Esquema de barras a ensayar

A continuación se muestran las distancias de empalme, para cada tipo de diámetro según lo indicado en el punto 4.3. En este tipo de empalme al ser de las barras soldadas tanto por arriba como por abajo, sólo será necesario tener la mitad de lo indicado anteriormente soldado, luego basta con cinco veces el diámetro de la barra (véase Figura 5.1)

Así entonces se tendrá un $L=6$ cm para el diámetro 12 mm, un $L=5$ cm para 10 mm y $L=4$ cm para $L=5$ mm.

Adicionalmente se ensayaran barras empalmadas de diámetro 10 mm en la manera habitual para analizar el efecto de la excentricidad de estas en los resultados obtenidos y en el comportamiento de la soldadura. En este caso se utiliza la longitud habitual de diez veces el diámetro de la barra (véase Figura 5.2)

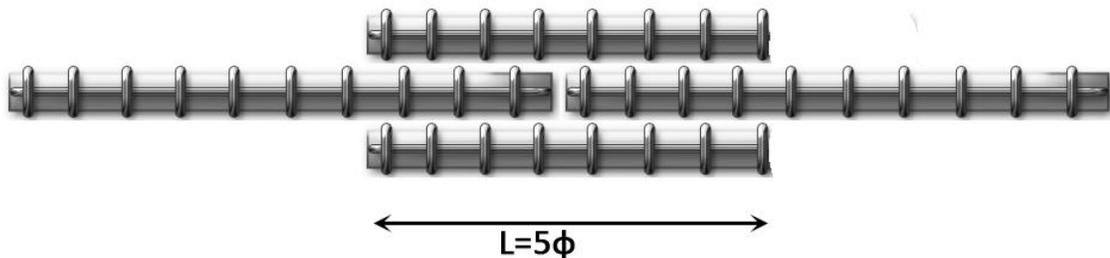


Figura 5.1: Esquema de barras a ensayar para tope indirecto con dos barras auxiliares

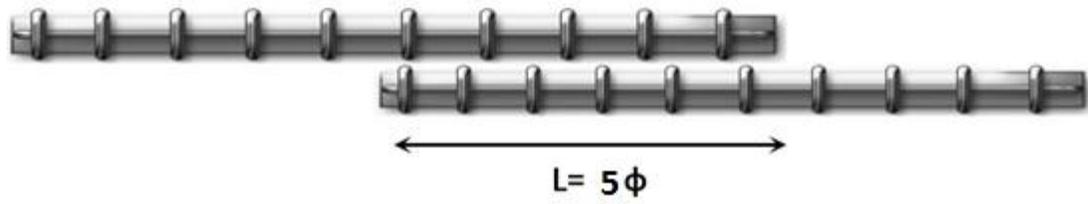


Figura 5.2: Esquema de barras a ensayar para empalme con las barras traslapadas



Figura 5.3: Barras soladas a tope indirecto con dos barras de empalme



Figura 5.4: Barras soladas a solapo.

5.2 Parámetros de la soldadura

5.2.1 Raíz E6010

Tabla 5.1: Parámetros de la soldadura para el electrodo raíz

Acero A630-420H						
E6010	Diámetro barra	Diámetro electrodo	nº de pasadas	Amperaje [A]	Voltaje [V]	Velocidad de pasada [cm/seg]
	8 mm	3/32"	1	75	30	0,271
	10 mm	3/32"	1	74	29	0,294
	12 mm	3/32"	1	80	25	0,279

Acero 440-280H						
E6010	Diámetro barra	Diámetro electrodo	nº de pasadas	Amperaje [A]	Voltaje [V]	Velocidad de pasada [cm/seg]
	8 mm	3/32"	1	54	23	0,321
	10 mm	3/32"	1	80	23	0,294
	12 mm	3/32"	1	85	30	0,270

5.2.2 Electrodo de relleno

Tabla 5.2 : Parámetros de la soldadura para los electrodos de relleno

Acero A630-420H						
E8018-C1	Diámetro barra	Diámetro electrodo	nº de pasadas	Amperaje [A]	Voltaje [V]	Velocidad de pasada [cm/seg]
	8 mm	3/32"	1	85	28	0,271
	10 mm	3/32"	1	93	33	0,278
	12 mm	3/32"	1	100	27	0,294

Acero A440-280H						
E7018	Diámetro barra	Diámetro electrodo	nº de pasadas	Amperaje [A]	Voltaje [V]	Velocidad de pasada [cm/seg]
	8 mm	3/32"	1	65	20	0,225
	10 mm	3/32"	1	95	17	0,270
	12 mm	3/32"	1	100	23	0,237

5.3 Pruebas previas al soldado de probetas

Para seleccionar el mejor diámetro a colocar tanto para la soldadura de raíz como la de relleno, se realizan pruebas previas para determinar cuales tiene una mayor facilidad de uso por parte del soldador, así como también cual ocupa una menor cantidad de material y produce menor calentamiento en el proceso de soldado.

Se observó producto de estas pruebas preliminares que se obtenía una mejor penetración para un electrodo de raíz E6010 3/32" (2,4 mm) que con uno de 1/8" (3,2 mm) además de ser de más fácil colocación para el soldador. Similares conclusiones se obtuvieron para el electrodo E8018, con la salvedad que con este además se tuvo una menor ocupación de material con el diámetro 3/32" (3,2 mm), cumpliendo cabalmente el ancho efectivo indicado en el punto 4.6 de esta memoria.

5.4 Macroataque

Uno de los ensayos requeridos para la calificación de la soldadura⁶ según lo dispuesto en el punto 3.8 es el macroataque, el cual se realiza para comprobar el cumplimiento del ancho efectivo indicado en la Figura 3.1 y evitar discontinuidades en la soldadura. Este ensayo consiste en luego de haber soldado las probetas de prueba, cortarlas y pulir la sección transversal de la barra, para posteriormente aplicar una solución de Nital, de modo que se puedan apreciar fácilmente los electrodos de raíz y relleno aplicados, así como los posibles defectos existentes.

A continuación se muestra el proceso completo para la barra de 10mm:

⁶ Verificación de cumplimiento de lo indicado en la normativa AWS D1.4-2005

- Pulido de la sección transversal de la barra



Figura 5.5: Pulido de la barra de acero

- Aplicación de Nital



Figura 5.6: Aplicación solución química

- Inspección visual y comprobación cumplimiento ancho efectivo.



Figura 5.7: Perfil transversal barra 10 mm y de acero A630-440H



Figura 5.8: Perfil transversal barra 10 mm y de acero A440-280H

Para el caso de la probeta de 10 mm de acero A630-420H, no se observó problemas en la soldadura, aunque no se logró una fusión completa, como se puede apreciar en la Figura 5.7, lo cual no presente inconvenientes según lo indicado en la normativa.

5.5 Confección de probetas

Para la confección de probetas se realizan los siguientes pasos:

- Una vez cortadas las barras de las formas indicadas en la Figura 5.1 y Figura 5.2 , se procede a aplicar la raíz (electrodo E6010). En la Figura 5.9 y Figura 5.10 se muestran las raíces.



Figura 5.9: Raíz E6010 en una barra de 12 mm a tope indirecto con dos barras de empalme



Figura 5.10: Raíz E6010 en una barra de 10 mm a solapo

- Se limpia la barra de manera de sacar la escoria.
- Se coloca la probeta en cuarzo para lograr un enfriamiento lento.



Figura 5.11: Probetas enfriadas en cuarzo

Se lija con esmeril la superficie de la raíz de manera de formar una canaleta.



Figura 5.12: Superficies en condiciones previas, antes de lijar con esmeril

- Se coloca el electrodo de relleno (E7018 o E8018 según corresponda).
- Se limpia nuevamente la escoria que se forma.
- Finalmente se coloca la probeta terminada en el cuarzo.



Figura 5.13: Probetas terminadas (aun sin quitar la escoria)

5.6 Resultado ensayos

5.6.1 Acero A630-420H

Como se indicó en el capítulo anterior se realizó el ensayo a tracción de las barras soldadas y sin soldar según lo indicado en la NCh 204 of.2006. No obstante lo anterior no se realiza la medición de las deformaciones unitarias directas dado la dificultad de medición en las barras soldadas, pero se obtiene el gráfico tensión-deformación desde las cuñas donde van ajustadas las probetas.

A continuación se muestra la forma de rotura de las barras ensayadas (véase Figura 5.14, Figura 5.15, Figura 5.16 y Figura 5.17 , así como también gráficos comparativos entre las probetas soldadas (véase Figura 5.18, Figura 5.19, Figura 5.20, y Figura 5.21) y las no soldadas .El detalle de cada ensaye puede verse en el Anexo A.2 de esta memoria.

Se observa en la primera barra soldada a solapo de la Figura 5.14, una rotura al final de la soldadura la cual no ocurre con las otras dos.

- **Formas de falla de las barras**



Figura 5.14: Barras de 10 mm de calidad A630-420H soldadas a solapo



Figura 5.15: Barras de 8 mm de calidad A630-420H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares



Figura 5.16: Barras de 10 mm de calidad A630-420H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares



Figura 5.17: Barras de 8 mm de calidad A630-420H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares

- **Gráficos comparativos**

Los gráficos comparativos siguientes se muestran tal cual fueron obtenidos de la máquina de la Figura 4.7, sin ningún tipo de intervención o ajuste posterior. Por lo mismo se observa un efecto de deslizamiento de las barras.

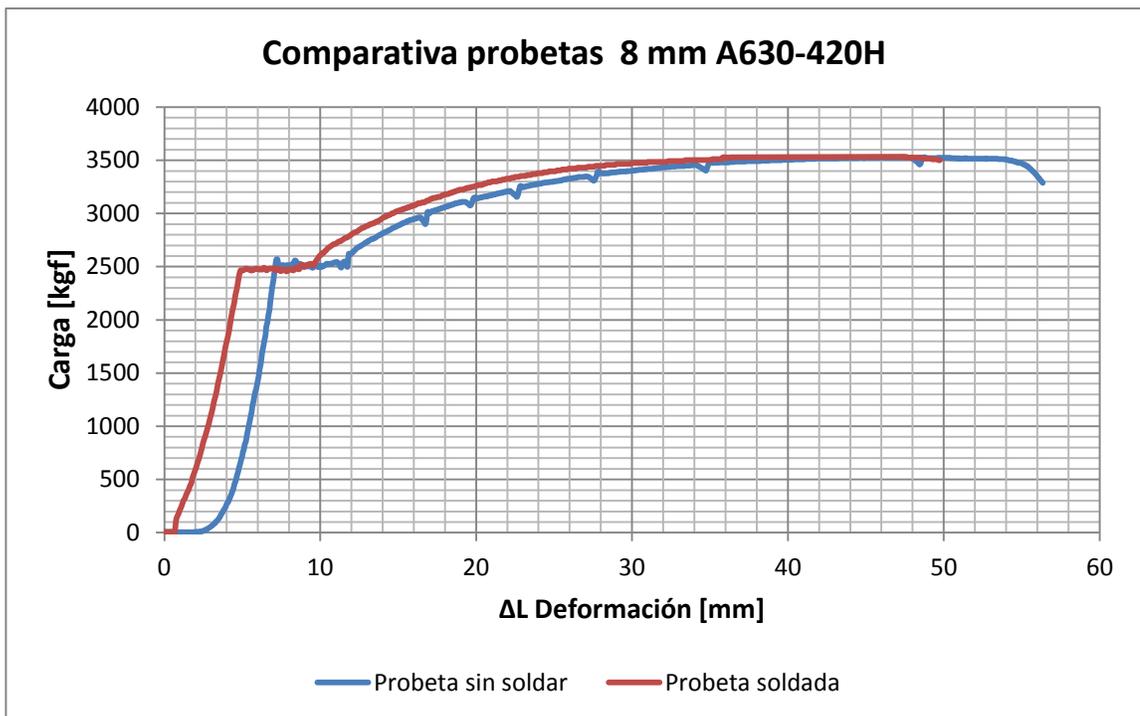


Figura 5.18: Comparativa curvas de probeta soldada y sin soldar para diámetro 8 mm

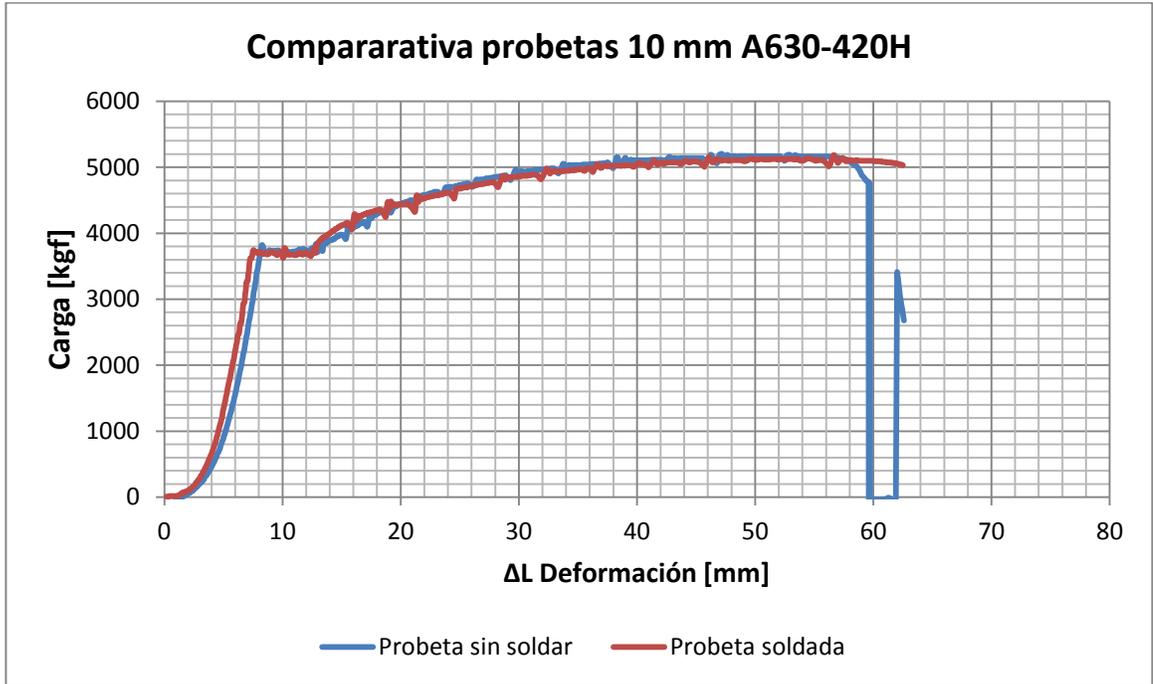


Figura 5.19: Comparativa curvas de probeta soldada y sin soldar para diámetro 10 mm.

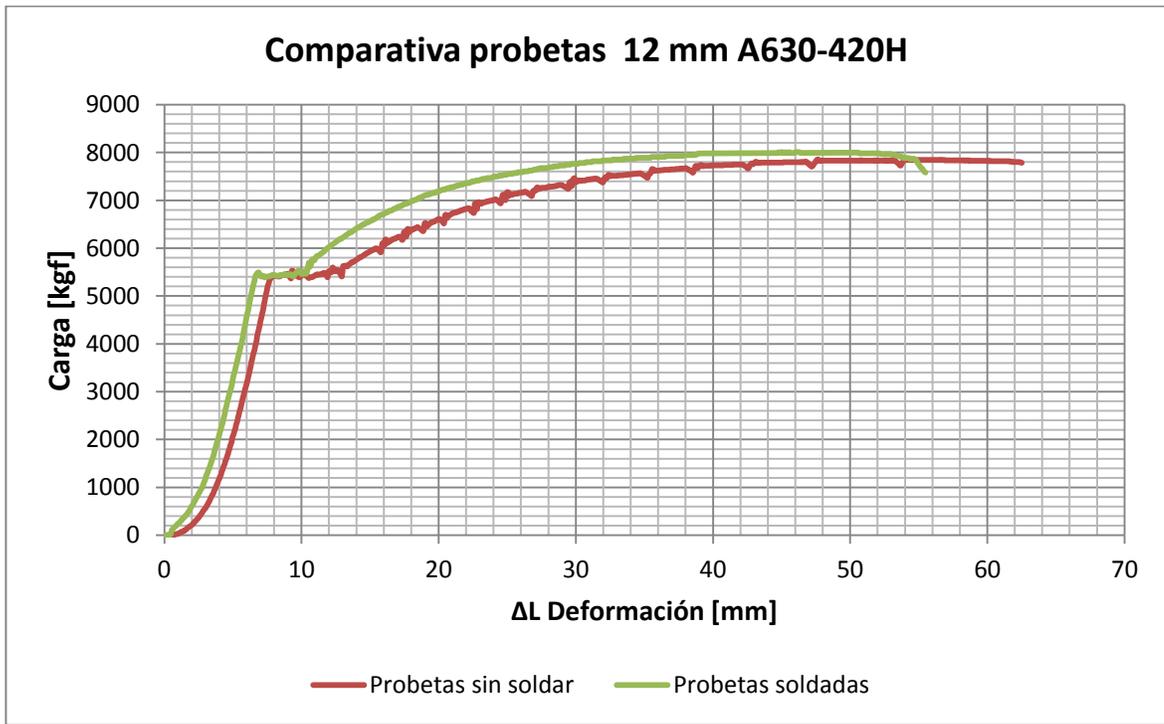


Figura 5.20 : Comparativa curvas de probeta soldada y sin soldar para diámetro 12 mm

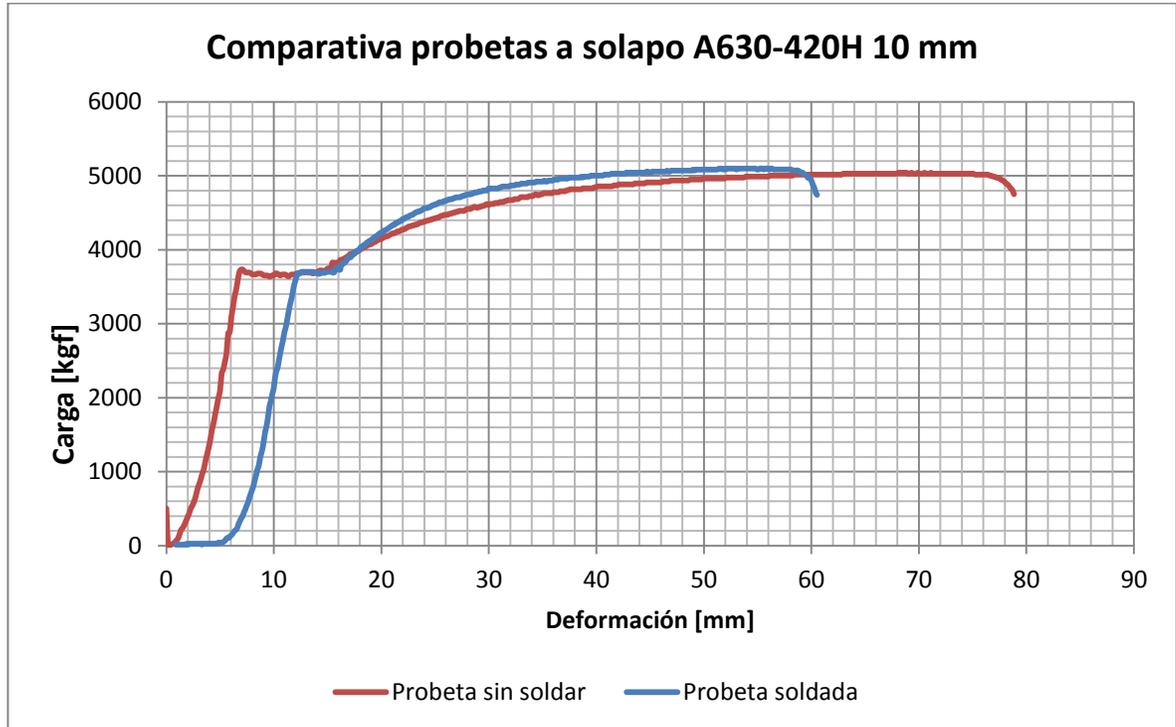


Figura 5.21 : Comparativa de curvas de probetas soldadas y sin soldar para empalme a solapo, con barras de 10 mm.

5.6.2 Acero A440-280H

Se realizan el mismo procedimiento de las barras A630-420H, sin embargo para este caso no se realiza el ensayo con barras a solapo.

A continuación se muestran las barras luego de ser ensayadas:

- **Formas de falla de las barras**



Figura 5.22: Barras de 8 mm de calidad A440-280H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares.



Figura 5.23: Barras de 10 mm de calidad A440-280H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares



Figura 5.24: Barras de 12 mm de calidad A440-280H soldadas a tope indirecto con dos barras auxiliares

- **Gráficos comparativos**

Aquí al igual que para el caso de los gráficos con barras de calidad A630-420H, fueron puestos tal cual se extrajo de la máquina.

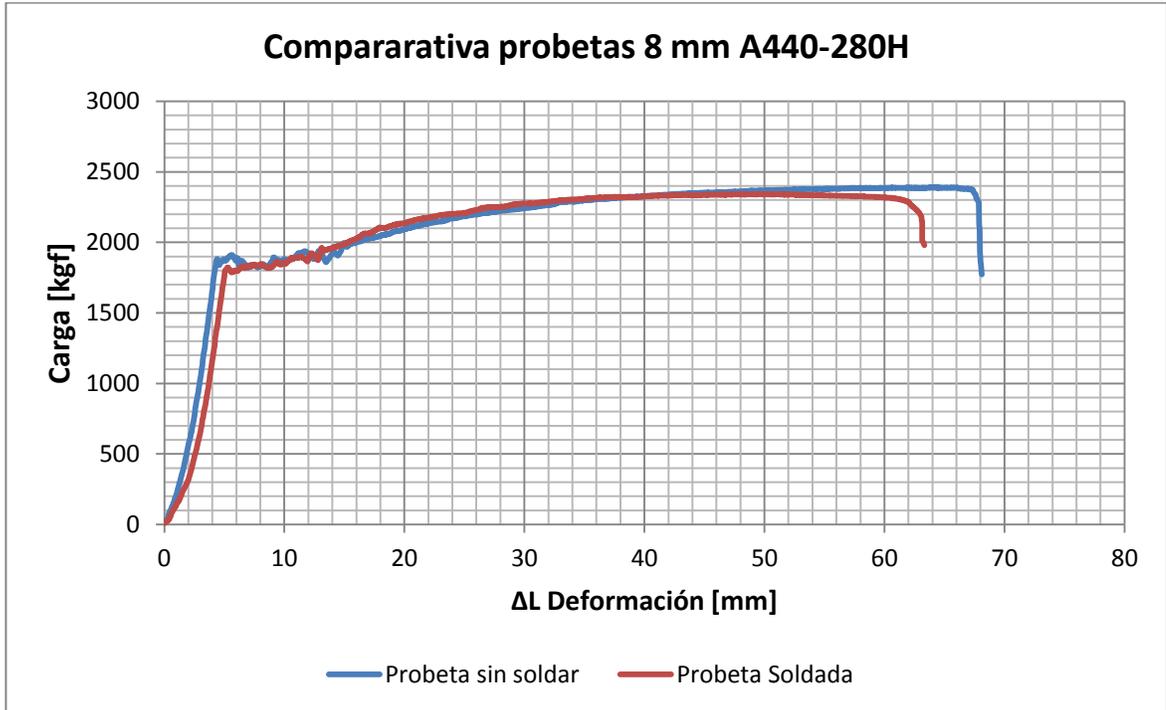


Figura 5.25: Comparativa de curvas de probetas soldadas y sin soldar para empalme a tope indirecto, con barras de 8 mm y calidad A440-280H.

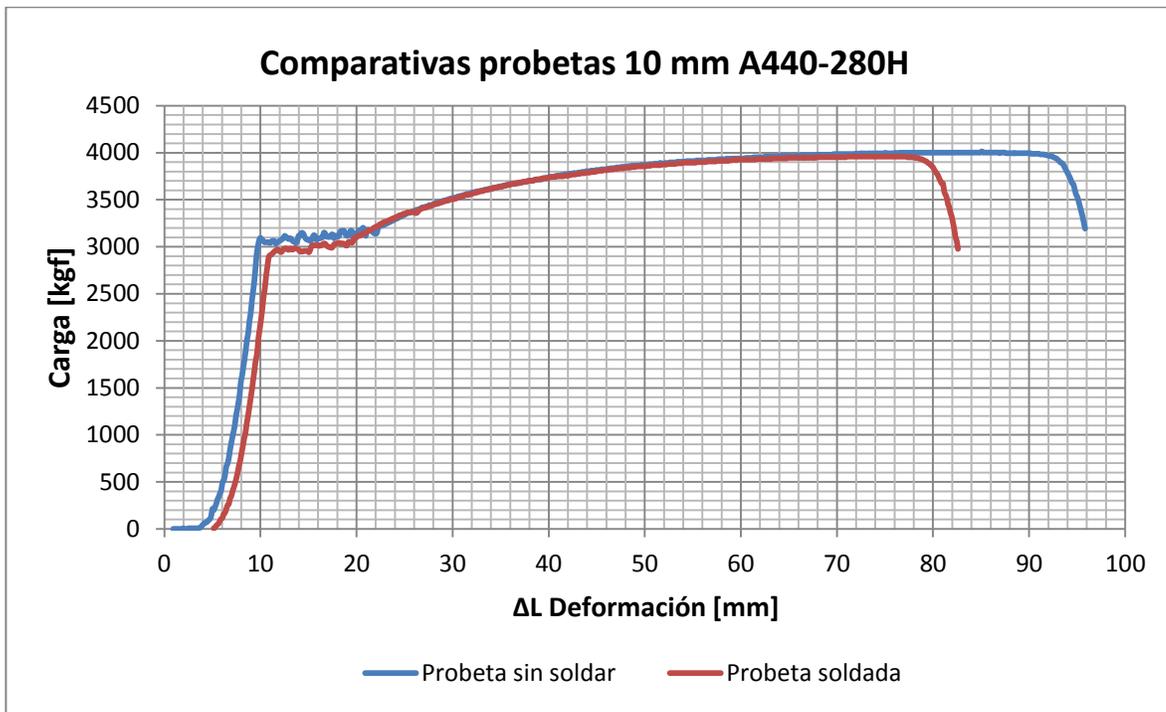


Figura 5.26: Comparativa de curvas de probetas soldadas y sin soldar para empalme a tope indirecto, con barras de 10 mm y calidad A440-280H.

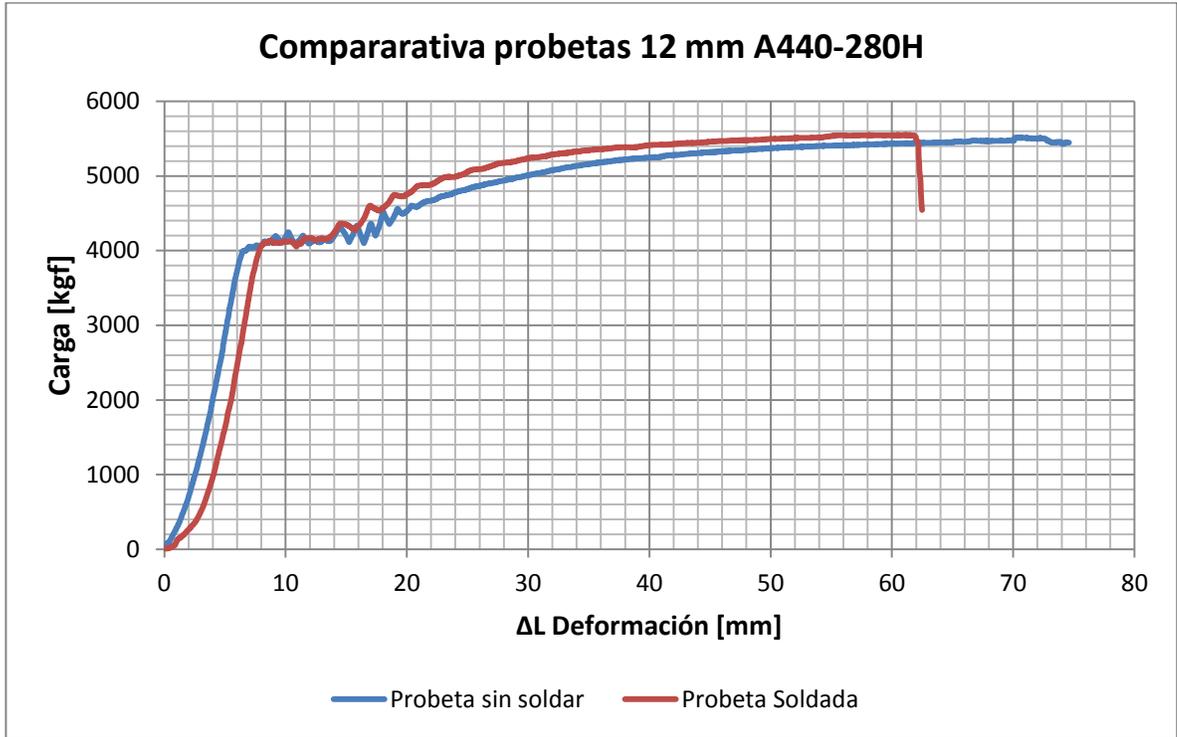


Figura 5.27: Comparativa de curvas de probetas soldadas y sin soldar para empalme a tope indirecto, con barras de 12 mm y calidad A440-280H.

5.7 Comentarios

5.7.1 Fluencia y Rotura

Acero calidad A630-420H

En los ensayos realizados no se observó mayores diferencias entre el gráfico de las probetas soldadas a tope indirecto y el de las probetas sin soldar, salvo una disminución de la deformación alcanzada entre la soldada y sin soldar, evidenciando pérdida de ductilidad en la primera, en especial en la barra de diámetro 8 mm. Esto último se pudo apreciar además en la rotura de las probetas puesto que lo hicieron en cualquier parte y no en la soldadura como se muestra en la Figura 5.28 y Figura 5.29.

Aunque se vio una rotura de la parte inferior de las barras soldadas a tope indirecto en forma reiterada, esta rotura era en la mayoría de los casos lo suficientemente alejada de la parte soldada, pudiéndose descartar que la alta temperatura alcanzada en el proceso de soldadura hubiese afectado esa parte.

Para el caso de las probetas soldadas a solapo se observa que en uno de los casos, la rotura se realizó en la zona adyacente a la soldadura, evidenciándose que en ese sector se produjo una unión frágil, la cual además influyó para que no se lograra llegar a la resistencia esperada (se llegó a un 95%) según se muestra en la Figura 5.21.

En las probetas soldadas a tope indirecto se llegó al 100 % de la resistencia esperada tanto de fluencia como última.

Acero de calidad A440-280H

Los resultados de estos ensayos muestran que en todos los casos se llega a los valores requeridos tanto para la fluencia como para la rotura, aunque se observa un

pequeño descenso con respecto a las barras sin soldar. Este efecto aumenta en el caso de las barras de 8 mm, en donde se observa roturas cercanas a la soldadura (Véase Figura 5.22). Esto puede deberse a diversas razones, sin embargo la más probable es la disminución del diámetro en el proceso de soldadura, producto de las altas temperaturas formadas (sobre los 300°C), este problema se acrecienta en la medida que las barras tienen un menor diámetro, puesto que hay menos acero disponible para fundirse)

5.7.2 Ductilidad

Pérdida general de ductilidad

Como se indicó anteriormente las diferencias en términos de resistencia entre barras soldadas son mínimas e incluso menores al 5% en casi todos los casos. Las grandes diferencias entre una y otra se observan en la resiliencia que son capaces de desarrollar.

Para tener una medida comparativa se analizan las deformaciones que se obtienen en cada uno de los ensayos y se comparan entre aquellas probetas soldadas y aquellas no soldadas, mediante el cociente $D2/D1$ tal como se muestra en la Tabla 5.3.

Al analizar los datos, se observa que en donde existe una mayor pérdida de ductilidad son aquellos casos empalmados (cerca del 40%), lo cual puede ocurrir por la excentricidad de esta conexión o debido a un sobrecalentamiento al colocar el cordón de soldadura, puesto que este fue colocado de una vez (los 5ϕ), mientras que para la conexión a tope indirecto se realizó en tramos de 2.5ϕ .

Tabla 5.3: Tabla comparativa entre la deformación de un elemento soldado y un elemento sin soldar

Comparación		Relaciones
Elemento Soldado	Elemento sin soldar	D2/D1
A1	D1	0,75
A2	D2	0,66
A3	D3	0,77
A4	D4	0,67
A5	D5	0,63
A6	D6	0,65
A7	D7	0,87
A8	D8	0,65
A9	D9	0,58
B1	E1	0,98
B2	E2	1,02
B4	E3	1,09
B5	E4	1,19
B7	E5	0,96
B8	E6	0,95
C1	F1	0,54
C2	F2	0,50
F: Fluencia R: Rotura D: Deformación máxima		

Acero A630-420H

En general no se observó una pérdida muy importante de ductilidad en las probetas ensayadas. Una excepción a lo anterior es la probeta de diámetro 8 mm y que se muestra en la Figura 5.18 , en donde se aprecia una pérdida de ductilidad. Lo anterior es posiblemente producto de una disminución del diámetro de la barra al momento de la soldadura, producto de la alta temperatura que se formó y a lo complicado de la operación de esta para diámetros tan pequeños, lo que genera una debilidad en la zona afectada térmicamente (ZAT), expresado en fragilidad de ese sector, esto también podría afectar la resistencia, sin embargo esto no se observó en los resultados de los ensayos.



Figura 5.28: Rotura de probeta soldada de 8 mm de diámetro



Figura 5.29: Rotura de probeta soldada de 10 mm de diámetro

Acero de calidad A440-280H

En este caso puede apreciarse una disminución en la ductilidad del empalme soldado con respecto al sin soldar (véase Figura 5.25, Figura 5.26 y Figura 5.27). Sin embargo no se ve una diferencia clara con la pérdida de ductilidad del acero de calidad A630-420H.

5.7.3 Cumplimiento de la norma NCh 204 Of.2006

Se tiene conformidad de los requisitos mecánicos de la normativa NCh 204 Of.2006 para la mayoría de las barras ensayadas. A continuación se muestra en la Tabla 5.4 estos requisitos teniéndose que el valor K indicado en ella corresponde a un coeficiente que depende del diámetro nominal y cuyo valor se indica en la Tabla 5.5.

Aquellas barras que no cumplieron con la normativa son las barras empalmadas, fallando específicamente en cumplir el mínimo alargamiento porcentual requerido. Este requisito tiene que ver con proveer una adecuada ductilidad en las barras.

El detalle del cumplimiento de la normativa puede encontrarse en el anexo A.2.7 de esta memoria.

Tabla 5.4: Requisitos ensayo a tracción según NCh 204 Of.2006

	A440-280H	A560-350H	A630-420H
Tensión de fluencia F_y MPa	280 mín.	350 mín.	420 mín. 580 máx.
Resistencia a la tracción F_u MPa	440 mín.	560 mín.	630 mín.
Relación F_u / F_y mín.	1,25	1,25	1,25
Alargamiento % probeta $L_0 = 200$ mm	16	$\frac{7\ 700}{F_u} - K$	$\frac{7\ 000}{F_u} - K$
El alargamiento porcentual de ruptura para probetas de 200 mm entre marcas no debe ser menor que 8% para los aceros de grados A560-350H y A630-420H.			

Tabla 5.5: Coeficiente K para la determinación de alargamiento admisible

Diámetros nominales, d_n mm	Coeficiente K
6	3,0
8	2,0
10	1,0
12	0
14	0
16	0
18	0
20	0,5
22	1,0
25	2,0
28	3,0
32	4,0
36	5,0
40	6,0

5.7.4 Plateau de Fluencia

Al analizar los gráficos comparativos del punto 5.6, se tiene una disminución del plateau de fluencia en las barras soldadas con respecto a las sin soldar, esto es más evidente en las barras de calidad A630-420H y en las que están unidas mediante solapo. Si bien no es claro las variables que producen la disminución de este, se sabe que el plateau de fluencia no es constante bajo la carga cíclica, este disminuye al aumentar el trabajo plástico (Shen, y otros, 1992), teniéndose que al disminuir el plateau en los ensayos realizados en esta memoria hay una disminución de la capacidad elasto-plástica del material de las probetas soldadas lo que redundo en un empeoramiento en su comportamiento cíclico.

5.8 Utilización de electrodos

Si bien esta memoria no está enfocada en la determinación de costos de las prácticas antes señaladas, es importante tener una cuantificación de los recursos requeridas en ellas, en este caso el insumo principal utilizado son los electrodos, de los cuales se ocuparon 10 de relleno y 10 para la raíz por cada probeta realizada.

5.9 Comparaciones con trabajo anterior

Tal como se indicó en el punto 1.4 de esta memoria, anteriormente se había realizado una experiencia de ensaye a tracción con probetas soldadas, las cuales entregaron resultados desfavorables para las barras de calidad A630-420H, tal como es posible apreciar en la Figura 5.30, Figura 5.31 y Figura 5.32.

A modo de resumen se presentan unas tablas donde se indican las diferencias de metodología entre una y otra memoria.

Tabla 5.6: Comparación en los diferentes ítems de cada memoria para acero A440-280H

Acero A440-280H	Items	Memoria Ariel Quezada	Memoria Bruno Capelli
	Origen Acero	Gerdau AZA	CAP
	Diámetros ensayados	8,10,12 mm	6 a 12 y 16 a 36 mm
	Carbono equivalente (1)	0,21	0,47-0,52
	Utilización raíz E6010	Sí	No
	N° filetes x probeta	4	4
	Electrodo	E7018	E7018
	Diámetro electrodos	3/32"	3/32"
	Posición de Soldadura	3G	-
	Pre calentamiento	T° ambiente: 20°C	T° ambiente: 20°C
	Enfriamiento controlado	Sí	Sí
	Pérdida de ductilidad	Sí	Sí
	Ensayo de doblado	No	Sí
	Rango de amperajes	65-100 A	120-125 A
	Rango de voltajes	17-23 V	20-21V
	Falla en soldadura	No	No
Soldador Calificado (2)	Sí	-	
Mantención electrodos	Sí	No es claro	

Tabla 5.7: Comparación en los diferentes ítems de cada memoria para acero A630-420H

Acero A630-420H	Items	Memoria Ariel Quezada	Memoria Bruno Capelli
	Origen Acero	Gerdau AZA	CAP
	Diámetros ensayados	8,10,12 mm	6 a 12 y 16 a 36 mm
	Carbono equivalente (1)	0,51-0,56	0,68-0,78
	Utilización raíz E6010	Sí	No
	N° filetes x probeta	4	4
	Electrodo	E8018-C1	E11018
	Diámetro electrodos	3/32"	1/8"
	Posición de Soldadura	3G	-
	Pre calentamiento	T° ambiente: 20°C	150°C
	Enfriamiento controlado	Sí	Sí
	Pérdida ductilidad	en los de solapo	Sí
	Ensayo de doblado	No	Sí
	Rango de amperajes	85-100 A	110-120 A
	Rango de Voltajes	28-33 V	22 V
	Falla Soldadura	Solo en la zona adyacente en los empalmes a solapo	Sí
Soldador Calificado (2)	Sí	No	
Mantención electrodos	Sí	No es claro	

- (1) los rangos de carbono son ambas en el mismo rango de barras (8,10,12 mm)
- (2) Soldador calificado para las variables específicas indicadas en estas memorias.

Como se puede apreciar en las tablas anteriores el parámetro más relevante que ha cambiado es el Carbono equivalente, el cual es mucho mayor en las barras utilizadas en la memoria de Capelli, haciendo con ello que todas las variables que dependen de este ítem cambien (tipo de electrodo, amperajes, precalentamiento, voltaje).

Según lo indicado en la introducción, el contenido de carbono equivalente es relevante en la soldabilidad de los aceros, observándose que a mayor contenido de carbono, se tiene una peor soldabilidad y un mayor calentamiento de la zona afectada térmicamente.

Otro aspecto importante diferenciador de ambos trabajos es que en esta memoria se utilizó un soldador calificado para las variables indicadas, mientras que en la memoria de Capelli esto no es claro. Incluso en la misma memoria se indica esta falencia como uno de los puntos importantes de la falla de la soldadura debido a que el soldador no siempre fue el mismo a lo largo de la confección de las probetas.

Además de lo anterior no se tiene certeza de la mantención de los electrodos utilizados.

A continuación se muestran algunas imágenes con las probetas ensayadas en esa memoria.

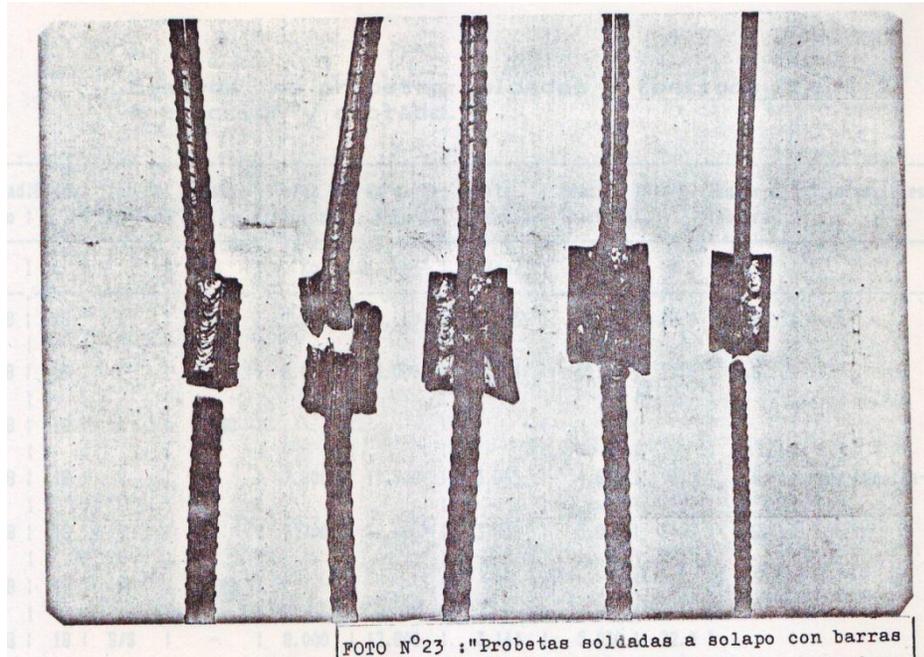


Figura 5.30: Probetas soldadas a solapo con barras de acero A63-42H rotas en la soldadura

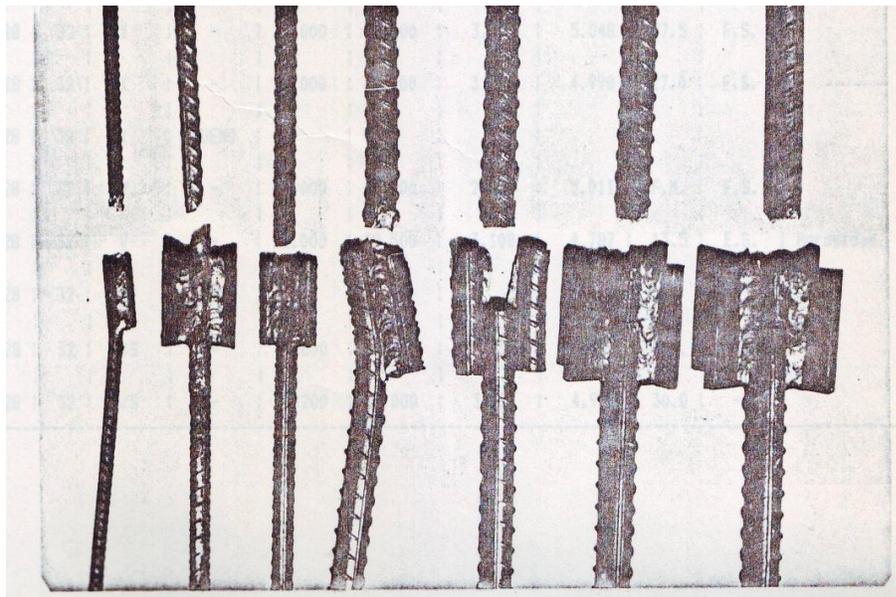


Figura 5.31: Probetas soldadas a solapo con barras de acero calidad A63-42H rotas en la zona térmicamente afectada en la memoria de Bruno Capelli, a excepción de la quinta probeta que falló en los filetes de soldadura

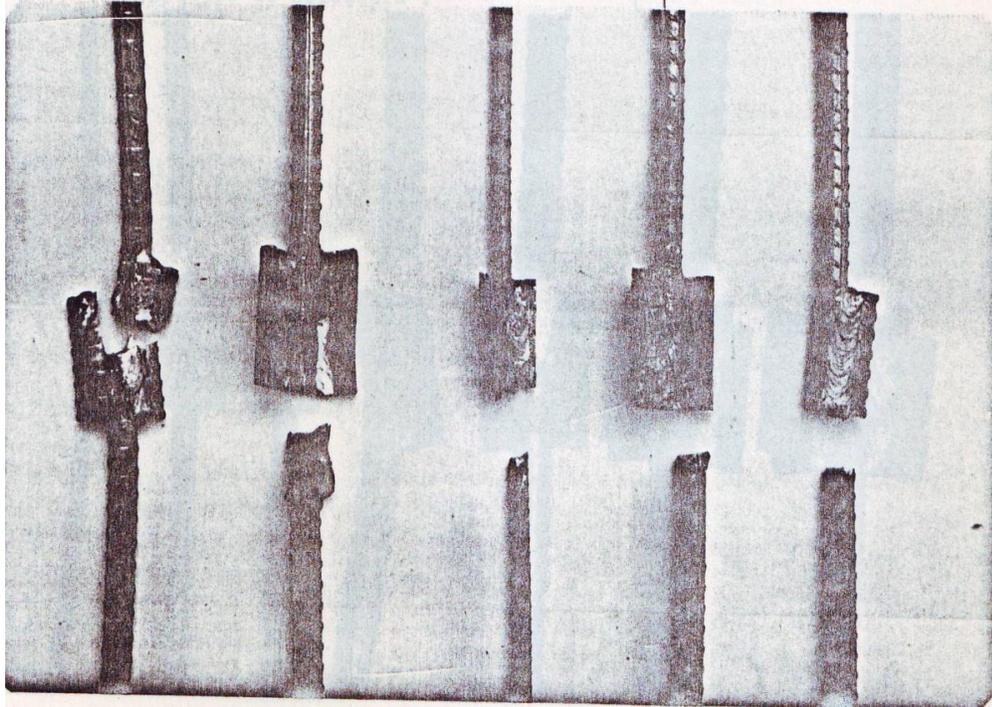


Figura 5.32: Probetas soldadas a solapo con barras de acero A63-42 en la memoria de Bruno Capelli

6 COMPORTAMIENTO CÍCLICO DE LAS BARRAS DE ACERO DE REFUERZO⁷.

6.1 Fatiga de materiales

La fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce ante cargas inferiores a las cargas estáticas que producirían la rotura. Su principal característica es que puede ocurrir a una tensión menor que la resistencia a tracción o el límite elástico para una carga estática, y aparecer sin previo aviso.

La rotura por fatiga tiene aspecto frágil aun en metales dúctiles, puesto que no hay deformación plástica asociada a la rotura. El proceso consiste en un inicio y posterior propagación de fisuras, que crecen desde un tamaño inicial microscópico hasta un tamaño macroscópico capaz de comprometer la integridad estructural del material. La superficie de fractura es perpendicular a la dirección del esfuerzo.

6.2 Proceso de fatiga

La “vida a fatiga” de un material es definido como la cantidad de ciclos que puede soportar un material ante una amplitud de deformación específica.

La primera etapa en el proceso de fatiga es la formación de grietas, usualmente en la superficie del espécimen o cerca de ella.

Pueden ocurrir deformaciones plásticas irreversibles como resultado de deformaciones anteriores o por concentración de tensiones (debido a imperfecciones de la superficie o características geométricas). Estas deformaciones dan origen a la creación de planos extrusivos y planos intrusivos, los cuales se presentan como escalones (por deslizamiento de dislocaciones), para posteriormente aparecer como grietas bajo repetidas cargas cíclicas. Una vez que se ha formado la grieta, esta continua expandiéndose hasta que el área de la superficie existente es insuficiente para la carga y ocurre una falla frágil.

⁷ Introducción teórica basada en la siguiente bibliografía (Lacaze, 2008), (Ashby, y otros, 2007), (Ashby, y otros, 2006),

6.3 Daño por fatiga y agrietamiento (Ashby, y otros, 2007)

Una muestra perfectamente lisa, sin cambios de sección y que no contiene inclusiones, agujeros o grietas, sería inmune a la fatiga no logrando superar el límite elástico. Lamentablemente esta visión de perfección es inalcanzable.

Pequeñas imperfecciones, por pequeñas que estas sean, pueden ser sumamente perjudiciales formándose puntos de concentración de tensiones, ejemplos de estas imperfecciones son: los agujeros de los remaches, los cambios bruscos de sección, hilos, muescas o incluso la rugosidad superficial.

Si bien las dislocaciones que se producen están acotadas a una pequeña área donde se producen las concentraciones de tensiones, esto es suficiente para causar daños que finalmente se convierten en una pequeña grieta.

6.4 Fatiga de bajos ciclos y fatiga de altos ciclos

6.4.1 Fatiga de altos ciclos o fatiga controlada por tensión (HCF)

Esta fatiga está controlada, por las tensiones (o deformaciones elásticas). En general, ocurre bajo condiciones normales de cargas, y, sólo incursiona en el rango elástico. Para evitarla, es posible aumentar la resistencia a la fatiga, modificando las características de los elementos sometidos a estas cargas (tensiones admisibles permitidas, geometría de los elementos). Se suele considerar la siguiente cantidad de ciclos para esta fatiga:

Fatiga de alto número de ciclos $> 10^3 - 10^5$ ciclos.

En la fatiga de alto ciclo, una vez que se presenta una grieta, esta se propaga según lo que se muestra en la Figura 6.1 (a). Durante la parte a tracción de la sollicitación cíclica se forma una pequeña “zona plástica” en la punta de la fisura, que se extiende y crea una nueva superficie. En la parte a compresión la grieta se cierra nuevamente y la superficie recién formada se pliega hacia adelante siguiendo el avance de la grieta. Los

ciclos repetidos forman pequeñas ondulaciones en la cara agrietada, marcando su posición en cada ciclo. Estas “estrías” que se forman son características de una falla por fatiga y son útiles para revelar donde comienza la grieta y que tan rápido se propaga.

6.4.2 Fatiga de bajos ciclos o fatiga controlada por deformación (LCF)

Muchas fallas por fatiga ocurren a tensiones mayores para un número de ciclos de carga mucho menor, lo que dio origen a la expresión “fatiga de bajo ciclo”. La fatiga de bajo ciclo está relacionada en muchos casos con la existencia de tensiones de origen térmico. En estos casos el fenómeno se encuentra controlado por deformación más que por tensión. En muchas aplicaciones prácticas los componentes experimentan un cierto grado de constricción estructural, especialmente en la región de los concentradores de tensión, resultando más apropiado considerar la vida a la fatiga de un componente bajo condiciones de deformación controlada.

Al someter barras de refuerzo a ciclos tracción- compresión, como ocurre en columnas de hormigón armado, se producen deformaciones que en algunos casos pueden sobrepasar el nivel elástico. En algunos casos estas deformaciones pueden localizarse, formando zonas plásticas, induciendo daños irreversibles en la estructura. Se suele considerar la siguiente cantidad de ciclos para esta fatiga:

Fatiga de bajo número de ciclos (oligofatiga) $\leq 10^3 - 10^5$ ciclos.

En la fatiga de bajos ciclos las tensiones ahí formadas son mayores además de tener una zona plástica mayor que la producida ante sollicitaciones de altos ciclos, esto puede verse en la Figura 6.1 (b). Esta zona puede ser tan grande que haga que toda la muestra sea plástica, haciendo que se produzca un efecto similar al de doblar una tapa de una lata hasta romperla. Las mayores tensiones se encuentran en la punta de la zona de fisura.

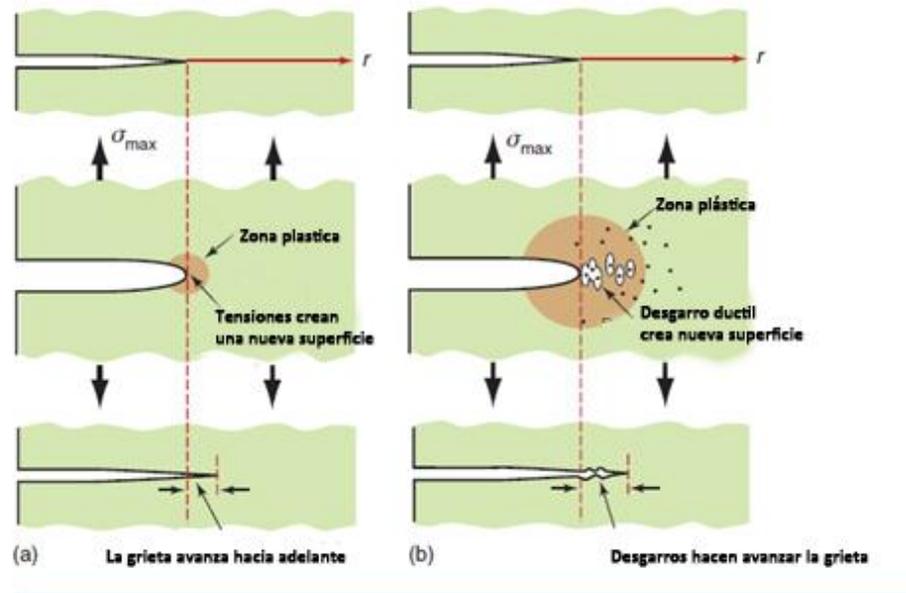


Figura 6.1 Propagación de grietas según el tipo de fatiga

6.5 Teoría y realidad

En todo caso, existe una diferencia notable entre la teoría y la realidad. Esto conduce a incertidumbres significativas en el diseño cuando la vida a fatiga o el límite de fatiga son considerados. La dispersión en los resultados es una consecuencia de la sensibilidad de la fatiga a varios parámetros del ensayo y del material que son imposibles de controlar de forma precisa. Estos parámetros incluyen la fabricación de las probetas y la preparación de las superficies, variables metalúrgicas, alineamiento de la probeta en el equipo de ensayos, tensión media y frecuencia del ensayo.

Aproximadamente la mitad de las probetas ensayadas se rompen a niveles de tensión que están cerca del 25% por debajo de la curva. Esto suele asociarse a la presencia de fuentes de concentración de tensiones internas, tales como defectos, impurezas, entallas, ralladuras, etc que han permanecido indetectadas.

Se han desarrollado técnicas estadísticas y se han utilizado para manejar este fallo en términos de probabilidades. Una manera adecuada de presentar los resultados tratados de esta manera es con una serie de curvas de probabilidad constante.

6.6 Ensayos experimentales

En este ámbito se han realizado pocos ensayos experimentales de fatiga de bajo número de ciclo para barras de refuerzo. Los más relevantes son los realizados por Mander et al. (Mander, y otros, 1994) y Brown (Brown, y otros, 2004)

6.6.1 Ensayos realizados por Mander et al (Mander, y otros, 1994)

Realizó una serie de ensayos de fatiga de bajo ciclo, utilizando dos tipos de acero: un acero de alta resistencia y uno de baja resistencia. Para cada uno de los ensayos, las barras de acero no sufrieron ningún tipo de alteraciones y se aplicó una amplitud de deformación constante, pero consideró tanto deformaciones máximas en tracción y en compresión de igual y distinta magnitud.

El objetivo de esta investigación era la de simular las condiciones de una fatiga cíclica de amplitud constante, con un énfasis en la fatiga de bajo ciclo para refuerzo longitudinal bajo un rango representativo de diferentes deformaciones sísmicas y evaluar los resultados experimentales con modelos existentes.

Los ensayos fueron desarrollados usando una máquina axial-torsional la cual incluía un sistema electrohidráulico automático, el cual era capaz de desarrollar una carga o deformación tanto constante como variable. Además, mediante la aplicación de una presión transversal constante a lo largo de la longitud de desarrollo de la probeta dentro de la mordaza, los esfuerzos eran transmitidos.

La medición de deformaciones se midió mediante un extensómetro en el tramo central, entre dos puntos de inflexión del perfil que ya sufrió pandeo. (Ver Figura 6.2)

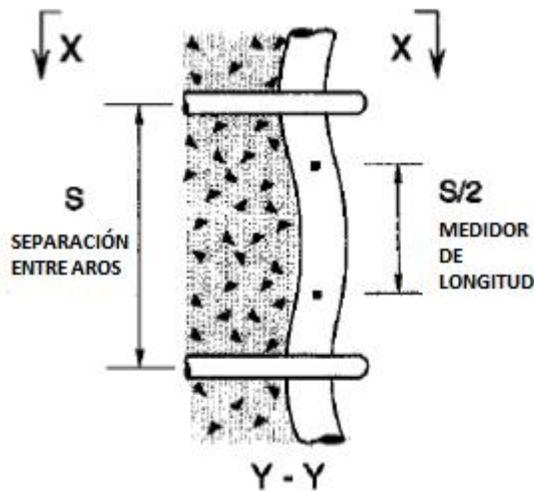


Figura 6.2: Condiciones in situ de la barra de refuerzo

Según indica Mander la tarea de definir un criterio adecuado de falla a fatiga es difícil debido a que en investigaciones pasadas no han logrado llegar a un consenso. Lo anterior se atribuye a las variables involucradas y lo difíciles de definir. Por ejemplo se tiene el modo de ensaye (es decir a carga o deformación), el número de ciclos (altos ciclos o bajos ciclos), la naturaleza de los especímenes a ensayar y las condiciones técnicas para la observación de la expansión de la grieta, así como también el fin que se busca con cada ensayo.

Por su parte, Mander usó dos criterios distintos para definir la vida a la fatiga: el primero, para amplitud de deformación pequeña ($< 2\%$), el cual coincide con el punto de caída abrupta de la razón f_i/f_0 (donde f_i es la tensión máxima en el ciclo, a compresión o tracción, y f_0 la tensión al primer punto de regreso), el segundo, para amplitud de deformación mayor a 2% , se basa en una observación visual en cuanto a la aparición de la primera grieta.

6.6.2 Ensayos realizados por Brown (Brown, y otros, 2004)

El objetivo de este trabajo consiste en la determinación del comportamiento del hormigón armado a la fatiga de bajo ciclo ante ciclos de amplitud de deformación variable. Para ello realizó una primera serie de ensayos a amplitud constante. Al conocer en este caso, la relación entre deformación y número de ciclos, le fue posible pronosticar el comportamiento bajo ciclos de amplitud variable. El programa de ensayos consideró barras de acero grado 60 ($F_{y_{min}} = 420$ MPa) y de diámetros distintos (19.1 mm, 22.2 mm, 25.4 mm).

El desarrollo del programa experimental estuvo sujeto a varios problemas durante la calibración del prototipo:

- Medición de las deformaciones: ésta se realizó mediante sensores LVDT ubicados en las mordazas y un extensómetro de largo 50,8 mm ubicado en el tramo central de la barra. Sin embargo, se ubicó entre las mordazas y la probeta un elemento en aluminio para transmitir los esfuerzos a la probeta. Por su ubicación, los sensores LVDT incluían en sus mediciones las deformaciones sufridas por el aluminio. Debido a esto, se obtuvo un módulo elástico inicial sensiblemente menor al módulo de Young del acero (110.000 MPa en lugar del 200.000 MPa esperado). Brown supuso que el aluminio sólo se deformaba elásticamente y, que una vez el punto de fluencia alcanzado, las deformaciones medidas ocurrían en la barra y no en el elemento en aluminio. Calibró las deformaciones medidas por los LVDT (Figura 6.3) y corrigió en consecuencia los valores de las deformaciones.

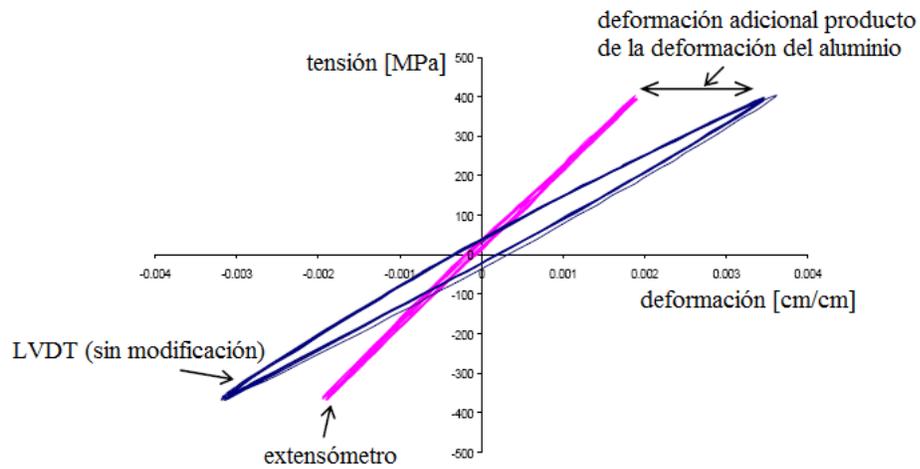


Figura 6.3: Calibración inicial de las deformaciones registradas por los LVDTs

- Inestabilidad del marco construido para la transmisión de las cargas a la probeta: al aplicar deformaciones altas (en el rango inelástico), el marco no podía mantener el alineamiento de la barra ensayada, se producía un desplazamiento lateral de la mordaza superior con respecto a la base. Brown agregó arriostramientos laterales y redujo el impacto de la inestabilidad en el pandeo de la probeta y en los resultados (Figura 6.4).

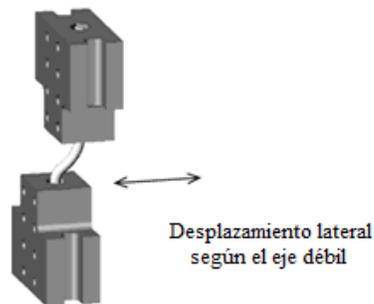


Figura 6.4: Desplazamiento lateral de la mordaza superior

Además, se puede mencionar que los ensayos se realizaron a una velocidad igual a 0.001 (deformación unitaria) /s. La falla por fatiga fue definida como el número de ciclos antes ruptura de las barras.

Finalmente, a pesar de que Brown y Mander realizaron ensayos a la fatiga de bajo ciclo, obtuvieron algunas variaciones en sus resultados (Figura 6.5). Las curvas de vida a la fatiga presentan un pendiente similar pero el estudio de Brown entregó, a mismas amplitudes de deformaciones, en una vida a la fatiga mayor. Varias razones pueden ser causas potenciales de estas diferencias: la tasa de deformación (5 veces más alta durante los ensayos realizados por Mander), distintos diámetros de barras, acero de calidad diferente, métodos de mediciones, etc.

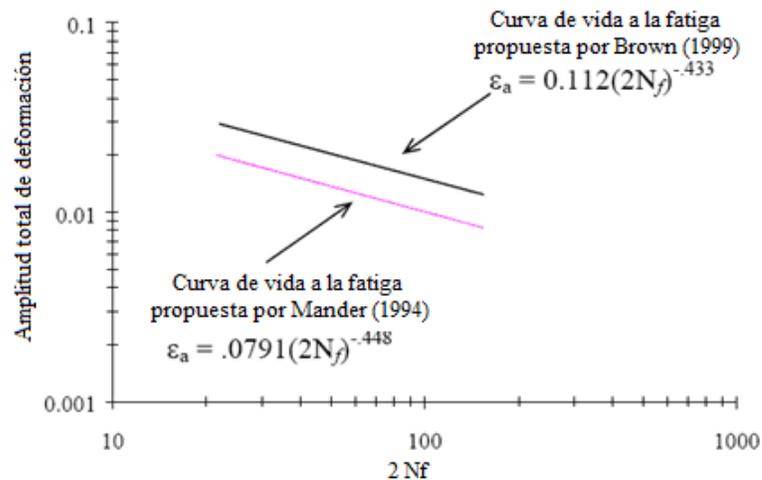


Figura 6.5: Curvas de vida a la fatiga

7 DISEÑO DEL ENSAYO DE FATIGA DE BAJO CICLO (LOW CYCLE FATIGUE)

7.1 Descripción del problema

La idea de este ensayo es analizar las barras de refuerzo de acero del tipo utilizado en Chile bajo solicitaciones cíclicas de manera de simular el efecto de un sismo, consiguiendo con ello analizar la variación de ductilidad ante el pandeo producido en el punto de la soldadura. En la Imagen 7.1 se muestra el pandeo de las barras de refuerzo y el descascaramiento del hormigón en el Terremoto de Kobe, Japón, donde se aprecia claramente el pandeo de las barras.



Imagen 7.1: Pandeo producido ante un sismo. Terremoto de Kobe, Japón

7.2 Estudio de antecedentes

A la fecha de este informe no se ha encontrado documentación anterior que indique el comportamiento a la soldadura del tipo de barra ASTM A615 (que es del tipo utilizado en Chile), pero si existen antecedentes anteriores de barras de refuerzo del tipo ASTM A-706 , que es un acero de refuerzo de bajo contenido de carbono que cumple lo previsto en la norma AWS D1.4 (American Welding Society, 2005) y al cual se le han hecho ensayos a ciclos severos de carga axial (Castilla C, y otros, 2001) encontrándose que ni la unión soldada ni la zona afectada por el calor fueron fuente de fragilidad de las muestras ensayadas, aunque si se notó una pérdida de ductilidad de las muestras soldadas en comparación a las no soldadas.



Figura 7.1: Ruptura de barras. (Castilla C, y otros, 2001)

7.3 Metodología de ensayo

Para la realización de este ensayo se diseña un aparato capaz de reproducir el efecto de pandeo que se produce ante la ocurrencia de una sollicitación sísmica.

En esta memoria se presentan dos diseños de ensayos distintos, de modo de que puedan ser reproducidos en futuros trabajos.

7.4 Primer diseño

Se le aplica un ciclo oscilatorio lento colocando una barra de refuerzo entre bloques de hormigón sobre una estructura de viga provista de un gato hidráulico capaz de realizar esfuerzos de tracción y compresión (ver Figura 7.2 y Figura 7.3)

El detalle de las piezas de este sistema puede encontrarse en el anexo A.3.

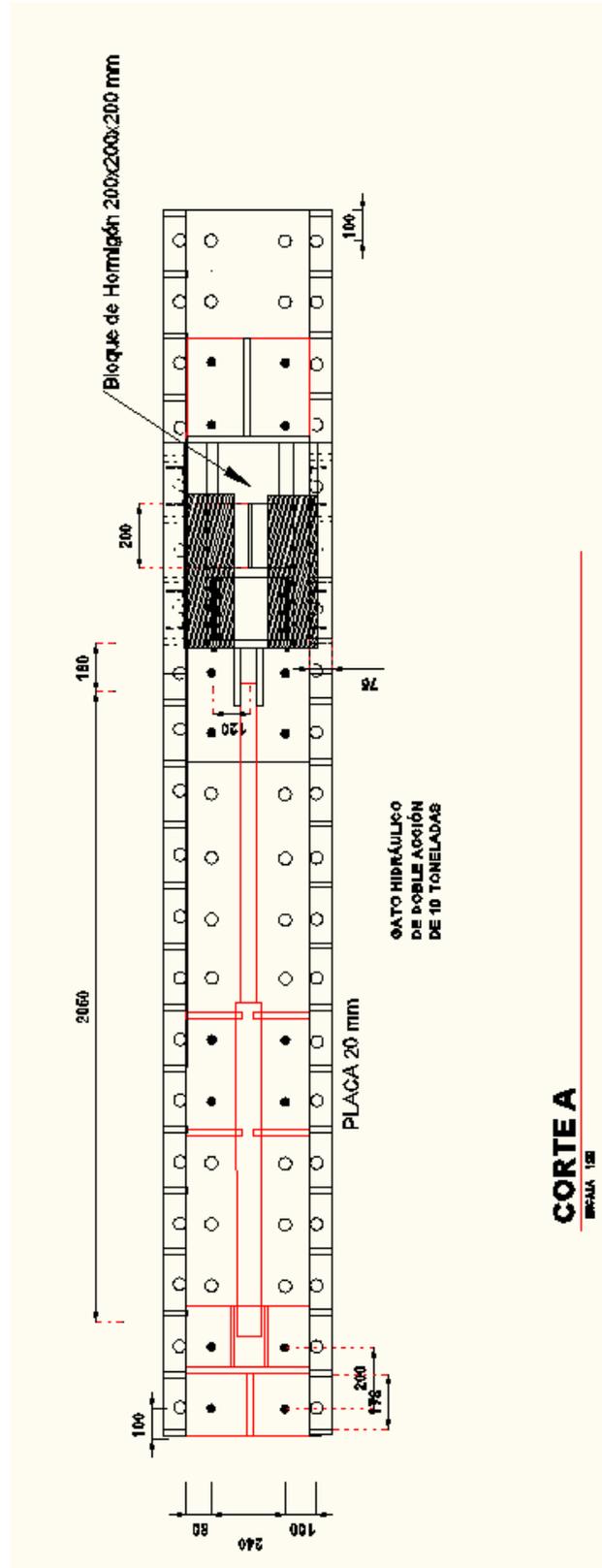


Figura 7.2: Vista en planta de mecanismo del ensayo cíclico

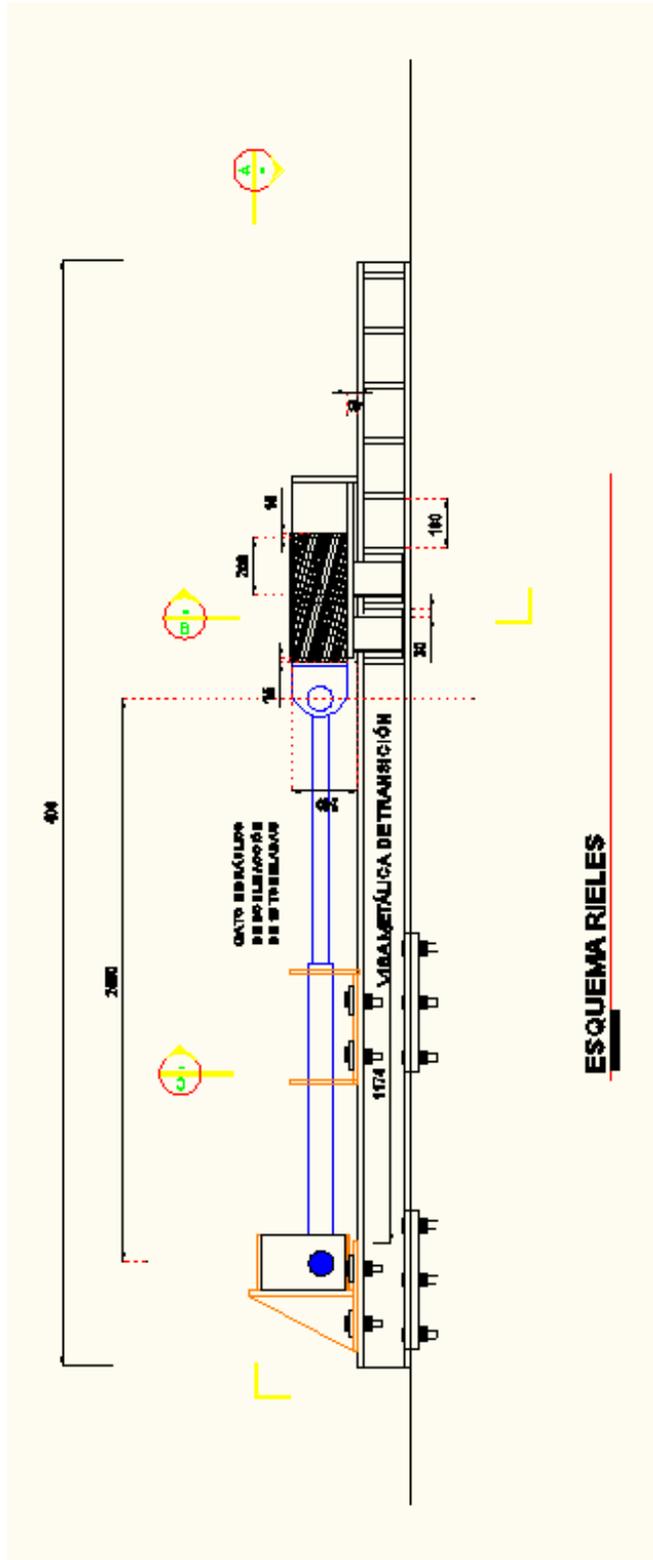


Figura 7.3: Vista lateral de mecanismo del ensayo cíclico

Para la realización del ensayo se confeccionan 6 sistemas como los mostrados anteriormente, de los cuales tres tienen barras de refuerzo de 12 mm ,A630-420H y tres tienen barras A440-280H (del mismo diámetro), de las cuales 2 de cada tipo eran soldadas y 1 de cada tipo de acero queda sin soldar como barra de comparación.

Estos bloques de hormigón se colocan en una viga a la cual se le ajusta un gato hidráulico el cual es el encargado de proveer la carga de bajo ciclo necesaria para el ensayo.

Se coloca instrumentación tipo L.V.T para la medición de la deformación producida por la carga aplicada por el gato.

7.4.1 Diseño del sistema para provocar pandeo en las barras

Cargas de diseño

El sistema fue diseñado de tal forma que el pandeo provocado por la fuerza horizontal aplicada por el gato hidráulico, sea tomado por la barra de 12 mm de diámetro. Así se tienen los siguientes valores que resiste la barra, tanto la fuerza que provoca la fluencia como la última:

Tabla 7.1: Fluencia y rotura según el tipo de acero para 12 mm de diámetro

A630-420H		A440-280H	
Fy [Tonf]	Fu [Tonf]	Fy [Tonf]	Fu [Tonf]
4,8	7,0	3,2	5,0

Luego todo el diseño de la estructura que permite el pandeo de la barra de refuerzo es capaz de resistir estas solicitaciones.

Con el fin de lograr que se pandee completamente la barra se debe dejar un espacio superior al requerido por la soldadura según lo indicado en 4.3.2, de manera de evitar

que el confinamiento producido por los bloques impida el normal desenvolvimiento de la barra de refuerzo.

Anclaje de bloques de hormigón

Los bloques se diseñaron de tal forma que uno se mantiene fijo en la viga de transición mediante pernos que atraviesan el bloque y mediante una placa, también fija, con pernos tanto en la viga de transición como en el mismo bloque de hormigón.

Anclaje gato hidráulico

Una vez definida la geometría y la armadura de refuerzo vertical de los muros se diseñaron las bases de anclaje, de modo de asegurar que estas no presentaran falla alguna durante el transcurso de los ensayos.

Para el cálculo de los esfuerzos de diseño de las bases de anclaje, se realizó un modelo de elementos finitos de las bases. Para el cálculo del momento solicitante que tracciona la fibra inferior, se consideró la sección derecha de la Figura 7.3, sometida a flexión por la resultante de las tensiones de compresión actuantes en la base.

Determinación del espacio entre bloques

Un aspecto importante en el diseño de este sistema y que es importante destacar, es la determinación del espacio entre bloques, en el cual la barra de refuerzo queda expuesta y el que debe ser suficiente para que se produzca el pandeo. Además de lo anterior se tienen restricciones de espacio, debido a que la viga de transición posee solo 4 m de largo.

Así y todo se decidió tener aproximadamente 200 mm, los cuales son necesarios para tener un cierto espacio donde poder soldar las probetas de manera cómoda. Esta medida se verifica como sigue:

Cálculo del largo de pandeo

$$\text{Tonf} := 1000\text{kgf}$$

$$E := 200000\text{MPa}$$

$$L := 200\text{mm}$$

$$r := 6\text{mm}$$

$$I := \frac{\pi \cdot r^4}{4} = 1.018 \times 10^3 \cdot \text{mm}^4$$

$$P := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} = 5.122\text{Tonf}$$

$$A_{\phi 12} := \pi \cdot r^2 = 113.097\text{mm}^2$$

$$\sigma_{\text{pandeo}} := \frac{P}{A_{\phi 12}} = 444.132\text{MPa}$$

$$f_y := 420\text{MPa}$$

7.4.2 Diseño del sistema de pandeo

La idea del sistema de ensayo es que se provoque un pandeo en la barra soldada, de forma similar a como sucede en una columna en una sollicitación sísmica (ver Imagen 7.1), esto es como si estuviera completamente confinada en el hormigón y actuase como si estuviese empotrada (véase Figura 7.4)

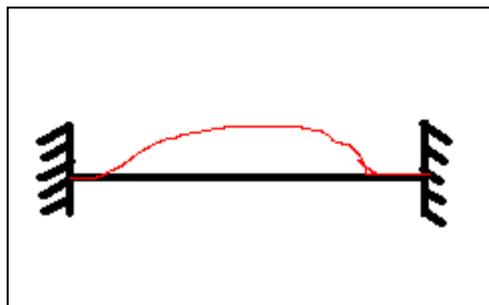


Figura 7.4: Comportamiento empotrado de la barra

En este sentido se debe tener especial cuidado en evitar las rótulas existentes en el sistema en dos puntos (véase Figura 7.5):

- La unión del gato a la placa que lo sostiene
- La unión gato-bloque de hormigón móvil.

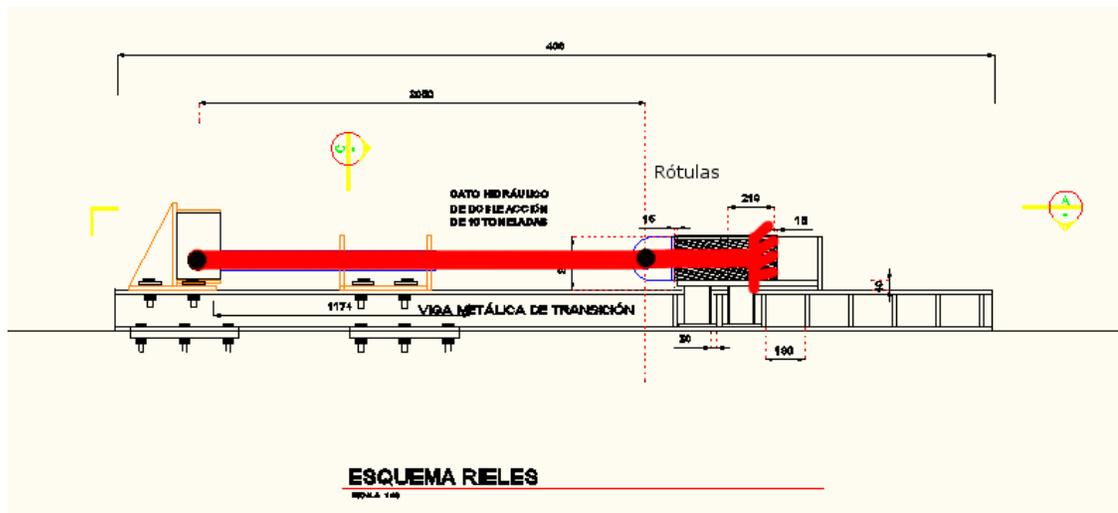


Figura 7.5: Formación de rótulas en el sistema de ensayo

Para evitar este comportamiento inadecuado, se agrega un tercer elemento, al sistema de rieles, que provoca una disminución del largo de pandeo del sector del gato hidráulico disminuyendo con ello su rigidez, y asegurando que el sector donde se provoque el pandeo sea efectivamente donde se encuentra la soldadura.

7.4.3 Sistema de guías

De modo de evitar el movimiento vertical y/o horizontal de los bloques de hormigón y que con ello se obtengan valores distintos a los esperados. De esta forma se coloca un sistema de arco que impide el levantamiento del bloque, teniendo entre este y el bloque una plancha de 1/8" de teflón para lograr un desplazamiento suave.

Asimismo para evitar el movimiento hacia los lados, se coloca un sistema de planchas de acero. La disposición de estos sistemas puede verse en la Figura 7.6.

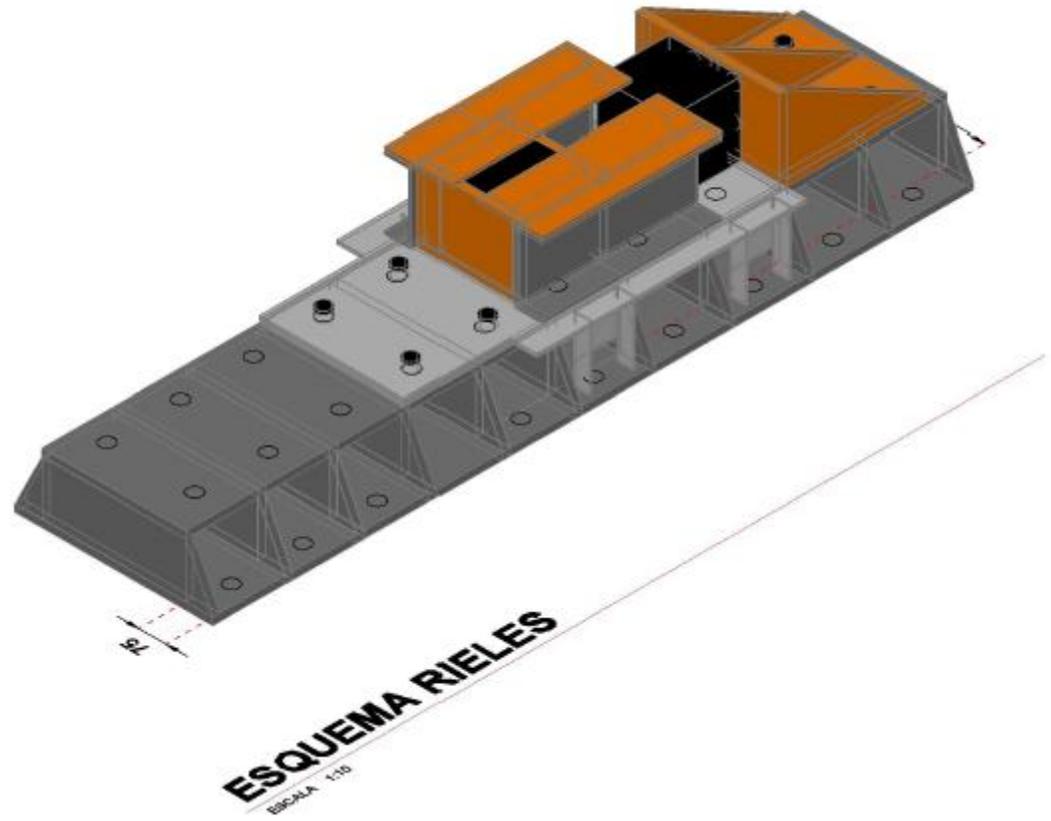


Figura 7.6: Esquema sistema guía del sistema de ensayo (no se incluye otros elementos)

7.5 Segundo diseño

Para la realización del ensayo se confeccionan 6 muros, provistos de 2 barras de 10 mm de diámetro en cada una de sus puntas, de los cuales 3 son de acero A630-420H y 3 son de acero A440-280H. Asimismo 4 muros fueron empalmados mediante soldadura en su parte inferior de forma similar a la del ensayo de tracción, teniendo 2 muros sin soldar que se utilizaran como referencia para cada uno de los tipos de acero, tal como se indica en la Figura 7.7. Estos muros se colocan en un marco al cual se le ajusta un gato hidráulico el cual es el encargado de proveer la carga de bajo ciclo necesaria para el ensayo (véase Figura 7.8).

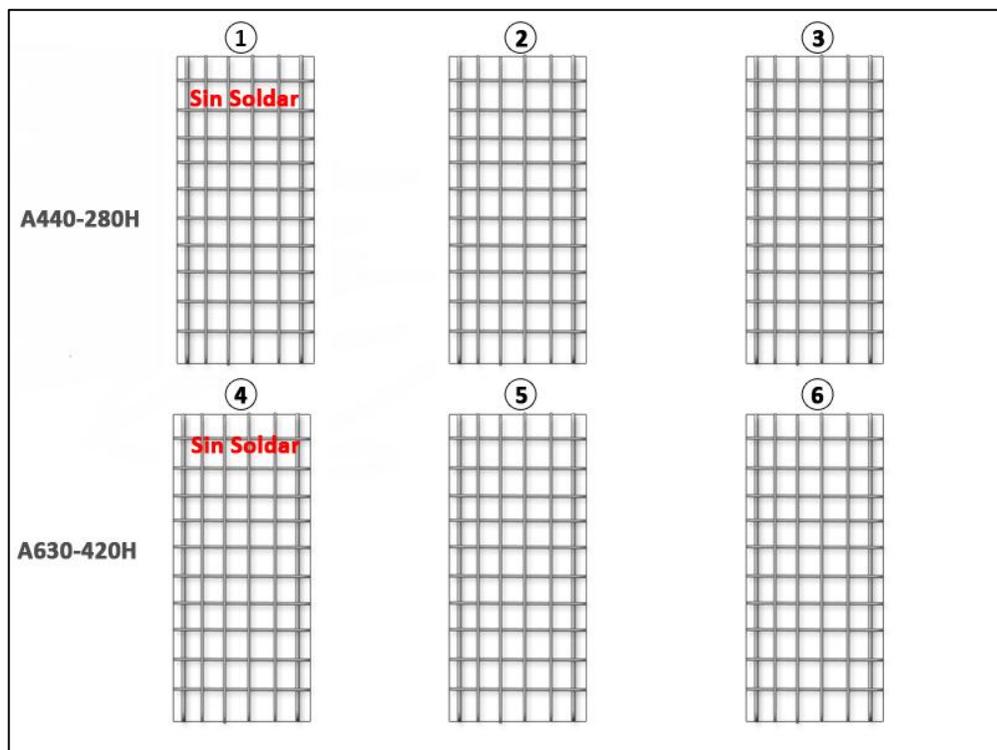


Figura 7.7: Esquema ilustrativo de los muros a ensayar.



Figura 7.8: Gato Hidráulico



Figura 7.9: conexión del gato hidráulico con el muro.

7.5.1 Diseño de los muros sometidos a ensayo

Cargas de diseño

Los muros se diseñaron de tal forma que la flexión producida por la fuerza vertical aplicada por el gato hidráulico, sea tomada por las 2 barras de 10 mm de diámetro.

Para el cálculo del esfuerzo de corte que produce la fluencia por flexión (entrando al estado límite último), se fijó la deformación unitaria del hormigón en $\varepsilon_c = 0.3\%$ y se realizó un proceso iterativo que varió la posición del eje neutro, hasta cumplir la condición de equilibrio C=T (Esfuerzo de compresión=Esfuerzos de tracción), de esta forma se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 7.2: Corte máximo admisible según el tipo de acero.

Tipo de acero	Corte máximo [Tonf]
A630-440H	3
A440-280H	2

Refuerzo de muro

Los muros se diseñaron de tal forma que la flexión producida por la fuerza vertical aplicada por el gato hidráulico, sea tomada por las 2 barras de 10 mm de diámetro.

Para el caso del refuerzo de corte se opta por una malla electrosoldada, la cual tiene como única finalidad evitar el fisuramiento del hormigón, ya que el refuerzo requerido de hormigón es mucho menor que el mínimo requerido. Según lo indicado en el ACI 318 se utiliza una cuantía de $\rho = 0.0025$ tanto para el refuerzo horizontal como para el vertical en dos capas paralelas a las caras del muro, esto significa una malla AT 56-50 espaciada a 15 cm de cada barra de 6 mm.

Viga de fundación

Una vez definida la geometría y la armadura de refuerzo vertical de los muros se diseñaron las bases de anclaje, de modo de asegurar que estas no presentaran falla alguna durante el transcurso de los ensayos.

Para el cálculo de los esfuerzos de diseño de las bases de anclaje, se realizó un modelo de elementos finitos de las bases. Para el cálculo del momento solicitante que tracciona la fibra inferior, se consideró la sección derecha de la Figura 7.10, sometida a flexión por la resultante de las tensiones de compresión actuantes en la base.

El momento solicitante más importante que tracciona la fibra superior de la base de anclaje, se produce por la reacción de los pernos de alta resistencia que conectan la base de anclaje con la viga inferior del marco.

Para el diseño al corte de la base de anclaje inferior, se adoptaron los esfuerzos obtenidos del modelo de elementos finitos que considera la interacción de los pernos de alta resistencia, que unen la base de anclaje a la viga inferior del marco de carga, y las barras de refuerzo vertical, obteniendo así un refuerzo de corte último de 8.66 Tonf, que determinó el uso de $E\phi 8@10$.

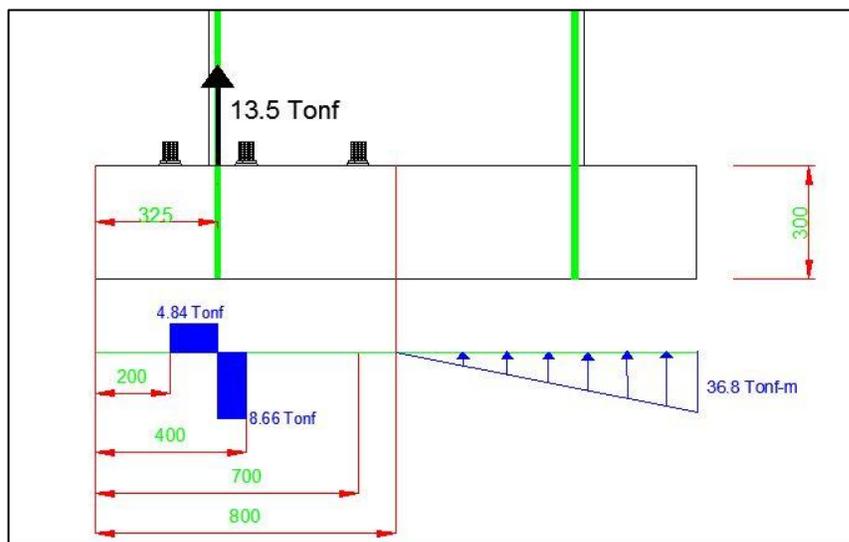


Figura 7.10: Secciones críticas en la base del anclaje

7.6 Desplazamientos laterales y resultados esperados

Debido a las características del sistema cíclico construido para provocar pandeo en la barra, la máxima tensión que sentirá la barra de refuerzo es aproximadamente la de fluencia. Esto se basa en antecedentes experimentales y analíticos que se encuentran indicados en (Mau, y otros, 1989) y que se encuentran reflejados en la Figura 7.12, donde se grafican los resultados en términos de tensión versus deformación para diversos valores de e/d y L/d .

El caso puntual de esta memoria es $L/d=18$ que puede analizarse siguiendo la curvatura de la línea de $L/d=10$ o en el caso de la curva siguiente siguiendo la de $L/r=30$ (donde r :radio).

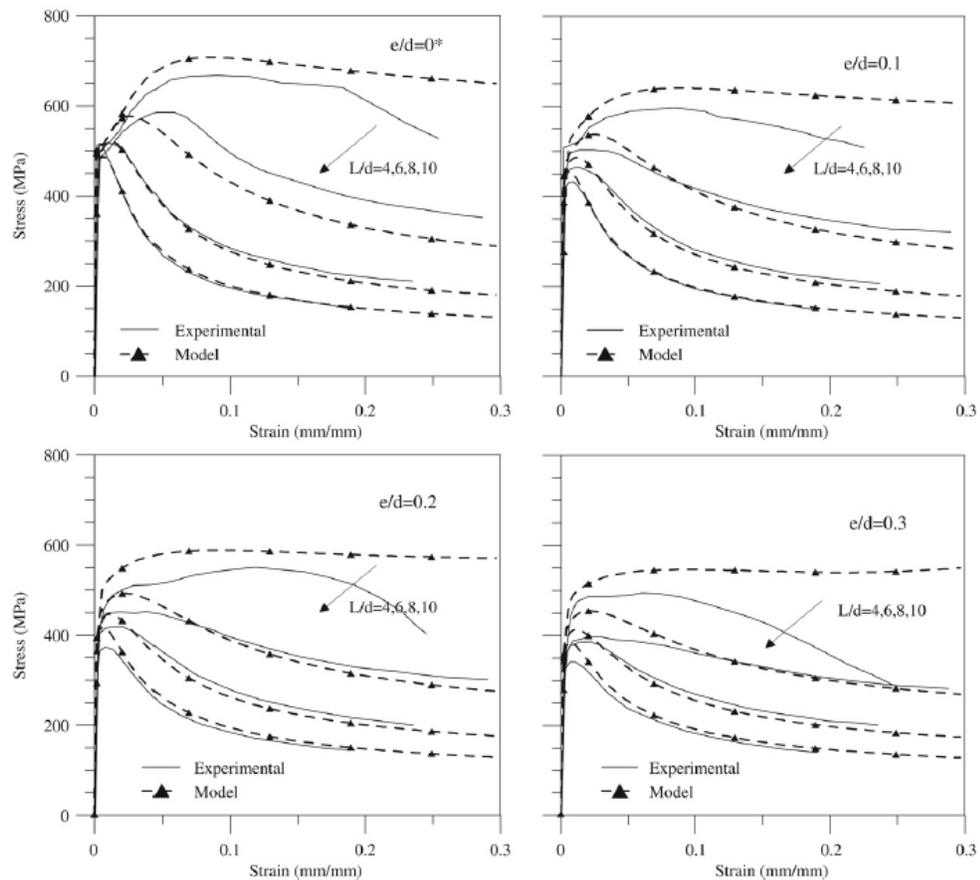


Figura 7.12: Tensión versus deformación para diversos valores de e/d y L/d

8 CONCLUSIONES

8.1 Ensayo a tracción

Se observa que hay cumplimiento de los valores requeridos de fluencia y rotura para casi todas las barras ensayadas, sin embargo para la muestra realizada con barras empalmadas en uno de los casos, no se alcanzó a tener la resistencia requerida por la normativa, pudiendo atribuirse esto último al sobrecalentamiento de la ZAT (zona afectada térmicamente) y posterior enfriamiento rápido debido a la mayor longitud de soldadura usada en esta probeta (véase Figura 5.14). Además se observa que en la medida que se disminuye el diámetro de la barra hay una mayor fragilidad de estas, lo cual se evidencia en una pérdida de ductilidad algo mayor que las de diámetros mayores, esto se explica por el consumo del acero de esta barra al aplicar calor para unirlos.

Adicionalmente se hace hincapié en que siempre se ha utilizado la misma maquinaria para los ensayos a excepción de 3 barras que se hizo en una máquina distinta, esto es para que se obtengan resultados comparables de la curva completa tensión-deformación. Dependiendo el tipo de máquina puede ser más o menos sensible en la captura de datos entregando mejor caracterizada la curva tensión-deformación. Esto puede observarse al comparar los gráficos individuales en los puntos A.2.5 y A.2.6 del anexo.

Se observa cumplimiento de la normativa Nch 204, en cuanto a resistencia mecánica y deformación de casi todas las barras, las únicas que no cumplieron con la deformación fueron las barras a solapo, las cuales además mostraron los peores resultados tanto en el cociente entre la tensión de rotura y fluencia de la Figura 8.1 y la deformación máxima mostrada en la Figura 8.2. Adicionalmente se tiene que aunque tienen cumplimiento de las propiedades requeridas las probetas A (acero de calidad A440-280H) son los que tienen un menor cociente rotura/fluencia (Figura 8.1) y menos deformación máxima, teniéndose en general una menor pérdida de propiedades al

soldarse de los aceros de calidad A630-420H , por sobre los A440-280H y un comportamiento mejor de las barras soldadas a tope indirecto por sobre las a solapo.

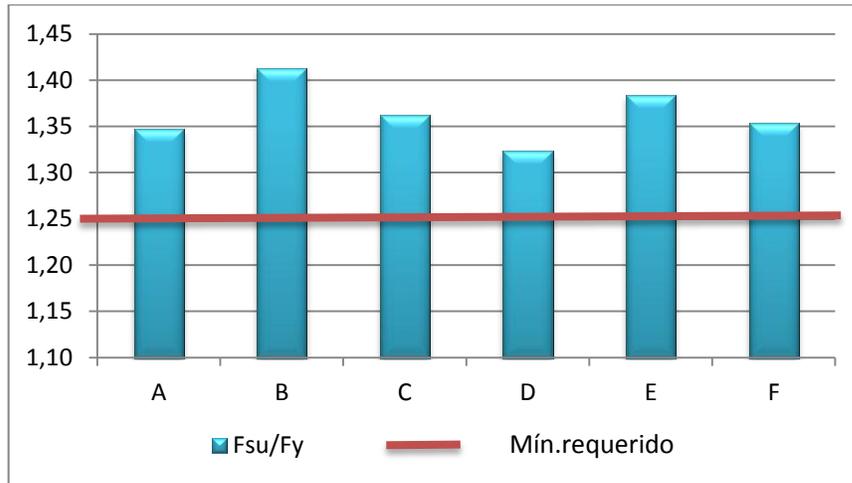


Figura 8.1: Gráfico comparativo del cociente entre la tensión de rotura y fluencia de los diversos tipos de probetas

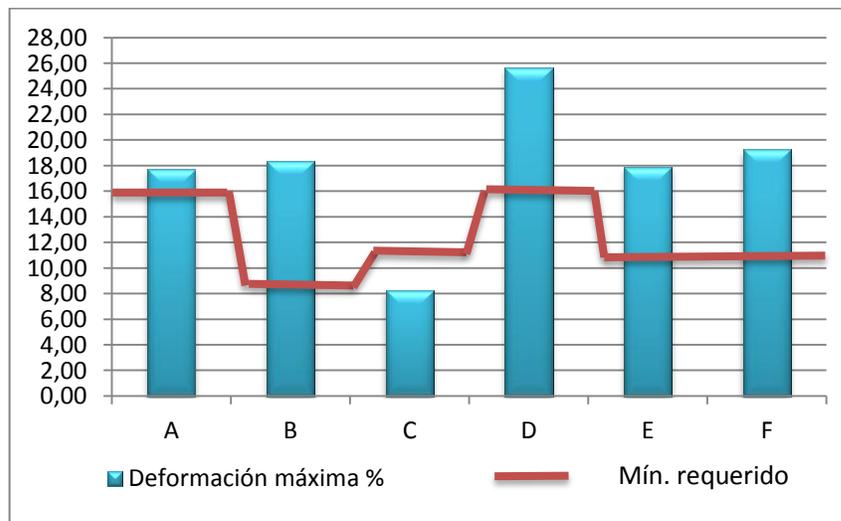


Figura 8.2: Gráfico comparativo de la deformación máxima de los distintos tipos de probetas y del mínimo requerido según norma.

Al comparar esta memoria con la de Capelli en la sección 5.9, se puede concluir la importancia en la cantidad de carbono en las barras, teniéndose que en la medida que exista más o menos de ella, se pueden obtener resultados distintos, para las demás

variables iguales. En el caso de Capelli, él tiene un rango de carbono equivalente en sus barras de entre 0,47-0,52 para calidad A440-280H y 0,68-0,78 para barras de calidad A630-420H (véase Tabla 5.6 y Tabla 5.7), valores con los cuales obtiene resultados desfavorables en sus probetas soldadas, evidenciando pérdida de ductilidad y fallas en la soldadura (véase Figura 5.30, Figura 5.31 y Figura 5.32).

Los resultados obtenidos en esta memoria son muy distintos y no existe fallas dentro de la zona soldada como se evidenciaba en la anterior, siendo la principal diferencia la cantidad mucho menor de carbono equivalente incluida en estas barras, los cuales son de 0,21 para la calidad A440-280H y 0,47-0,52 para calidad A630-420H

En este sentido se apoyan las normativas del AWS para indicar rangos de carbono equivalente (CE) para definir si un acero es más o menos soldable⁸. En este caso puede inferirse los siguientes rangos deseables para trabajar con las barras de refuerzo:

Para acero de calidad A630-420H, no se debe tener más de 0,60 C.E

Para acero de calidad A440-280H, no se debe tener más de 0,50 C.E, valores mayores a los anteriores producen cambios en las variables de la soldadura vistas en el capítulo 4, obteniéndose resultados contraproducentes que podrían afectar propiedades requeridas de ductilidad y resistencia (incluso llegando a casos como los de las Figura 5.31 y Figura 5.32) .

8.2 Diseño ensayo cíclico

De entre los dos diseños expuestos en esta memoria el más fidedigno con la realidad es el que se realiza mediante muros de hormigón armado, puesto que este minimiza los posibles problemas en la toma de datos y en la implementación misma del ensayo debido a que su construcción no es más difícil que un muro de hormigón armado común, en cambio el segundo no entrega resultados tan fidedignos como el primero debido a la posibilidad que los bloques de hormigón se levanten (por más que se hayan tomado las precauciones debidas) y se produzca un pandeo por excentricidad.

⁸ AWS Welding Handbook

8.3 Conclusiones Finales

Según los datos obtenidos de los ensayos experimentales realizados, no se observa una gran diferencia entre una unión soldada y una no soldada, en términos de ductilidad o resistencia, sin embargo, deben ser soldadas con un gran cuidado requiriendo personas especializadas y familiarizadas con las indicaciones de la norma AWS D1.4 y/o D1.1. Esto es tan relevante como la cantidad de carbono que pudiese poseer las barras, lo cual pudo apreciarse en esta memoria debido a la baja cantidad de carbono equivalente presente en las barras ensayadas (Véase Tabla 2.2, Tabla 2.3, Tabla 2.4, Tabla 2.5, Tabla 2.6 y Tabla 2.7).

Así mismo en la medida que las barras sean de menor diámetro la pérdida de ductilidad y endurecimiento prematuro será más notoria y la unión será más delicada de realizar.

Para futuros trabajos se recomienda:

- Realizar un ensayo a tracción con barras de mayor diámetro: en el caso de esta memoria solo se analizaron casos de barras de diámetro pequeño (8, 10 y 12 mm), por lo cual el siguiente paso es el de analizar el comportamiento en barras de mayor diámetro, para analizar si realmente afecta el consumo de acero en este tipo de barras.
- Realizar el ensayo cíclico (“Low Cycle Fatigue”) con uno de los diseños presentados: especialmente interesante en este sentido sería analizar la validez de los modelos teóricos expuestos en el punto 7.6.

9 BIBLIOGRAFÍA

1. **American Society for Metals** ASM Handbook (1990,1992) [Libro]. - 10ª Edición : Vol. 1 y 6.
2. **American Welding Society** Structural Welding Code-Reinforcing Steel (ANSI/AWS D1.4-98) [Informe]. - Miami, Florida : [s.n.], 2005.
3. **Ashby Michael y Jones David RH** Engineering materials 1 An Introduction to their Properties and Applications [Libro]. - Wobum, MA : Butterworth-Heinemann, 2006.
4. **Ashby Michael, Shercliff Hugh y Cebon David** Materials Engineering, Science, Processing and Design [Libro]. - Burlington, MA : Elsevier Ltd, 2007.
5. **Association Française du Genie Parasismique** Le seisme de Hyoko-Ken Nambu (Kobé , Japon) du Janvier 1995. Rapport de la misión AFPS. [Informe]. - 1995.
6. **Brown Jeff y Kunnath Sashi K** Low-Cycle Fatigue Failure of Reinforcing Steel Bars [Publicación periódica] // ACI Materials Journal. - 2004. - págs. 457-466.
7. **Capelli Ghiglini Bruno** Estudio de la soldabilidad en barras de acero para hormigón armado. - Santiago : [s.n.], 1987. - Memoria de Título.
8. **Castilla C Enrique, Fernandez Norberto y Guerrero Aimé** Evaluación del comportamiento de barras de caero con bajo contenido de carbono soldadas a tope y sometidas a ciclos severos de carga axial [Informe]. - Caracas : [s.n.], 2001.
9. **Dodd LL y Restrepo-Posada JI** Model for predicting cyclic behavior of reinforcing steel [Sección de libro] // Journal Structural Engineering. - 1995.
10. **Equipo técnico del sitio Dr Weld** [En línea]. - <http://www.drweld.com/Procesos.html>.

- 11. Fernandez Guerrero, Guerrero Aimé y Castilla Enrique** Evaluación del comportamiento de barras de acero con bajo contenido de carbono soldadas a tope y sometidas a ciclos severos de carga axial [Informe]. - Caracas : [s.n.], 2001.
- 12. Holden Tony, Restrepo Jose y Mander John B.** Seismic Performance of Precast Reinforced and Prestressed Concrete Walls [Publicación periódica] // Journal of Structural Engineering. - 1 de Marzo de 2003. - 3 : Vol. 129. - págs. 286-296.
- 13. Indura s.a** Manual de sistemas y materiales de soldadura [Libro]. - 2007.
- 14. Jimenez Montoya Pedro, García Meseguer Álvaro y Morán Cabré Francisco** Hormigón Armado [Libro]. - Barcelona : Gustavo Gili,SA, 2000. - 14.
- 15. Lacaze Cecile** Estudio y modelamiento del impacto del pandeo en la fatiga de bajos ciclos en barras longitudinales para hormigón armado. - Santiago de Chile : [s.n.], 2008.
- 16. Mander J.B, Panthaki F.D y Kasalanati A.** Low-Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel [Sección de libro] // Journal of Materials in Civil Engineering. - 1994. - Vol. 6.
- 17. Massone L.M y Moroder D.** Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections [Sección de libro] // Engineering Structures. - 2009.
- 18. Mau S.T y El-Mabsout** Inelastic Buckling of Reinforcing Bars [Sección de libro] // Journal of Engineering Mechanics. - 1989. - Vol. 115.
- 19. Rodriguez Mario E. y Rodriguez Asabay Javier** Se debe evitar la soldadura de barras de refuerzo en estructuras de concreto reforzado en zonas sísmicas de México [Sección de libro] // Revista de Ingeniería Sísmica. - 2006.
- 20. Shen C. [y otros]** A two-surface model for steels with yield plateau [Publicación periódica] // Structural Eng./Earthquake Eng.. - Enero de 1992. - 4 : Vol. 8. - págs. 179-188.

21. Zuzuki H Soldabilidad de los modernos aceros de construcción [Libro]. -
Houdremont : [s.n.], 1982.

A ANEXOS

A.1 Fichas de electrodos utilizados.

A.1.1 Electrodo E-6010.

INDURA 6010	Clasificación AWS: E-6010 / E-4310
<ul style="list-style-type: none"> • Electrodo para acero al carbono • Revestimiento celulósico sódico. Color rojo • Toda posición 	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente continua, electrodo positivo • Certificado anualmente por American Bureau of Shipping, Lloyd's Register of Shipping, Germanischer Lloyd, Nippon Kaiji Kyokai

Descripción

Electrodo con polvo de hierro en el revestimiento, que permite una velocidad de depósito mayor y una aplicación más fácil, junto con propiedades mecánicas sobresalientes. La estabilidad del arco y el escudo protector que da el revestimiento ayudan a dirigir el depósito reduciendo la tendencia a socavar. Está diseñado según los últimos adelantos técnicos para lograr óptimos resultados prácticos.

Usos

Este electrodo tiene un campo de aplicación muy amplio, en especial cuando es necesario soldar en toda posición.

Aplicaciones típicas

- Estanques
- Tuberías de presión
- Estructuras
- Calderías
- Planchas corrientes y galvanizadas
- Barcos

Procedimiento para soldar

Para obtener los mejores resultados, se recomienda un arco de longitud mediana que permita controlar mejor la forma y aspecto del cordón.

Para soldadura de filetes planos y horizontales, se recomienda mantener el electrodo a 45° con cada plancha, oscilándolo en el sentido del avance. El movimiento adelante tiene por objeto obtener buena penetración y el movimiento hacia atrás controla la socavación y la forma del cordón.

En la soldadura vertical se recomienda llevar el electrodo en un ángulo de casi 90°, inclinándolo ligeramente en el sentido de avance.

Se debe llevar un movimiento de vaivén, alargando el arco para no depositar metal en el movimiento hacia arriba y luego acortándolo para depositar en el cráter y así controlar las dimensiones del depósito y la socavación.

Composición química (típica del metal depositado):

C 0,11%; Mn 0,55%; Si 0,24%; P 0,014%; S 0,008%

Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04):

Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte	Requerimientos	Energía Absorbida Ch-v	Requerimientos
Resistencia a la tracción : 500 MPa	430 MPa	38J a -30°C	27J a -30°C
Límite de fluencia : 414 MPa	330 MPa		
Alargamiento en 50 mm : 26%	22%		

Amperajes recomendados:

Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
2,4	300	60	90	75
3,2	350	80	110	35
4,0	350	110	160	24
4,8	350	150	200	17

A.1.2 Electrodo E-6011.

INDURA 6011	Clasificación AWS: E-6011 / E-4311
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Electrodo para acero al carbono</i> • <i>Revestimiento celulósico potásico. Color canela</i> • <i>Corriente continua, electrodo positivo o corriente alterna</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Toda posición</i> • <i>Certificado por Canadian Welding Bureau y anualmente por American Bureau of Shipping y Lloyd's Register of Shipping</i>

Descripción

El electrodo 6011 posee un revestimiento de tipo celulósico diseñado para ser usado con corriente alterna, pero también se le puede usar con corriente continua, electrodo positivo.

La rápida solidificación del metal depositado facilita la soldadura en posición vertical y sobrecabeza.

El arco puede ser dirigido fácilmente en cualquier posición, permitiendo altas velocidades de deposición (soldadura).

Usos

Este electrodo es apto para ser utilizado en todas las aplicaciones de soldadura en acero dulce, especialmente en trabajos donde se requiera alta penetración.

Aplicaciones típicas

- Cordón de raíz en cañerías
- Cañerías de oleoductos
- Reparaciones generales
- Estructuras
- Planchas galvanizadas

Procedimiento para soldar

Debe seguirse el mismo procedimiento utilizado para soldar con un electrodo E-6010.

Composición química (típica) del metal depositado:

C 0,11%; Mn 0,41%; Si 0,23%; P 0,010%; S 0,017%

Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04):

Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte	Requerimientos	Energía Absorbida Ch-v	Requerimientos
Resistencia a la tracción : 495 MPa Límite de fluencia : 424 MPa Alargamiento en 50 mm : 27%	430 MPa 330 MPa 22%	34J a -30°C	27J a -30°C

Amperajes recomendados:

Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
2,4	300	50	90	74
3,2	350	80	120	34
4,0	350	120	160	24
4,8	350	160	220	17

A.1.3 Electrodo E-7018

INDURA 7018-AR

Clasificación AWS: E-7018 / E-4918

- Electrodo para acero al carbono
- Revestimiento bajo hidrógeno con hierro en polvo. Color gris
- Toda posición
- Corriente continua, electrodo positivo

Descripción

Electrodo de bajo contenido de hidrógeno.

Se caracteriza por depósitos de calidad radiográfica, arco fácil de establecer, excelentes características operativas, fácil desprendimiento de escoria y excelente presentación.

Usos

Se recomienda para trabajos donde se requiera una alta calidad radiográfica.

Aplicaciones típicas

- Construcción
- Reparación de buques
- Plataformas petroleras
- Cañerías, etc.

Procedimiento para soldar

Para soldaduras de filetes horizontales y trabajo de soldadura en sentido vertical descendente, debe usarse un arco corto. No se recomienda la técnica de arrastre.

En soldadura en posición sobrecabeza debe usarse un arco corto con ligero movimiento oscilatorio en la dirección de avance.

Debe evitarse la oscilación brusca del electrodo. Para mayores detalles ver página 33. Observe las recomendaciones para almacenaje de los electrodos, página 20.

Composición química (típica) del metal depositado:

C 0,09%; Mn 1,05%; Si 0,55%; P 0,020%; S 0,015%

Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04):

Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte	Requerimientos	Energía Absorbida Ch-v	Requerimientos
Resistencia a la tracción : 572 MPa Límite de fluencia : 475 MPa Alargamiento en 50 mm : 31%	490 MPa 400 MPa 22%	135J a -30°C	27J a -30°C

Amperajes recomendados:

Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
2,4	300	60	110	52
3,2	350	100	160	26
4,0	350	130	210	19
4,8	350	190	280	14

A.1.4 Electrodo E-8018-C1

INDURA 8018-C1	<i>Clasificación AWS: E-8018-C1</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Electrodo para acero de baja aleación • Revestimiento potásico, bajo hidrógeno con hierro en polvo. Color blanco • Toda posición 	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente continua, electrodo positivo • Certificado anualmente por American Bureau of Shipping, Lloyd's Register of Shipping, Germanischer Lloyd y Nippon Kaiji Kyokai

Descripción

El electrodo 8018-C1 es de bajo contenido de hidrógeno difusible (menor o igual a 5 ml / 100 gr) y de alta resistencia.

Su depósito posee un 2,5% de níquel, lo que le da excelentes propiedades mecánicas y lo hace apto para soldaduras que requieren resistencia al impacto a bajas temperaturas.

Posee muy buenas características operativas como también excelente calidad radiográfica.

Usos

El electrodo está diseñado para aceros de grano fino, normalizados ASTM A 516 Gr. 70 y otros de resistencia similar, como también aceros de grano fino para aplicaciones criogénicas, donde la resistencia al impacto es necesaria.

Aplicaciones típicas

- Refinerías
- Recipientes a presión para gases licuados
- Equipo pesado
- Instalaciones sometidas a bajas temperaturas
- Equipos de refrigeración

Procedimiento para soldar

El arco debe mantenerse lo más corto posible en todo momento, pudiendo usarse una oscilación muy suave para controlar la forma y ancho del cordón.

En soldadura plana no debe oscilarse más de 2,5 veces el diámetro del electrodo. Para mayores detalles ver página 33.

Debe observarse cuidadosamente las recomendaciones de almacenamiento de los electrodos (página 20).

Composición química (típica) del metal depositado:

C 0,04%; Mn 0,94%; Si 0,28%; P 0,015%; S 0,009%; Cr 0,06%; Ni 2,49%; Mo 0,02%

Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.5-96):

Tratamiento Térmico	Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte	Requerimientos	Energía Absorbida Ch-v	Requerimientos
605°C x 1 hr.	Resistencia a la tracción: 610 MPa Límite de fluencia : 520 MPa Alargamiento en 50 mm : 26%	550 MPa 480 MPa 19%	60J a -59°C	27J a -59°C

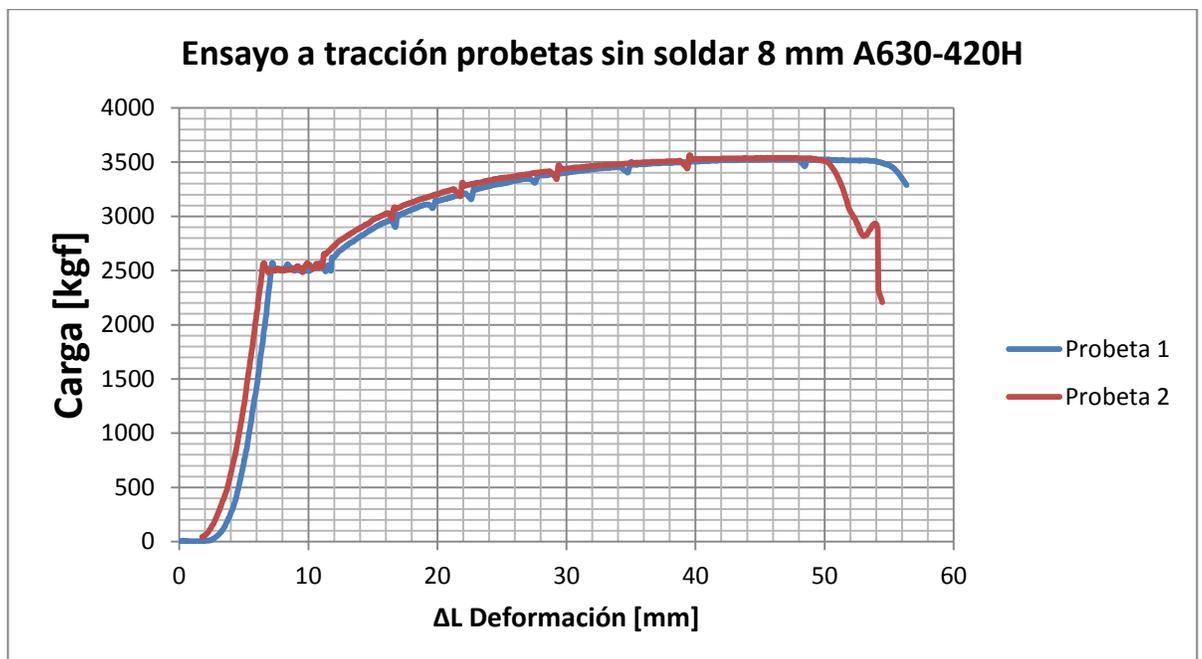
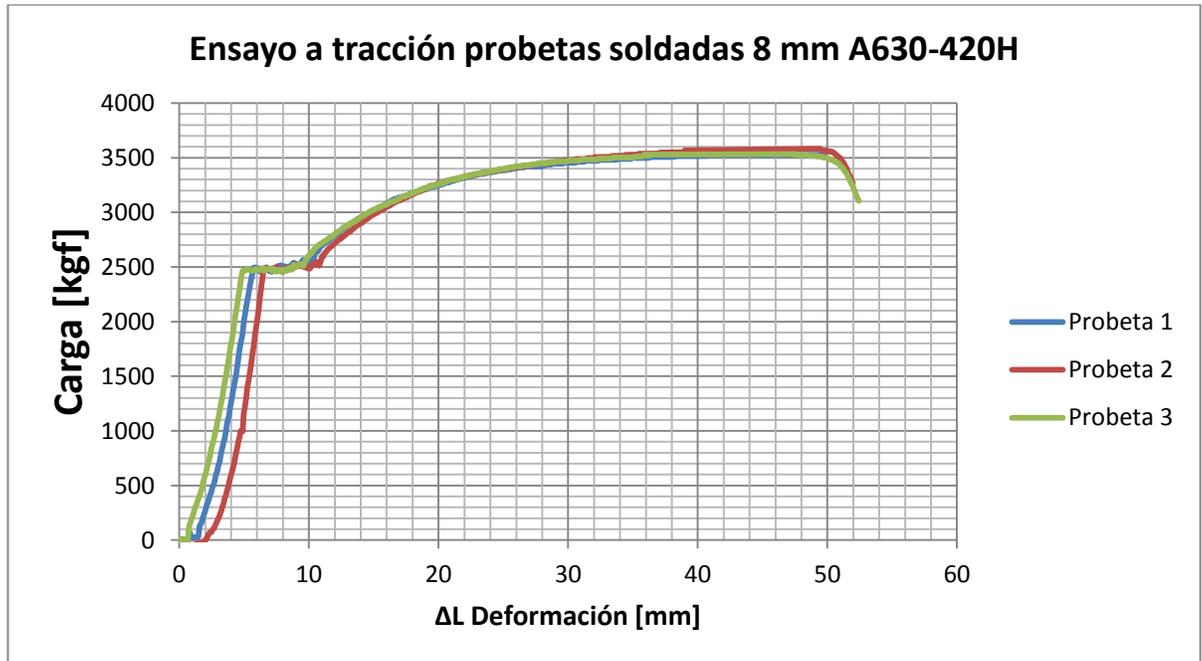
Amperajes recomendados:

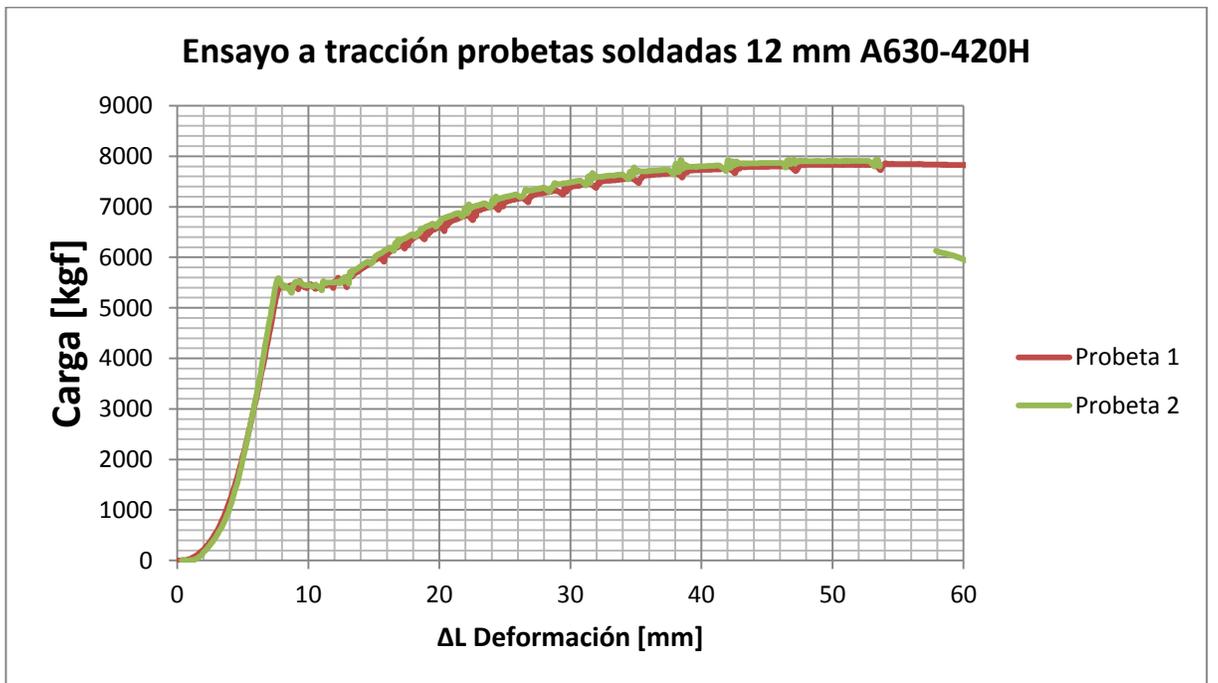
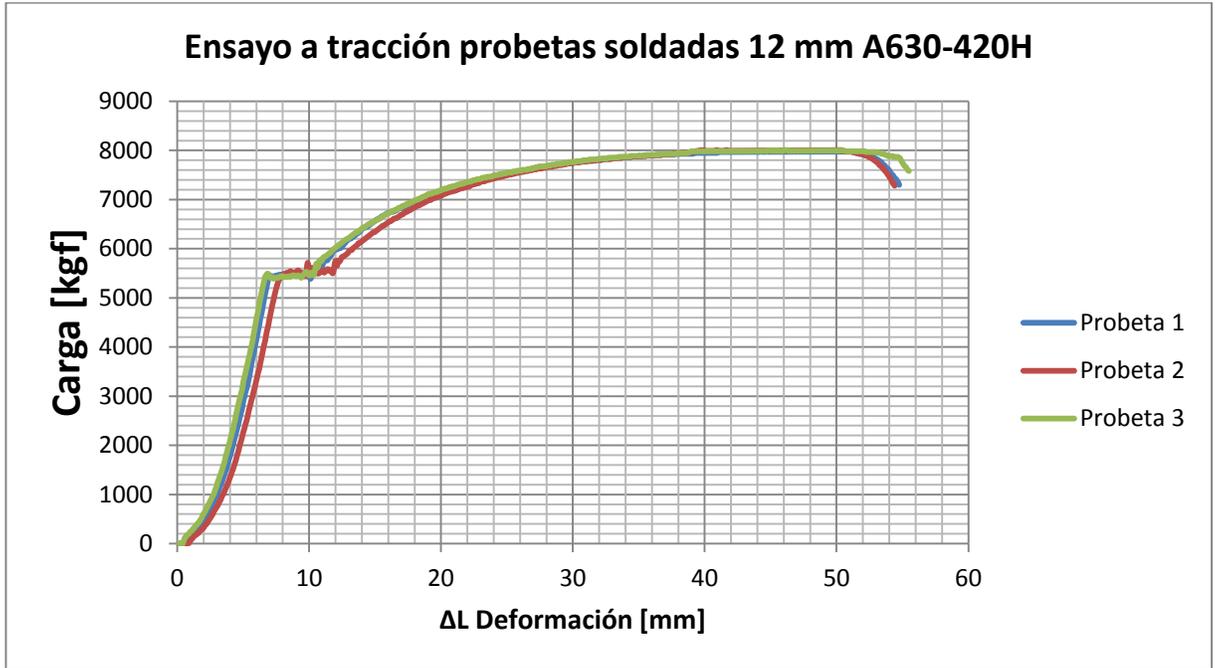
Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
*2,4	300	70	100	66
3,2	350	100	150	32
4,0	350	140	200	25
4,8	350	180	250	11

* Electrodo fabricado a pedido

A.2 Resultados de los ensayos a tracción

A.2.1 Acero A630-420H soldado a tope indirecto





FABRICA **QJEL** : Gerdau Colina Gerdau Renca OTRA

Nº DE CONTROL :

INFORME Nº :

FECHA PRODUCCIÓN :

PRODUCCIÓN CONTROLADA : BARRA ROLLO ENDEREZADO kg

RESALTES : CON RESALTES LISO

COLADA : **20-06-2013 56L-D-07**

DIAMETRO NOMINAL : **8** mm

CALIDAD ACERO NOMINAL : A630 A440

TURNO : DÍA NOCHE

CÓDIGO MATERIAL :

MUESTREADO POR : IDIEM CLIENTE

PERSONAL ENTREGA / RECIBE : INICIALES..... / INICIAL ES.....

FECHA MUESTREO :

RE ENSAYO : SI NO HORA:

INFORME ANTERIOR Nº :

Nº DE CONTROL ANTERIOR :

INSTRUMENTO : MÁQUINA

MARCA	ESCALA
AMSLER (15 lt)	0,5 1 1,5 (5) 10 15
MFL (600 kN)	60 120 300 600
LOSEN (100 lt)	10 50 100
SHIMADZU (500 kN)	10 25 50 100 250 500

INSTRUMENTO : REGLA

MARCA Y/O N° SERIE : Red Line LE-012-014 Alb 011A A/o LE-12/013

Periquín F-30 Otra

PIE DE METRO : Mitutoyo 10197487 Vela C/5005 Somet 9N01361

Mitutoyo 0010959 Mitutoyo 60553930 Otro

CINTA MÉTRICA : Stanley 29070604 Stanley MT0816107 Stanley B40122

Stanley M10816104 Otra

CUNA : **4 - 10** MARCADOR : 10 mm Otro.....

EXTENSÓMETRO : **USHIMADZU 25-25-50** AMSLER Lo=51 mm

VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA :

VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA :

Tº ENSAYO DE TRACCIÓN :

Tº ENSAYO DE DOBLADO :

RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Probeta	Lectura Máquina		Lectura Corregida		Alargamiento de ruptura (%)	Doblado B / M	Tipo de rotura D / F	Ubicación dentro del 1/3 central S / N
	Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima				
Nº	<input type="checkbox"/> kN	<input type="checkbox"/> kgf	<input type="checkbox"/> kN	<input type="checkbox"/> kgf				
1	2473	3471	2473	3471				
2	2473	3471	2473	3471				
3	2473	3471	2473	3471				
4								
5								
6								
7								
8								

Marcas de la probeta

I C

AS

CAP

OTRA

Determinación de la fluencia

Límite superior de fluencia

0,2% de la deformación permanente

Longitud nominal

Veredicto

Aprobada

Pendiente

Rechazada

Comentarios

Ensayo

Fecha Ensayo

Revisó

Fecha Revisión

P. Kae

REGISTRO ENSAYOS DE BARRAS PARA HORMIGÓN ARMADO
SEGÚN NORMA NCH204.0F2006

Hoja

FÁBRICA : Gerdau Colina Gerdau Renca OTRA.....

Nº DE CONTROL :

INFORME Nº :

FECHA PRODUCCIÓN :

PRODUCCIÓN CONTROLADA :

TIPO : BARRA ROLLO ENDEREZADO kg

RESALTES : CON RESALTES LISO

COLADA : *Perforados / soldados*

DIAMETRO NOMINAL : *8* mm

CALIDAD ACERO NOMINAL : A630 A440

TURNO : DÍA NOCHE

CÓDIGO MATERIAL :

MUESTREO POR : DIAM CLIENTE

PERSONAL ENTREGA / RECIBE : INICIALES..... / INICIALES.....

FECHA MUESTREO : HORA:

REENSAYO : SI NO

INFORME ANTERIOR Nº : No aplica

Nº DE CONTROL ANTERIOR : No aplica

INSTRUMENTO	MARCA	ESCALA				
		0.5	1	1.5	(5)	10
MÁQUINA	AMSLER (15-IF)	60	120	300	600	
	MFL (600 kN)	10	50	100		
	LOSEN (100-IF)	10	25	50	100	250
SHIMADZU (500 kN)						
MARCA Y/O N° SERIE						
INSTRUMENTO	<input type="checkbox"/> Red Line LE-012-014 <input type="checkbox"/> Alo 01/A <input type="checkbox"/> Alo LE-12/013 <input type="checkbox"/> Penquín F-30 <input type="checkbox"/> Otra					
REGLA	<input type="checkbox"/> Mitutoyo 10107487 <input type="checkbox"/> Veko C/5005 <input type="checkbox"/> Somet 0N01361 <input type="checkbox"/> Mitutoyo 0010959 <input type="checkbox"/> Mitutoyo 00553030 <input type="checkbox"/> Otro					
PIE DE METRO	<input type="checkbox"/> Stanley 20070604 <input type="checkbox"/> Stanley M10816107 <input type="checkbox"/> Stanley 840122 <input type="checkbox"/> Stanley M10816104 <input type="checkbox"/> Otra					
CINTA MÉTRICA	<input type="checkbox"/> MARCHADOR: <input type="checkbox"/> 10 mm <input type="checkbox"/> Otro.....					
CUÑA:	<input type="checkbox"/> Shimadzu 25-25-50 <input checked="" type="checkbox"/> Amsler Lo=51 mm					
EXTENSÓMETRO	mm/min					
VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA	mm/min					
VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA	mm/min					
Tº ENSAYO DE TRACCIÓN	°C					
Tº ENSAYO DE DOBLADO	°C					

RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Probeta	Lectura Máquina		Lectura Corregida		Alargamiento de ruptura (%)	Doblado B / M	Tipo de rotura D / F	Ubicación dentro del 1/3 central S / N
	Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima				
Nº	<input type="checkbox"/> kN	<input checked="" type="checkbox"/> kgf	<input type="checkbox"/> kN	<input checked="" type="checkbox"/> kgf			D / F	S / N
1		2421		3132				
2		2421		3132				
3		2430		3132				
4								
5								
6								
7								
8								

Marcas de la probeta

GD
 AS
 CAP
 OTRA

Determinación de la fluencia

Límite superior de fluencia
 0.2% de la deformación permanente

Longitud normal

Verificado

Aborbada

Pendiente

Rochazada

Comentarios

Ensayó

Fecha Ensayo

Revisó

Fecha Revisión

REGISTRO ENSAYOS DE BARRAS PARA HORMIGÓN ARMADO
SEGÚN NORMA NCh204.Of2006

Hoja

FÁBRICA AZELER QUEREBÓ : Gerdau Colina Gerdau Renca OTRA

Nº DE CONTROL :

INFORME Nº :

FECHA PRODUCCIÓN :

PRODUCCIÓN CONTROLADA :

TIPO : BARRA ROLLO ENDEREZADO

RESALTES : CON RESALTES LISO

COLADA : *Pdo. 10*

DIÁMETRO NOMINAL : 10 mm

CALIDAD ACERO NOMINAL : A630 A440

TURNO : DÍA NOCHE

CÓDIGO MATERIAL :

MUESTREADO POR : IDIEM CLIENTE

PERSONAL ENTREGA / RECIBE : INICIALES / INICIALES

FECHA MUESTREO :

RENSAYO : SI NO

INFORME ANTERIOR Nº :

Nº DE CONTROL ANTERIOR :

INSTRUMENTO : MARCA : ESCALA :
 AMSLER (15 lf) : 0,5 1 1,5 5 15
 MFL (600 kN) : 80 120 300 600
 LOSEN (100 lf) : 10 50 100
 SHIMADZU (500 kN) : 10 25 50 100 250 500

MÁQUINA : MARCA Y/O N° SERIE :
 Red Line LE-012-014 Alo 01/A Alo LE-120/13
 Penguin F-30 Otra

PIE DE METRO : Mituloyo 10197487 Volo C/5005 Somel 9N01361
 Mituloyo 0010959 Mituloyo 60553930 Otro

CINTA MÉTRICA : Stanley 29070604 Stanley M10616107 Stanley 840122
 Stanley M10616104 Otra

CUNA : H - I U MARCADOR : 10 mm Otro

EXTENSÓMETRO : Shimadzu 25-25-50 Amsler Lo=51 mm

VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA :

VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA :

Tº ENSAYO DE TRACCIÓN :

Tº ENSAYO DE DOBLADO :

RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Probeta	Lectura Máquina		Lectura Corregida		Alargamiento de ruptura (%)	Doblado B / M	Tipo de rotura D / F	Ubicación dentro del 1/3 central S / N
	Fluencia <input type="checkbox"/> kN	Máxima <input type="checkbox"/> kgf	Fluencia <input type="checkbox"/> kN	Máxima <input type="checkbox"/> kgf				
Nº 1	3234	3742	3234	3742				
2	3234	3742						
3	3234	3742						
4	3234	3742						
5								
6								
7								
8								

Marcas de la probeta

S E
 AS
 CAP
 OTRA

Determinación de la fluencia

Límite superior de fluencia
 0,2% de la deformación permanente

Longitud normal

Veredicto

Aprobada

Pendiente

Rechazada

Comentarios

Ensayó

Fecha Ensayo

Revisó

Fecha Revisión

P. KACC

FÁBRICA ALCANTARA SA : Gerdau Colina Gordau Ronca OTRA

Nº DE CONTROL :

INFORME Nº :

FECHA PRODUCCIÓN :

PRODUCCIÓN CONTROLADA :

TIPO : BARRA ROLLO ENDEREZADO kg

RESALTES : CON RESALTES LISO

COLADA : PROBETA 5

DIÁMETRO NOMINAL : 10 mm

CALIDAD ACERO NOMINAL : A630 A440

TURNO : DÍA NOCHE

CÓDIGO MATERIAL :

MUESTREADO POR : IDIEM CLIENTE

PERSONAL ENTREGA / RECIBE : INICIALES..... / INICIALES.....

FECHA MUESTREO :

REENSAYO : SI NO

INFORME ANTERIOR Nº :

Nº DE CONTROL ANTERIOR :

INSTRUMENTO : MÁQUINA

AMSLER (15 tf) : 0.5 1 1.5 5 10 15

MFL (600 kN) : 60 120 300 600

LOSEN (100 tf) : 10 50 100

SHIMADZU (500 kN) : 10 25 50 100 250 500

INSTRUMENTO : MARCA Y/O Nº SERIE

REGLA : Red Line LE-012-014 Alo 01/A Alo LE-12/013

Penguin F-30 Otra

PIE DE METRO : Mituleyo 10197487 Vato C/5005 Somet 9N01361

Mituleyo 0010959 Mituleyo 60553930 Otro

CINTA MÉTRICA : Stanley 29070604 Stanley M10816107 Stanley 840122

Stanley M10816104 Otra

CUÑA : 4-10 MARCADOR : 10 mm Otro

EXTENSÓMETRO : Shimadzu 2S-2S-50 Amislar Le=51 mm

VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA : mm/min

VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA : mm/min

Tº ENSAYO DE TRACCIÓN : °C

Tº ENSAYO DE DOBLADO : °C

RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Probeta	Lectura Máquina		Lectura Corregida		Alargamiento de ruptura (%)	Doblado	Tipo de rotura	Ubicación dentro del 1/3 central S / N
	Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima				
Nº	<input type="checkbox"/> kN	<input checked="" type="checkbox"/> kgf	<input type="checkbox"/> kN	<input checked="" type="checkbox"/> kgf		B / M	D / F	
1		3724		3723				
2		3724		3703				
3		3724		3723				
4								
5								
6								
7								
8								

Marcas de la probeta

AS

CAP

OTRA

Determinación de la fluencia

Límite superior de fluencia

0,2% de la deformación permanente

Longitud normal

Verificado

Aprobada

Pendiente

Rechazada

Comentarios:

Ensayo

Fecha Ensayo

Revisó

Fecha Revisión

FABRICA *DELTA* : Gerdau Colina Gerdau Renca OTRA

Nº DE CONTROL :

INFORME Nº :

FECHA PRODUCCIÓN :

PRODUCCIÓN CONTROLADA : BARRA ROLLO ENDEREZADO kg

RESALTES : CON RESALTES LISO

COLADA : *700 35 70 1 2* 0.0 0.0 0.1

DIAMETRO NOMINAL : *12* mm

CALIDAD ACERO NOMINAL : A630 A440

TURNO : DIA NOCHE

CODIGO MATERIAL :

MUESTREO POR : IDIEM CLIENTE

PERSONAL ENTREGA / RECIBE : INICIALES..... / INICIALES.....

FECHA MUESTREO :

RENSAYO : SI NO HORA:

INFORME ANTERIOR Nº :

Nº DE CONTROL ANTERIOR :

INSTRUMENTO : MÁQUINA MARCA : ESCALA : 0,5 1 1,5 5 15

AMSLER (15 tf) : 60 120 300 600

MFL (600 kN) : 10 50 100

LOSEN (100 tf) : 10 25 50 100 250 500

SHIMADZU (500 kN) : MARCA Y/O N° SERIE : Red Line LE-012-014 Ato D1/A Ato LE-12/013

REGLA : Penguin F-30 Otra

PIE DE METRO : Mituloyo 10197487 Veto C/5005 Somet 9N01361

Mituloyo 0010959 Mituloyo 60653930 Otro

CINTA MÉTRICA : Stanley 29070604 Stanley M10816107 Stanley 840122

Stanley M10816104 Otra

CUNA : - Z MARCADOR : 10 mm Otro

EXTENSÓMETRO : Shimadzu 25-25-50 Amstler Lo=51 mm

VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA : mm/min

VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA : mm/min

Tº ENSAYO DE TRACCIÓN : °C

Tº ENSAYO DE DOBLADO : °C

RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Probeta	Lectura Máquina		Lectura Corregida		Alargamiento de ruptura (%)	Doblado B / M	Tipo de rotura D / F	Ubicación dentro del 1/3 central S / N
	Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima				
Nº	<input type="checkbox"/> kN	<input checked="" type="checkbox"/> kgf	<input type="checkbox"/> kN	<input checked="" type="checkbox"/> kgf				
1	3452	3452	3452	3428				
2	3452	3452	3452	3428				
3	3452	3452	3452	3428				
4								
5								
6								
7								
8								

Marcas de la probeta

AS
 CAP
 OTRA

Determinación de la fluencia
 Límite superior de fluencia
 0,2% de la deformación permanente

Longitud normal

Veredicto

Aprobada

Pendiente

Rechazada

Comentarios

Ensayo

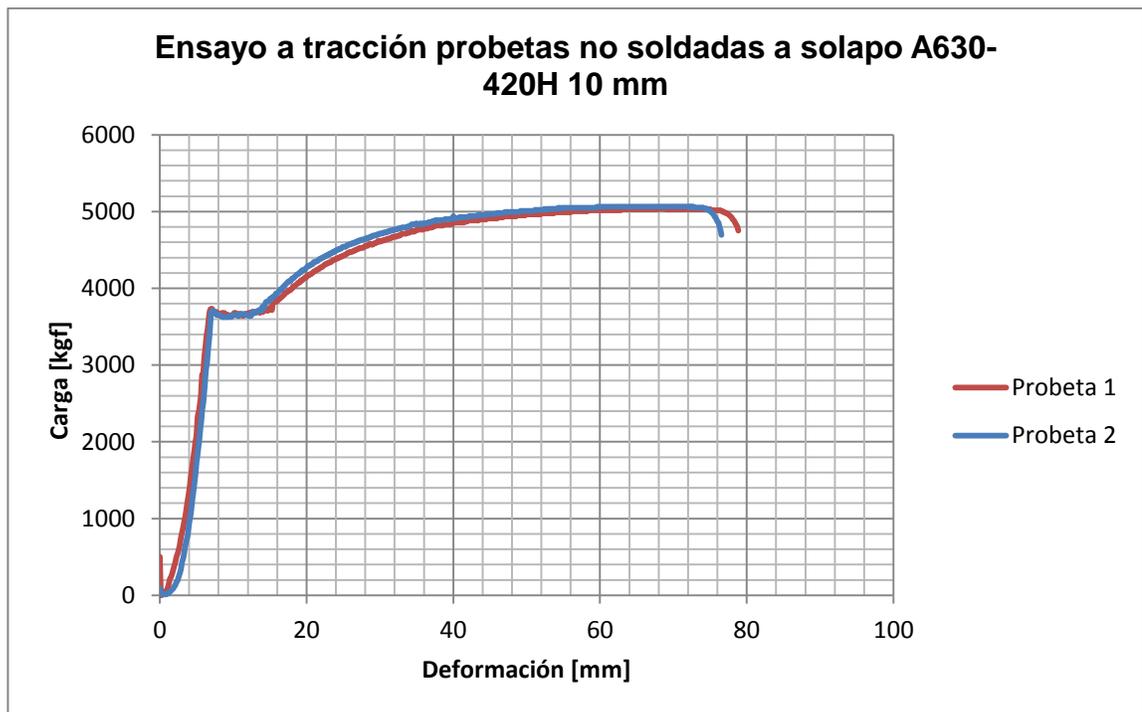
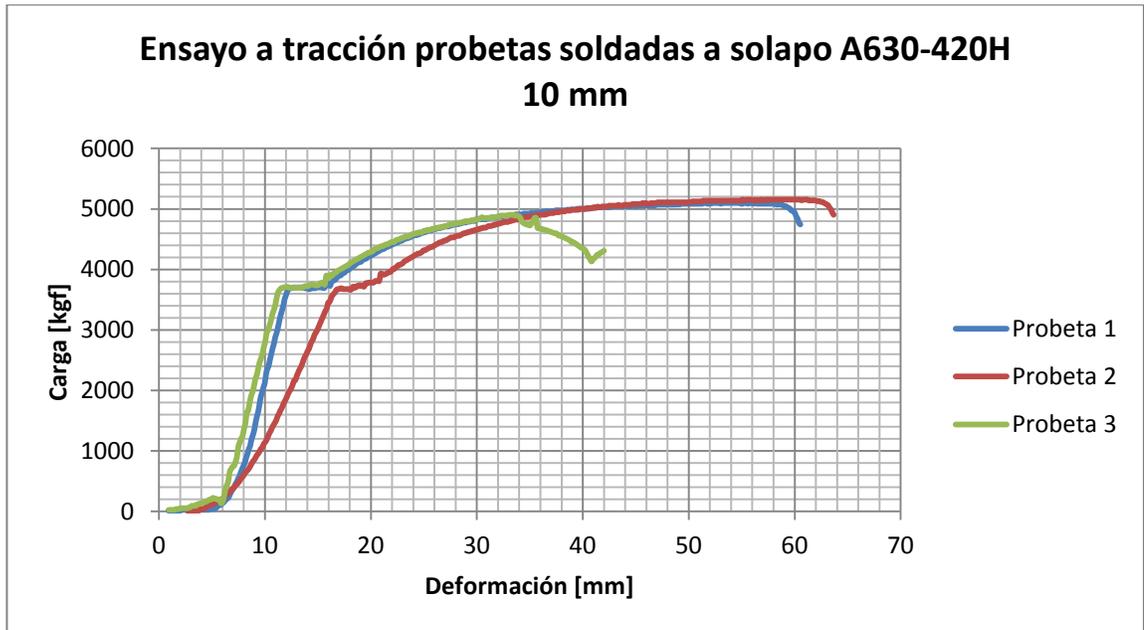
Fecha Ensayo

Revisó

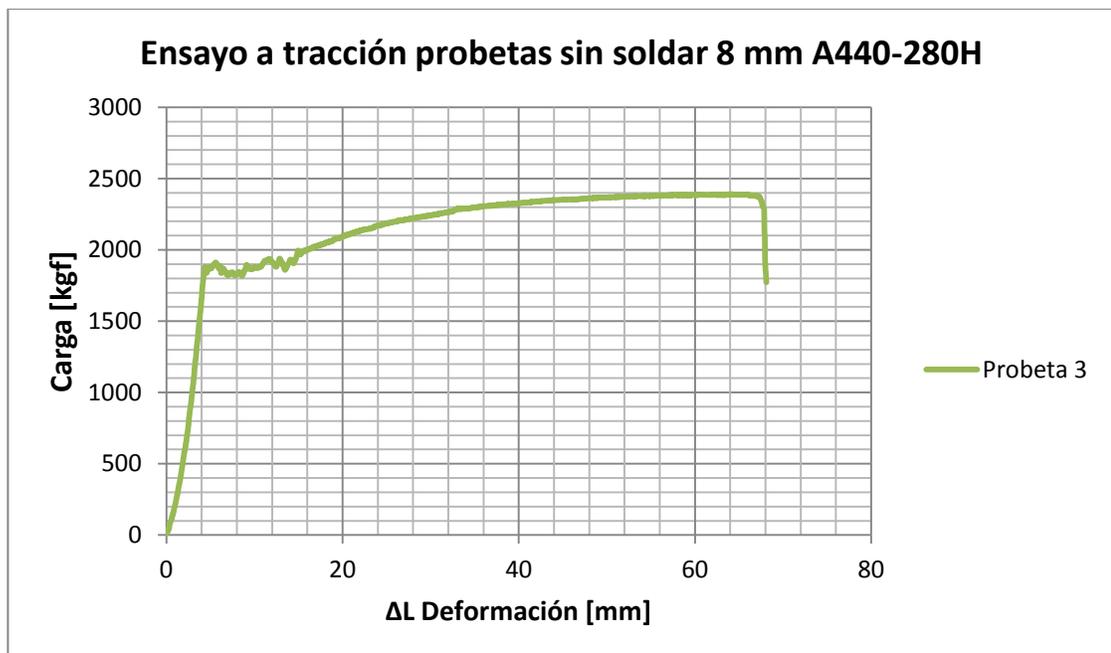
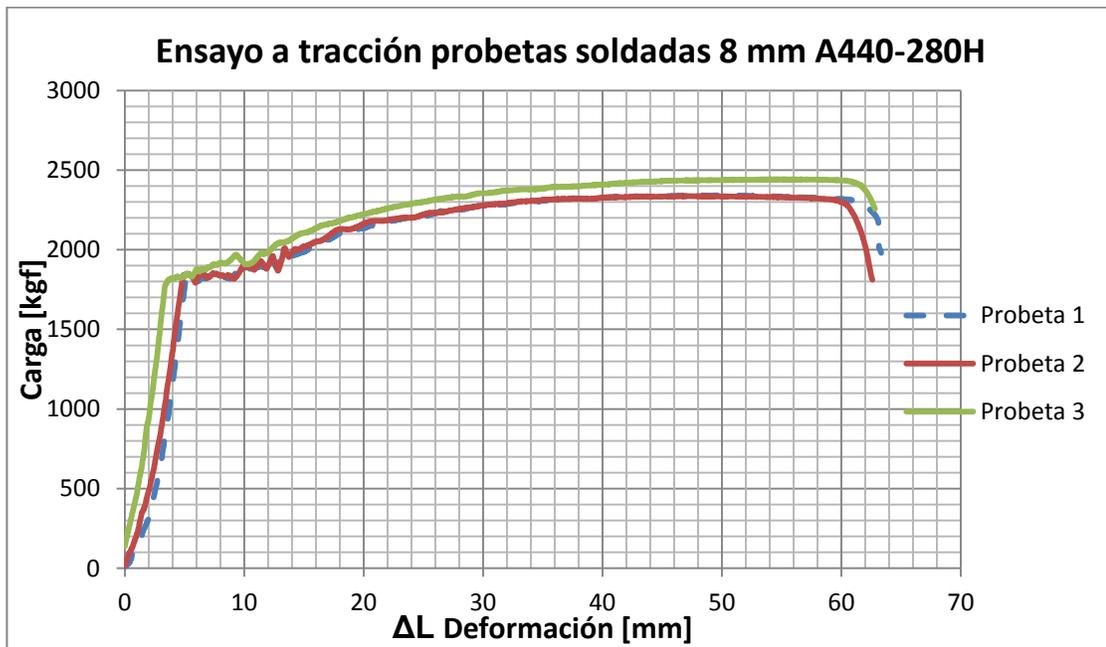
Fecha Revisión

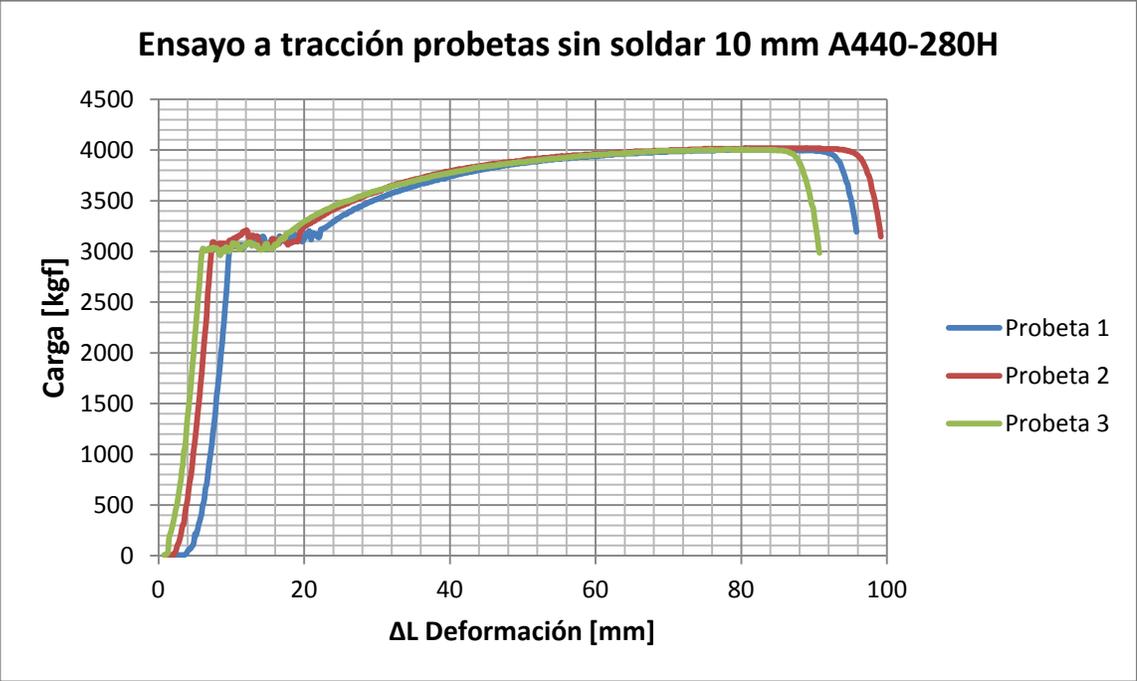
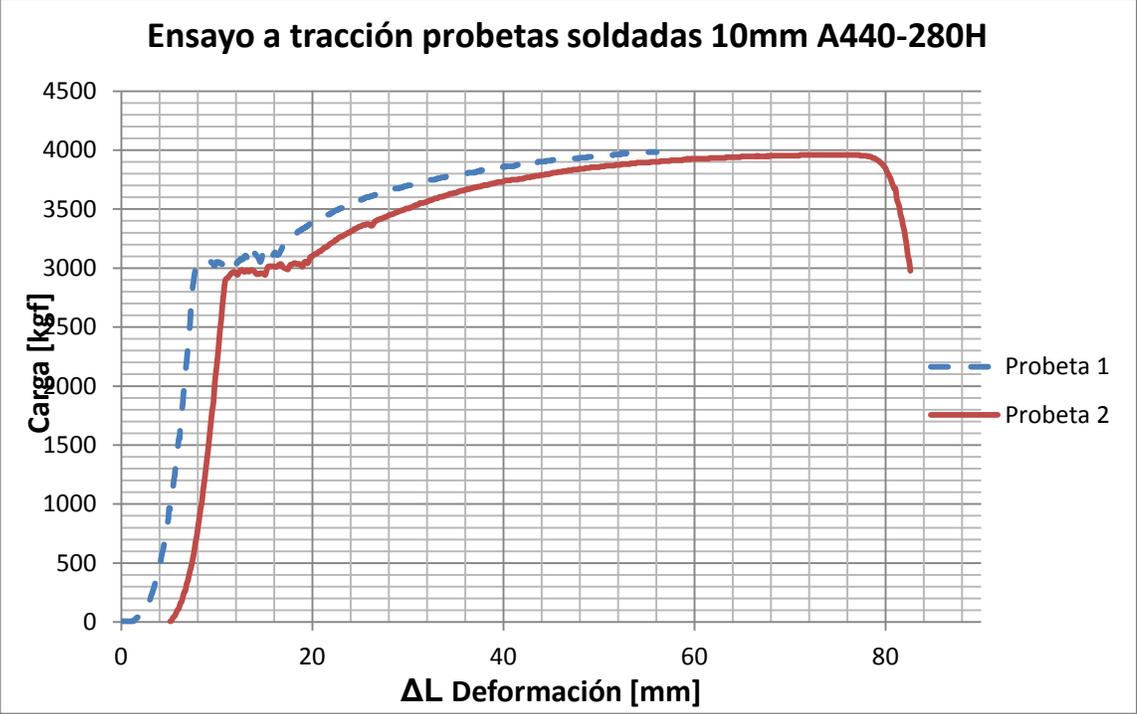
P. KACC

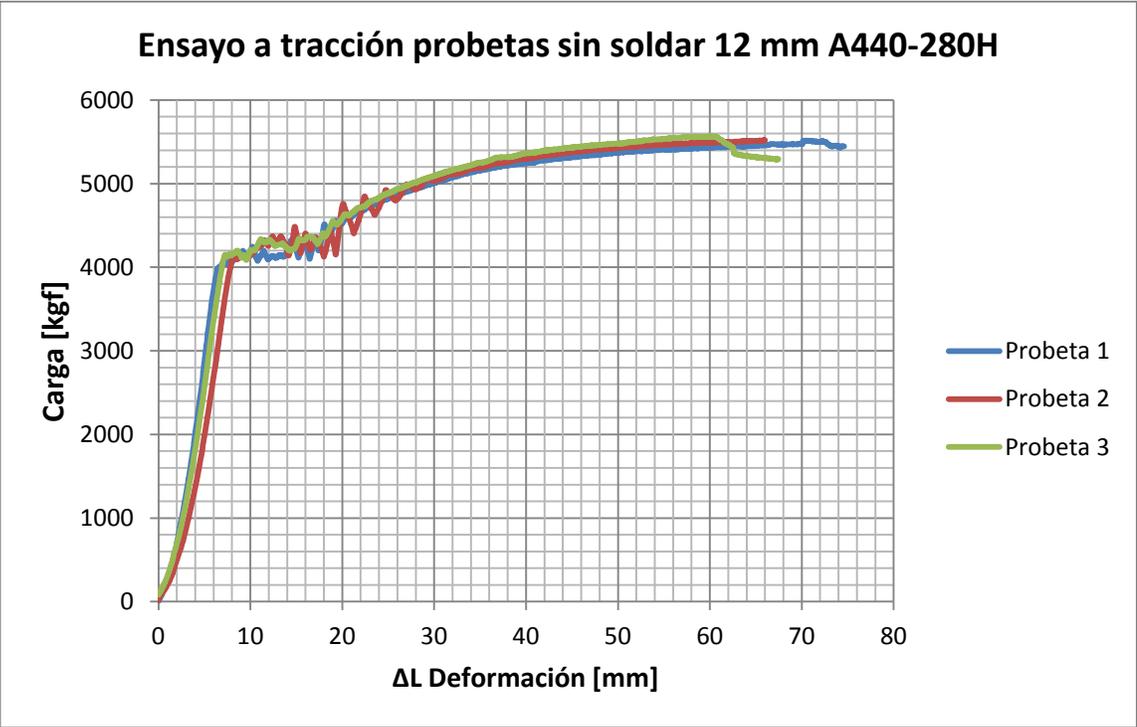
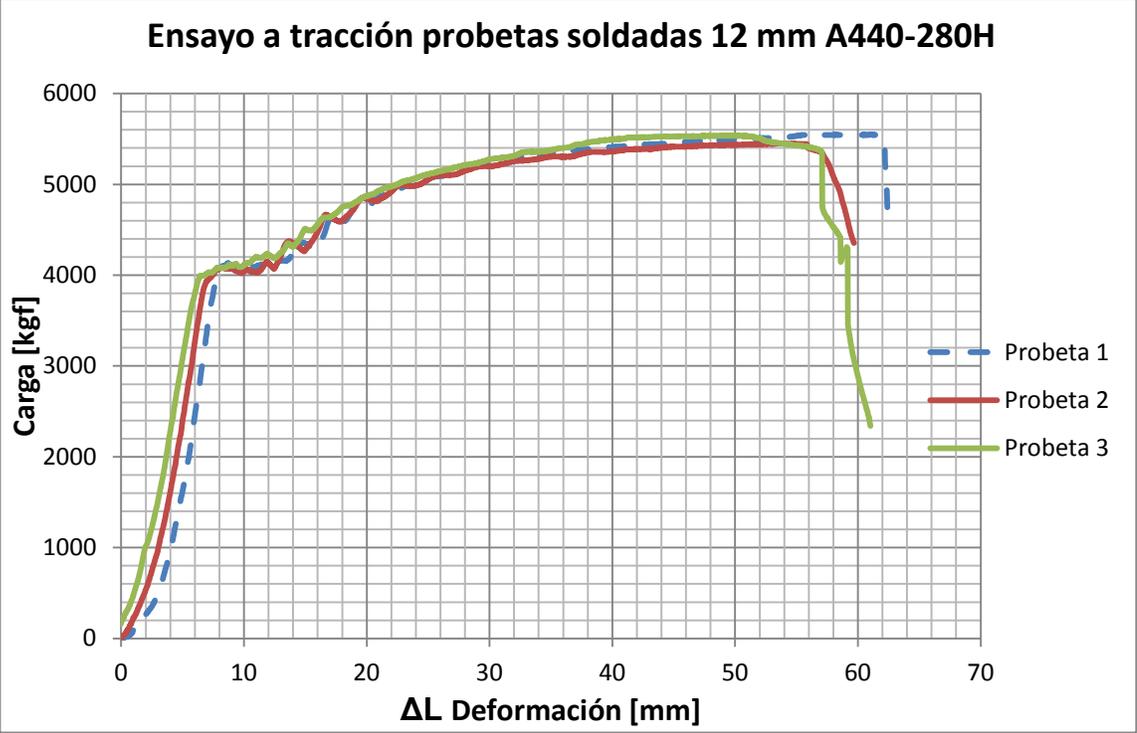
A.2.2 Acero A630-420H soldado a solapo



A.2.3 Acero A440-280H soldado a tope indirecto







FABRICA : Gerdau Colina Gerdau Renca OTRA

Nº DE CONTROL :

INFORME Nº :

FECHA PRODUCCIÓN :

PRODUCCIÓN CONTROLADA :

TIPO : BARRA ROLLO ENDEREZADO kg

RESALTES : CON RESALTES LISO

COLADA :

DIAMETRO NOMINAL : 60.2x3 mm

CALIDAD ACERO NOMINAL : A630 A440

TURNO : DIA NOCHE

CÓDIGO MATERIAL :

MUESTREADO POR : IDIEM CLIENTE

PERSONAL ENTREGA / RECIBE : INICIALES..... / INICIALES.....

FECHA MUESTREO : SI NO HORA:

RENSAYO :

INFORME ANTERIOR Nº :

Nº DE CONTROL ANTERIOR :

INSTRUMENTO : MÁQUINA

ESCALA : 0.5 1 1.5 3 10 15

MFL (600 kN) : 60 120 300 600

LOSEN (1000 Tf) : 10 50 100

SHIMADZU (500 kN) : 10 25 50 100 250 500

MARCA Y/O N° SERIE : Alo 01/A Alo LE-12/013

REGLA : Red Line LE-012-014 Vero C/5005 Somer 9N01361

PIE DE METRO : Mitutoyo 10197487 Mitutoyo 60553930 Otro

CINTA MÉTRICA : Stanley 29070604 Stanley M10816107 Stanley 840122

CUÑA : Shimadzu 25-25-50 Amstler Lo=51 mm

EXTENSÓMETRO :

VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA : 10 mm/min

VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA : 30 mm/min

Tº ENSAYO DE TRACCIÓN : 23.4 °C

Tº ENSAYO DE DOBLADO :

RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Probeta	Cargas		Alargamiento de ruptura (%)	Doblado B/M	Tipo de rotura D/F	Ubicación dentro del 1/3 central S/N
	Lectura Máxima / Fluencia	Lectura Corregida / Máxima				
Nº	kgf	kgf				
1	1800 / 2430	1800 / 2423	18.5	-	D	S
2	1810 / 2430	1840 / 2423	17.5	-	D	S
3	1810 / 2440	1830 / 2433	18.0	-	D	S
4						
5						
6						
7						
8						

Marcas de la probeta

440

AS

CAP

OTRA

Determinación de la fluencia

Limite superior de fluencia

0,2% de la deformación permanente

Longitud normal

Veredicto

Aprobada

Pendiente

Rechazada

Comentarios

SOLAMENTE

Ensayó

Fecha Ensayo

Revisó

Fecha Revisión

05.04.10

REGISTRO ENSAYOS DE BARRAS PARA HORMIGÓN ARMADO

SEGÚN NORMA NCh204.Of2006

ruja

FÁBRICA : Gerdau Colina Gerdau Renca OTRA

Nº DE CONTROL

INFORME Nº

FECHA PRODUCCIÓN

PRODUCCIÓN CONTROLADA : kg

TIPO : BARRA ROLLO ENDEREZADO

RESALTES : CON RESALTES LISO

COLADA

DIAMETRO NOMINAL : mm

CALIDAD ACERO NOMINAL : A630 A440

TURNO : DÍA NOCHE

CÓDIGO MATERIAL

MUESTREADO POR : IDIEM CLIENTE

PERSONAL ENTREGA / RECIBE : INICIALES..... / INICIALES.....

FECHA MUESTREO : HORA: NO

REENSAYO : SI NO No aplica

INFORME ANTERIOR Nº

Nº DE CONTROL ANTERIOR : No aplica

INSTRUMENTO : MÁQUINA : MARCA : ESCALA : 1 1.5 5 10 15

AMSLER (15 tf) : 0.5 1 1.5 5 10 15

MFL (600 KN) : (60) 120 300 600

LOSEN (100 tf) : 10 50 100

SHIMADZU (500 KN) : 10 25 50 100 250 500

INSTRUMENTO : MÁQUINA : MARCA Y/O Nº SERIE : Alo LE-12/013

REGLA : Red Line LE-012-014 Alo 01/A Otro LE-12/013

Penguin F-30 Otra

PIE DE METRO : Mitutoyo 10197487 Veto C/5005 Somet 9ND1361

Mitutoyo 0010959 Mitutoyo 60553930 Otro

CINTA METRICA : Stanley 29070604 Stanley M10816107 Stanley 840122

Stanley M10816104 Otra

CUÑA: : MARCADOR: 10 mm Otro: 50

EXTENSÓMETRO : Shimadzu 25-25-50 Amstler Lo=51 mm

VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA : / 0 mm/min

VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA : 80 mm/min

Tº ENSAYO DE TRACCIÓN : 23.3 °C

Tº ENSAYO DE DOBLADO : °C

RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Probeta	Cargas			Alargamiento de ruptura (%)	Doblado B/M	Tipo de rotura D/F	Ubicación dentro del 1/3 central S/N
	Fluencia	Máxima	Máxima				
Nº	Fluencia	Máxima	Máxima	(%)	B/M	D/F	S/N
1	1835	2407	2417	23.5	—	3	5
2	1815	2407	2417	27.0	—	3	5
3	1835	2407	2417	28.0	—	3	5
4							
5							
6							
7							
8							

Marcas de la probeta

AS

CAP

OTRA

Determinación de la fluencia

Limite superior de fluencia

0,2% de la deformación permanente

Longitud normal

Veredicto

Aprobada

Pendiente

Rechazada

Comentarios: BARRAS SIN SOLDAD

Ensayó

Fecha Ensayo

Revisó

Fecha Revisión

PKOC.C

FÁBRICA : Gerdau Colina Gerdau Renca OTRA

Nº DE CONTROL :

INFORME Nº :

FECHA PRODUCCIÓN :

PRODUCCIÓN CONTROLADA :

TIPO : BARRA ROLLO ENDEREZADO

RESALTES : CON RESALTES LISO

COLADA : 60783

DIAMETRO NOMINAL :

CALIDAD ACERO NOMINAL : A630 A440

TURNO : DÍA NOCHE

CÓDIGO MATERIAL :

MUESTREADO POR : IDIEM CLIENTE

PERSONAL ENTREGA / RECIBE : INICIALES..... / INICIALES.....

FECHA MUESTREO :

REENSAYO : SI NO

INFORME ANTERIOR Nº :

Nº DE CONTROL ANTERIOR :

INSTRUMENTO : MARCA : ESCALA :

MÁQUINA : AMSLER (15 tf) : 0.5 : 1 : 1.5 : 5 : 10 : 15

LOSEN (100 tf) : 60 : 120 : 300 : 600

SHIMADZU (500 kN) : 10 : 50 : 100 : 250 : 500

INSTRUMENTO : MARCA Y/O N° SERIE : Alo LE-12/013

REGLA : Red Line LE-012-014 Alo 01/A Alo LE-12/013

PIE DE METRO : Penguin F-30 Otro

CINTA MÉTRICA : Mitutoyo 10197487 Veto C/5005 Somet 9N01361

CUÑA : Mitutoyo 0010959 Mitutoyo 60553930 Otro

EXTENSÓMETRO : Stanley 29070604 Stanley M10816107 Stanley 840122

VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA : 4-10 MARGADOR: 10 mm Otro: 50 mm

VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA : Shimadzu 25-25-50 Amsler Lo=51 mm

Tº ENSAYO DE TRACCIÓN : 10 mm/min

Tº ENSAYO DE DOBLADO : 80 mm/min

VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA : 10 mm/min

VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA : 80 mm/min

Tº ENSAYO DE TRACCIÓN : 25.5 °C

Tº ENSAYO DE DOBLADO : °C

RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Probeta	Lectura Máquina		Lectura Corregida		Alargamiento de ruptura (%)	Doblado B/M	Tipo de rotura D/F	Ubicación dentro del 1/3 central S/N
	Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima				
Nº	Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima				
1	1800	2410	1800	2403	26.0	-	D	S
2	1830	2440	1828	2433	26.5	-	D	S
3	1850	2410	1848	2403	23.5	-	D	S
4								
5								
6								
7								
8								

Marcas de la probeta : AS CAP OTRA

Determinación de la fluencia : Límite superior de fluencia 0,2% de la deformación permanente

Longitud normal :

Veredicto : Aprobada Pendiente Rechazada

Comentarios : SIN SOLDAR

Ensayó : P. KACIC

Fecha Ensayo : 01-04-10

Revisó :

Fecha Revisión :

REGISTRO ENSAYOS DE BARRAS PARA HORMIGÓN ARMADO
SEGÚN NORMA NCh204.Of2006

FÁBRICA : Gerdau Colina Gerdau Renca OTRA

Nº DE CONTROL :

INFORME Nº :

FECHA PRODUCCIÓN :

PRODUCCIÓN CONTROLADA :

TIPO : BARRA ROLLO ENDEREZADO

RESALTES : CON RESALTES LISO

COLADA :

DIAMETRO NOMINAL : 8 mm

CALIDAD ACERO NOMINAL : A630 A440

TURNO : DÍA NOCHE

CÓDIGO MATERIAL :

MUESTREADO POR : IDIEM CLIENTE

PERSONAL ENTREGA / RECIBE : INICIALES..... / INICIALES.....

FECHA MUESTREO :

REENSAYO : SI NO HORA:

INFORME ANTERIOR Nº :

Nº DE CONTROL ANTERIOR :

INSTRUMENTO : MÁQUINA

MARCA : AMSLER (15 tf) ESCALA : 1 1.5 5 10 15

MFL (600 KN) : (60) 120 300 600

LOSEN (100 tf) : 10 50 100

SHIMADZU (500 KN) : 10 25 50 100 250 500

INSTRUMENTO : MARCA Y/O N° SERIE

REGLA : Red Line LE-012-014 Alo 01/A Alo LE-12/013

Penguin F-30

PIE DE METRO : Mitutoyo 10197487 Veto C/5005 Somet 9N01361

Mitutoyo 0010959 Mitutoyo 60553930 Otro

CINTA METRICA : Stanley 29070604 Stanley M10816107 Stanley 840122

Stanley M10816104 Otro

CUÑA : J-16 10 mm Otro 30 mm

EXTENSÓMETRO : Shimadzu 25-25-50 Amster Lo=51 mm

VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA : 10 mm/min

VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA : 80 mm/min

Tº ENSAYO DE TRACCIÓN : 23.7 °C

Tº ENSAYO DE DOBLADO :

RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Probeta	Lectura Máquina		Lectura Corregida		Alargamiento de ruptura (%)	Doblado B / M	Tipo de rotura D / F	Ubicación dentro del 1/3 central S / N
	Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima				
Nº	Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima	(%)	B / M	D / F	S / N
1	1835	2407	1805	2417	17.5	—	D	S
2	1835	2407	1846	2417	17.0	—	D	N
3	1815	2426	1825	2437	18.0	—	D	S
4								
5								
6								
7								
8								

Marcas de la probeta

GD

AS

CAP

OTRA

Determinación de la fluencia

Limite superior de fluencia

0,2% de la deformación permanente

Longitud normal

Veredicto

Aprobada

Pendiente

Rechazada

Comentarios

BARRAS SOLDADAS

Ensayó

Fecha Ensayo

Revisó

Fecha Revisión

P. Kocic

03.12.08

**REGISTRO ENSAYOS DE BARRAS PARA HORMIGÓN ARMADO
SEGÚN NORMA NCh204.0F2006**

Hoja

FÁBRICA : Gerdau Collina Gerdau Renca OTRA

Nº DE CONTROL :

INFORME Nº :

FECHA PRODUCCIÓN :

PRODUCCIÓN CONTROLADA :

TIPO : BARRA ROLLO ENDEREZADO

RESALTES : CON RESALTES LISO

COLADA : 2317

DIÁMETRO NOMINAL : 12 mm

CALIDAD ACERO NOMINAL : A630 A440

TURNO : DÍA NOCHE

CÓDIGO MATERIAL :

MUESTREADO POR : IDIEM CLIENTE

PERSONAL ENTREGA / RECIBE : INICIALES..... / INICIALES.....

FECHA MUESTREO : SI NO HORA:

RENSAYO : SI NO No aplica

INFORME ANTERIOR Nº :

Nº DE CONTROL ANTERIOR :

INSTRUMENTO : MÁQUINA MARCA : ESCALA : 0.5 1 1.5 5 15

MFL (600 kN) : 60 120 300 600

LOSEN (100 ft) : 10 50 100

SHIMADZU (500 kN) : 10 25 50 100 250 500

INSTRUMENTO : MARCA Y/O Nº SERIE : ALO LE-12/013

REGLA : Red Line LE-012-014 Alo 01/A Alo LE-12/013

Penguin F-30 Otra

PIE DE METRO : Mitutoyo 10197487 Veto C/5005 Somet 9N01361

Mitutoyo 0010959 Mitutoyo 60553930 Otro

CINTA METRICA : Stanley 29070604 Stanley M10816107 Stanley 840122

Stanley M10816104 Otra

CUÑA : 9-20 MARCADOR : 10 mm Otro... 9-20

EXTENSÓMETRO : Shimadzu 25-25-50 Amstler Lo=51 mm

VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA : 10 mm/min

VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA : 10 mm/min

Tº ENSAYO DE TRACCIÓN : 23.5 °C

Tº ENSAYO DE DOBLADO :

RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Probeta	Lectura Máquina		Lectura Corregida		Alargamiento de ruptura (%)	Doblado B/M	Tipo de rotura D/F	Ubicación dentro del 1/3 central S/N
	Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima				
Nº	<input type="checkbox"/> kN	<input checked="" type="checkbox"/> kgf	<input type="checkbox"/> kN	<input checked="" type="checkbox"/> kgf				
1	4100	5540	4087	5532	260	—	D	S
2	4140	5520	4137	5512	260	—	B	S
3	4150	5550	4147	5547	277	—	B	S
4								
5								
6								
7								
8								

Marcas de la probeta : 440.12

AS

CAP

OTRA

Determinación de la fluencia

Límite superior de fluencia

0,2% de la deformación permanente

Longitud normal :

Veredicto : Aprobada Pendiente Rechazada

Comentarios : SIN SOLDAR

Ensayo :

Fecha Ensayo : 05.04.10

Revisó :

Fecha Revisión :

FÁBRICA : Gerdau Colina Gerdau Renca OTRA

Nº DE CONTROL :

INFORME Nº :

FECHA PRODUCCIÓN :

PRODUCCIÓN CONTROLADA :

TIPO : BARRA ROLLO ENDEREZADO

RESALTES : CON RESALTES LISO

COLADA :

DIAMETRO NOMINAL : 12 mm

CALIDAD ACERO NOMINAL : A630 A440

TURNO : DÍA NOCHE

CÓDIGO MATERIAL :

MUESTREADO POR : IDIEM CLIENTE

PERSONAL ENTREGA / RECIBE : INICIALES..... / INICIALES.....

FECHA MUESTREO : SI NO HORA:

REENSAYO : SI NO No aplica

INFORME ANTERIOR Nº :

Nº DE CONTROL ANTERIOR :

INSTRUMENTO : MARCA : ESCALA

MAQUINA : AMSLER (15 tf) : 0,5 1 1,5 5 15
MFL (600 kN) : 60 120 300 600
LOSEN (1000 tf) : 10 50 100
SHIMADZU (500 kN) : 10 25 50 100 250 500

INSTRUMENTO : MARCA Y/O Nº SERIE

REGLA : Red Line LE-012-014 Alo 01/A Alo LE-12/013
 Penguin F-30 Otra

PIE DE METRO : Mitutoyo 10197487 Veto C/5005 Somel 9N01361
 Mitutoyo 0010959 Mitutoyo 60553930 Otro

CINTA MÉTRICA : Stanley 29070604 Stanley M10816107 Stanley 840122
 Stanley M10816104 Otra

CUÑA : 10 mm Otro: 10 mm

EXTENSÓMETRO : Shimadzu 25-25-50 Amster Lo=51 mm

VELOCIDAD ZONA ELÁSTICA : 10 mm/min

VELOCIDAD ZONA PLÁSTICA : 80 mm/min

Tº ENSAYO DE TRACCIÓN : 22,5 °C

Tº ENSAYO DE DOBLADO : — °C

RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Probeta	Cargas			Alargamiento de ruptura (%)	Doblado B/M	Tipo de rotura D/F	Ubicación dentro del 1/3 central S/N
	Fluencia	Máxima	Corregida				
Nº	<input type="checkbox"/> kN	kgf	Máxima kgf				
1	4130	5360	5547	22,5	—	D	S/N
2	4120	5310	5542	17,0	—	D	N
3	4050	5250	5542	16,0	—	D	S
4							
5							
6							
7							
8							

Marcas de la probeta

AS A 440 12
 CAP
 OTRA

Determinación de la fluencia

Limite superior de fluencia
 0,2% de la deformación permanente

Longitud normal

Veredicto

Aprobada

Pendiente

Rechazada

Comentarios: SOLIDADOS

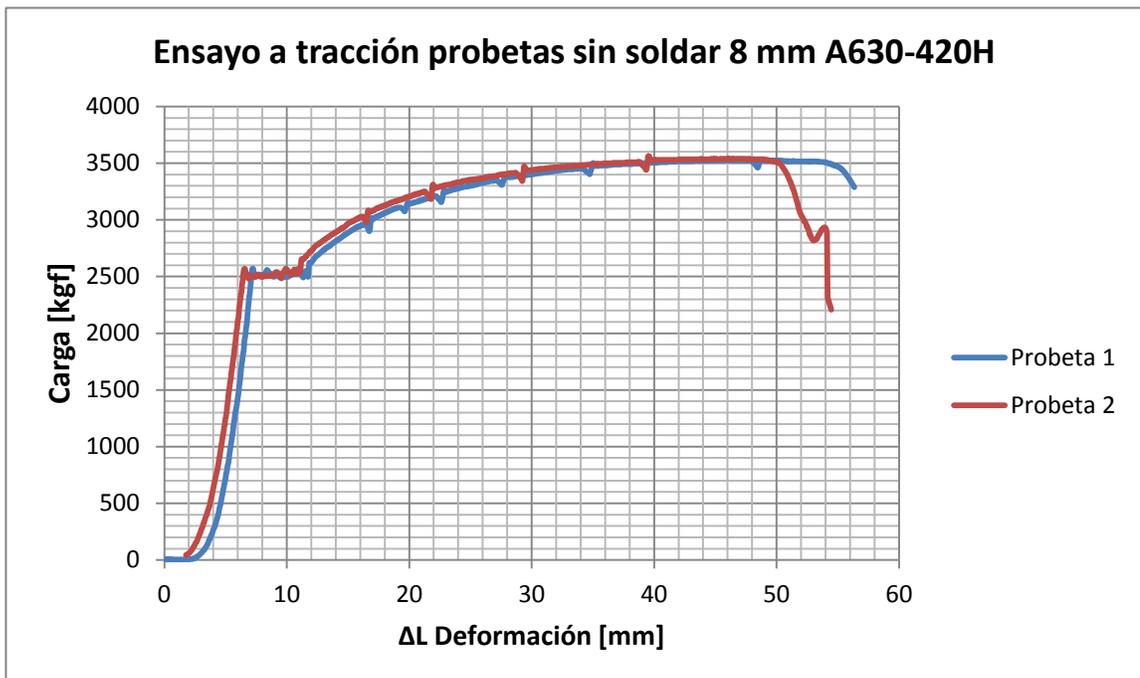
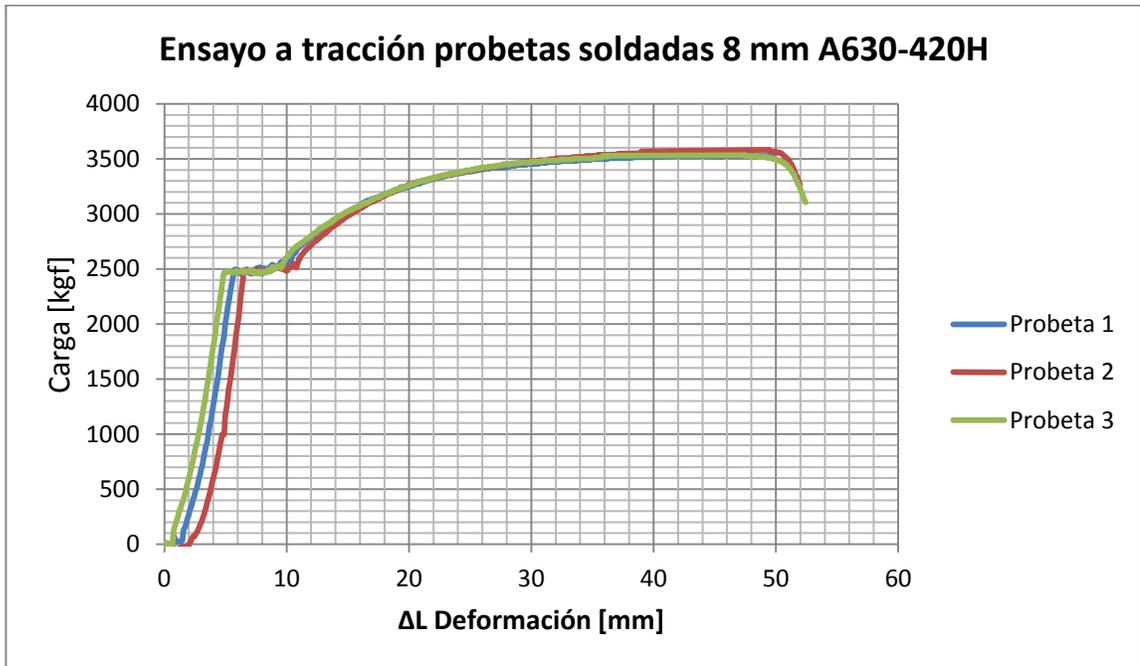
Ensayo

Fecha Ensayo: 0504.10

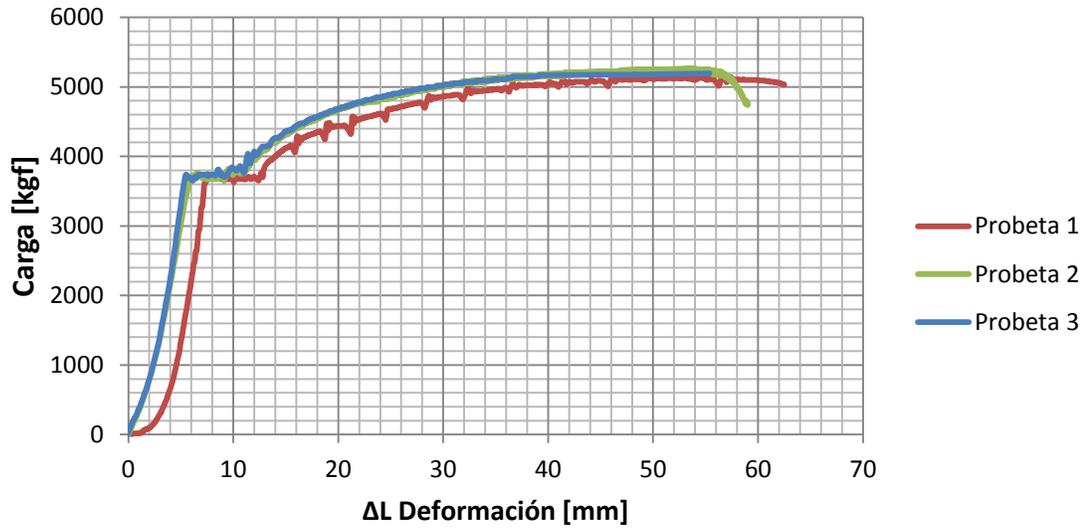
Revisó

Fecha Revisión

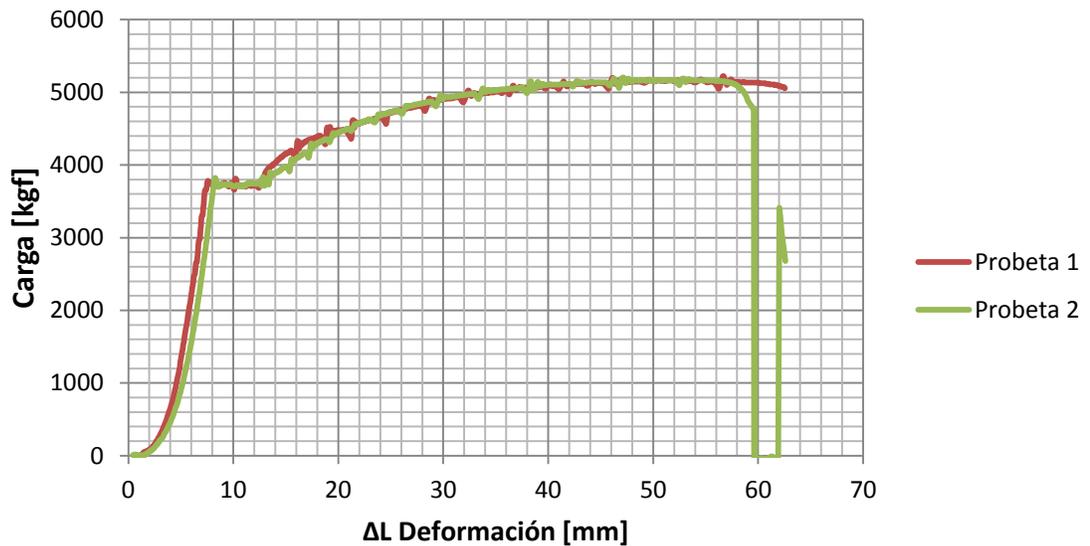
A.2.4 Acero A630-420H soldado a tope indirecto



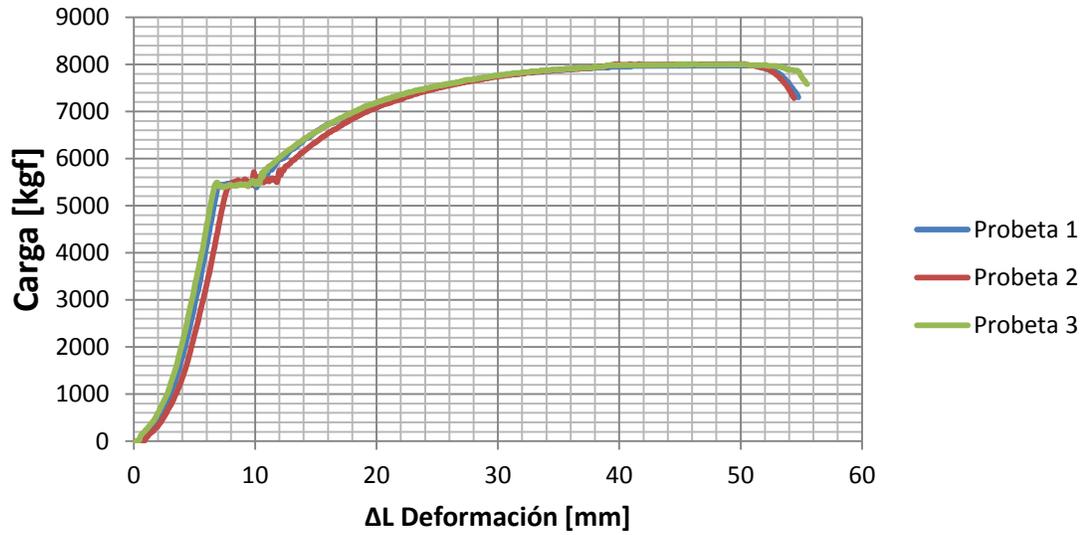
Ensayo a tracción probetas soldadas 10 mm A630-420H



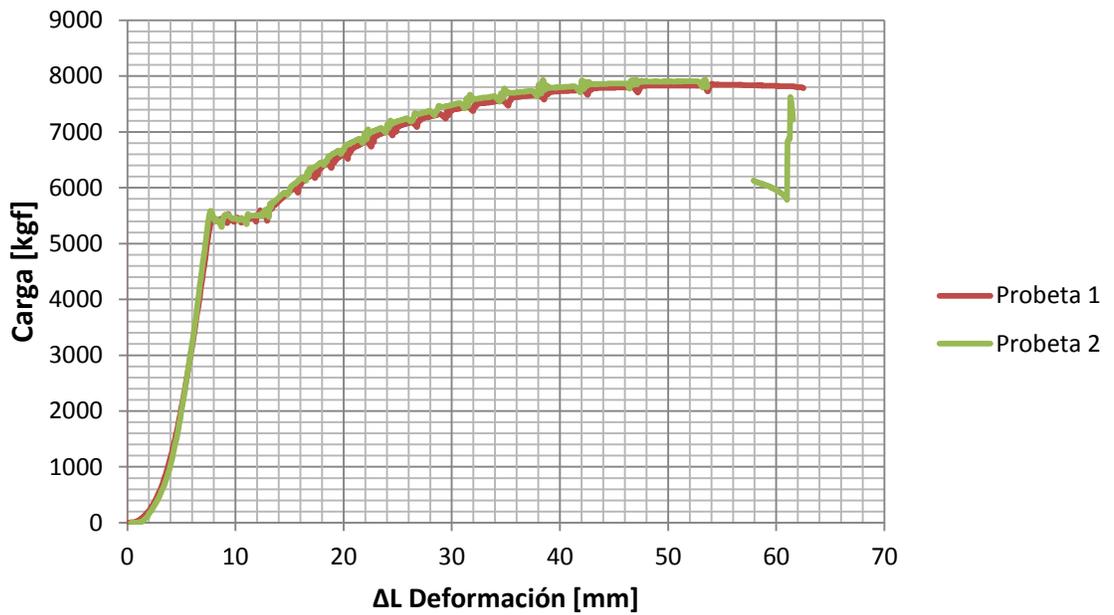
Ensayo a tracción probetas no soldadas 10 mm A630-420H



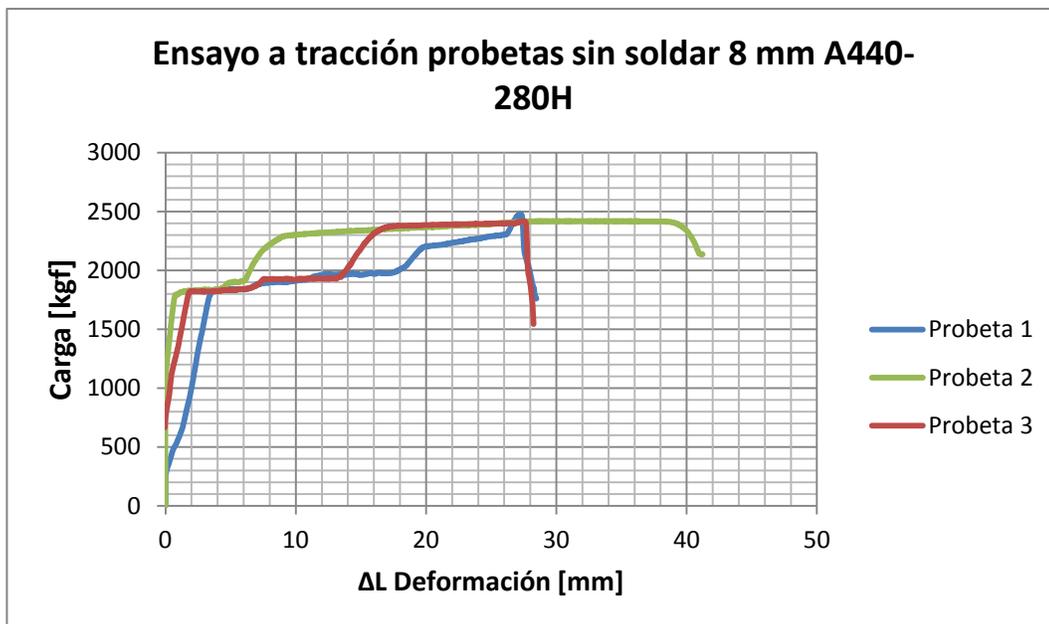
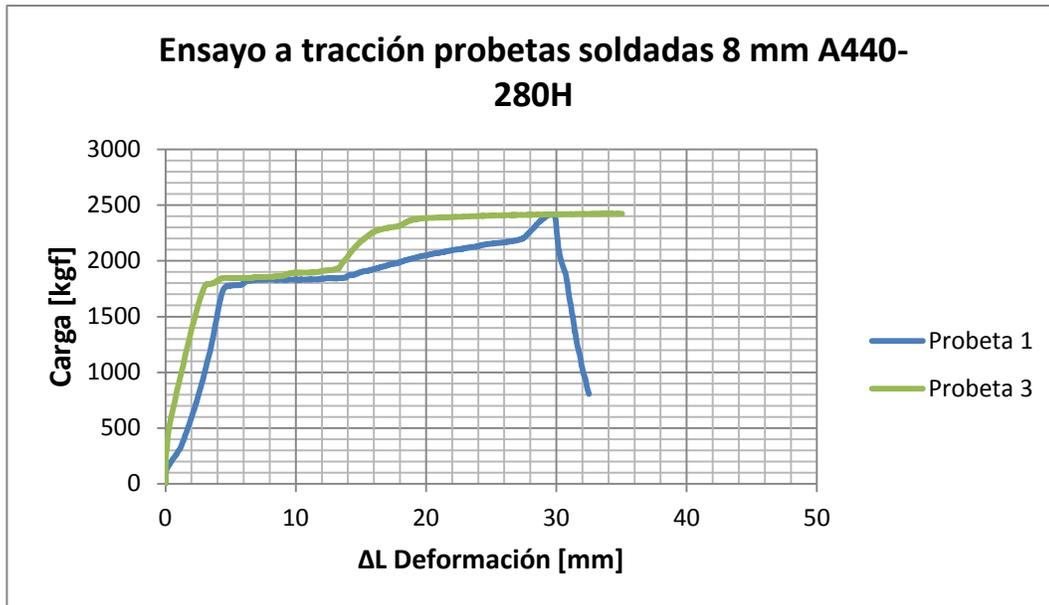
Ensayo a tracción probetas soldadas 12 mm A630-420H



Ensayo a tracción probetas soldadas 12 mm A630-420H

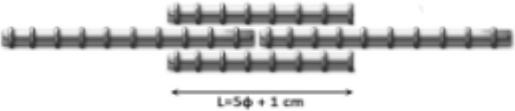
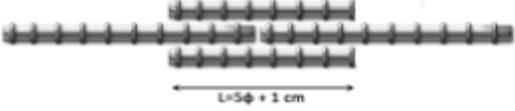
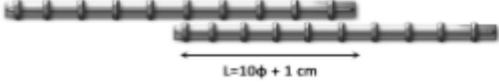


A.2.5 Acero A440-280H soldado a tope indirecto con máquina MFL (600 kN)



A.2.6 Resumen ensayos a tracción

A continuación se muestra un resumen con todas las barras ensayadas, las cuales se encuentran separadas por tipo de probeta según el siguiente esquema:

Tipo de Probeta		Esquema
A		
Cantidad	9	
Acero	A440-280H	
B		
Cantidad	9	
Acero	A630-420H	
C		
Cantidad	3	
Acero	A630-420H	
D		
Cantidad	9	
Acero	A440-280H	
E		
Cantidad	6	
Acero	A630-420H	
F		
Cantidad	2	
Acero	A630-420H	

Probeta tipo	N°	Calidad	Diámetro nominal [mm]	L [mm]	l [mm]	Masa [g]	Fluencia [kgf]	Pmáx [kgf]	Alargamiento [%]	Zona de rotura	Ruptura Dentro del 1/3 central
A	1	A440-280H	8	500	50		1800	2423	19,5	Fuera de la soldadura	NO
A	2	A440-280H	8	500	50		1849	2423	17,5	Fuera de la soldadura	SÍ
A	3	A440-280H	8	500	50		1839	2433	18	Fuera de la soldadura	SÍ
A	4	A440-280H	10	525	60	-	2926	3990	16	Fuera de la soldadura	-
A	5	A440-280H	10	534	62	-	2935	3975	16,5	Fuera de la soldadura	-
A	6	A440-280H	10	521	62	-	2906	3965	16,5	Fuera de la soldadura	-
A	7	A440-280H	12	500	70	-	4127	5552	22,5	Fuera de la soldadura	NO
A	8	A440-280H	12	500	70	-	4117	5542	17	Fuera de la soldadura	NO
A	9	A440-280H	12	500	70	-	4047	5542	16	Fuera de la soldadura	SÍ
A	10	A440-280H	8	510	43	-	1805	2417	17,5	Fuera de la soldadura	SÍ
A	11	A440-280H	8	520	44	-	1846	2417	17	Fuera de la soldadura	NO
A	12	A440-280H	8	540	46	-	1825	2437	18	Fuera de la soldadura	SÍ
B	1	A630-420H	8	-	-	-	2483	3511	-	Fuera de la soldadura	-
B	2	A630-420H	8	-	-	-	2473	3511	-	Fuera de la soldadura	-
B	3	A630-420H	8	-	-	-	2483	3511	-	Fuera de la soldadura	-
B	4	A630-420H	10	-	-	-	3724	5123	-	Fuera de la soldadura	-
B	5	A630-420H	10	-	-	-	3754	5103	-	Fuera de la soldadura	-
B	6	A630-420H	10	-	-	-	3724	5123	-	Fuera de la soldadura	-
B	7	A630-420H	12	-	-	-	5452	7929	-	Fuera de la soldadura	-
B	8	A630-420H	12	-	-	-	5452	7929	-	Fuera de la soldadura	-
B	9	A630-420H	12	-	-	-	5462	7939	-	Fuera de la soldadura	-
C	1	A630-420H	10	532	100	-	3724	5113	10	Fuera de la soldadura	-
C	2	A630-420H	10	532	94	-	3678	5142	10	Fuera de la soldadura	-
C	3	A630-420H	10	525	105	-	3724	4903	4,8	Zona adyacente a la soldadura	SÍ
D	1	A440-280H	8	500	50		1800	2403	26	-	SÍ

D	2	A440-280H	8	500	48		1829	2433	26,5	-	SÍ
D	3	A440-280H	8	500	52		1849	2403	23,5	-	SÍ
D	4	A440-280H	10	500	-	308,39	3005	3990	24	-	-
D	5	A440-280H	10	503	-	310,72	3096	4030	26	-	-
D	6	A440-280H	10	501	-	309,02	3066	3990	25,5	-	-
D	7	A440-280H	12	-	-	-	4097	5532	26	-	SÍ
D	8	A440-280H	12	-	-	-	4137	5512	26	-	SÍ
D	9	A440-280H	12	-	-	-	4147	5542	27,5	-	SÍ
D	10	A440-280H	8	500	45	-	2521	3532	-	-	NO
D	11	A440-280H	8	510	44	-	2521	3532	-	-	SÍ
D	12	A440-280H	8	500	44	-	2530	3532	-	-	SÍ
E	1	A630-420H	8			-	2662	3511	17	-	SÍ
E	2	A630-420H	8			-	2561	3531	17	-	SÍ
E	3	A630-420H	10			-	3775	5202	19	-	SÍ
E	4	A630-420H	10			-	3775	5192	16,5	-	SÍ
E	5	A630-420H	12			-	5472	7860	19	-	SÍ
E	6	A630-420H	12			-	5612	7939	19	-	SÍ
F	1	A630-420H	10	505	-	306,87	3744	5043	18,5	-	SÍ
F	2	A630-420H	10	505	-	307,53	3714	5053	20	-	SÍ

Largo entre mordazas	300-350 mm
	Se usa máquina marca MFL (600 kN)

A.2.7 Cumplimiento Normativa NCh 204. Of.2006 de las barras ensayadas a tracción (Detalle)

Resultados				Norma Nch 204 of.2006					
Probeta tipo	N°	Fluencia [Mpa]	Pmáx [Mpa]	Fluencia Fy	Pmáx Fu	Relación Fu/Fy	Alargamiento probeta		
							K	MIN	Cumple
A	1	358	482	SI	SI	SI	2	16	SI
A	2	368	482	SI	SI	SI	2	16	SI
A	3	366	484	SI	SI	SI	2	16	SI
A	4	373	508	SI	SI	SI	1	16	SI
A	5	374	506	SI	SI	SI	1	16	SI
A	6	370	505	SI	SI	SI	1	16	SI
A	7	365	491	SI	SI	SI	0	16	SI
A	8	364	490	SI	SI	SI	0	16	SI
A	9	358	490	SI	SI	SI	0	16	SI
A	10	359	481	SI	SI	SI	2	16	SI
A	11	367	481	SI	SI	SI	2	16	SI
A	12	363	485	SI	SI	SI	2	16	SI
B	1	494	698	SI	SI	SI	2	9	SI
B	2	492	698	SI	SI	SI	2	9	SI
B	3	494	698	SI	SI	SI	2	9	SI
B	4	474	652	SI	SI	SI	1	11	SI
B	5	478	650	SI	SI	SI	1	11	SI
B	6	474	652	SI	SI	SI	1	11	SI
B	7	482	701	SI	SI	SI	0	11	SI
B	8	482	701	SI	SI	SI	0	11	SI
B	9	483	702	SI	SI	SI	0	11	SI
C	1	474	651	SI	SI	SI	1	11	NO
C	2	468	655	SI	SI	SI	1	11	NO
C	3	474	624	SI	SI	SI	1	11	NO
D	1	358	478	SI	SI	SI	2	16	SI
D	2	364	484	SI	SI	SI	2	16	SI
D	3	368	478	SI	SI	SI	2	16	SI
D	4	383	508	SI	SI	SI	1	16	SI
D	5	394	513	SI	SI	SI	1	16	SI
D	6	390	508	SI	SI	SI	1	16	SI
D	7	362	489	SI	SI	SI	0	16	SI
D	8	366	487	SI	SI	SI	0	16	SI

Continuación tabla

D	9	367	490	SI	SI	SI	0	16	SI
D	10	502	703	SI	SI	SI	2	16	SI
D	11	502	703	SI	SI	SI	2	16	SI
D	12	503	703	SI	SI	SI	2	16	SI
E	1	530	698	SI	SI	SI	2	9	SI
E	2	509	702	SI	SI	SI	2	9	SI
E	3	481	662	SI	SI	SI	1	11	SI
E	4	481	661	SI	SI	SI	1	11	SI
E	5	484	695	SI	SI	SI	0	11	SI
E	6	496	702	SI	SI	SI	0	11	SI
F	1	477	642	SI	SI	SI	1	11	SI
F	2	473	643	SI	SI	SI	1	11	SI

A.3 Diseño 1 del sistema cíclico (detalles)

A.3.1 Diseño de placa soportante para el gato hidráulico.

Diseño placa soportante gato hidraulico

Cargas de diseño

$$\text{Tonf} := 1000 \cdot \text{kgf}$$

$$V := 100 \cdot \text{kgf}$$

$$L := 320 \cdot \text{mm}$$

$$H := 7 \cdot \text{Tonf}$$

$$M := 20 \cdot \text{Tonf} \cdot \text{cm}$$

$$e := 80 \cdot \text{cm}$$

$$P := \frac{M}{e} = 0.25 \cdot \text{Tonf}$$

$$e1 := 80 \cdot \text{cm}$$

$$e2 := 20 \cdot \text{cm}$$

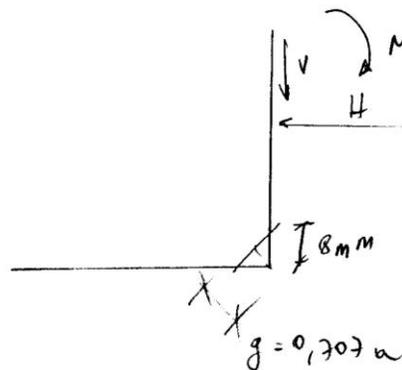
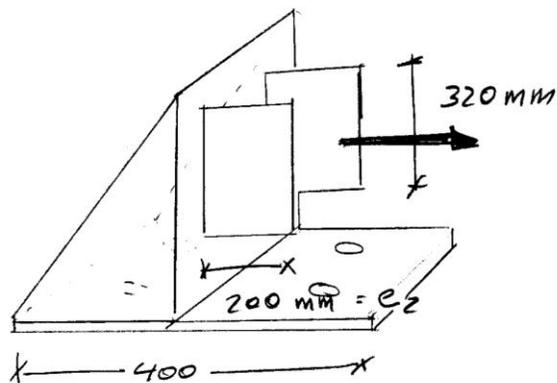
$$f_v := \frac{V}{(4 \cdot L)} = 0.781 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$f_t := \frac{V}{4 \cdot L} = 0.781 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}}$$

$$M := P \cdot e1 + P \cdot e2 = 25 \cdot \text{Tonf} \cdot \text{cm}$$

$$f_m := \frac{M \cdot \left(\frac{L}{2}\right)}{\frac{L^3}{12}} = 0.146 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}}$$

$$f_{\text{dis}} := \sqrt{(f_t + f_m)^2 + f_v^2} = 0.147 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}}$$



Utilizando una **soldadura de filete de 8 mm con electrodo E70XX**, se tiene una resistencia de 1.251 Tonf/cm, estando OK

Diseño de pernos

Se diseña para el caso más desfavorable con 7 Tonf

Se corrobora con el pemo A325 3/4" y con un acero A37-24ES ($F_y=2.43 \text{ Tonf/cm}^2$)

Propiedades placa

$$B_{\text{placa}} := 400 \cdot \text{mm}$$

$$e_{\text{placa}} := 20 \cdot \text{mm}$$

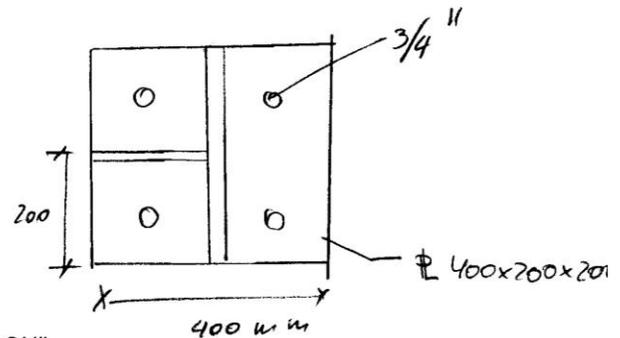
$$F_y := 2.43 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_u := 3.7 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2}$$

Cálculo resistencias

$$dp := \frac{3}{4} \cdot \text{in} = 1.905 \cdot \text{cm}$$

Diámetro de pemo de 3/4"



Fluencia en el área gruesa

$$\phi := 0.9$$

$$A_g := e_{\text{placa}} \cdot B_{\text{placa}} = 80 \cdot \text{cm}^2$$

$$P_{n1} := F_y \cdot A_g = 194.4 \cdot \text{Tonf}$$

$$\phi \cdot P_{n1} = 174.96 \cdot \text{Tonf}$$

Fractura en el área neta efectiva

$$def := dp + \frac{1}{8} \cdot \text{in} = 2.222 \cdot \text{cm}$$

$$A_n := A_g - def \cdot e_{\text{placa}} = 75.555 \cdot \text{cm}^2$$

$$U := 1 - \frac{4}{20} = 0.8$$

$$A_e := U \cdot A_n = 60.444 \cdot \text{cm}^2$$

$$P_{n2} := F_u \cdot A_e = 223.643 \cdot \text{Tonf}$$

$$\phi_2 := 0.75$$

$$\phi_2 \cdot P_{n2} = 167.732 \cdot \text{Tonf}$$

Resistencia al corte de pernos

$$d_p = 0.019 \text{ m}$$

$$R_n := 7.2 \cdot \text{Tonf} \cdot 2 = 14.4 \cdot \text{Tonf}$$

Resistencia al aplastamiento

$$L_c := B_{\text{placa}} = 40 \cdot \text{cm}$$

$$d := d_p = 0.019 \text{ m}$$

$$t := 20 \cdot \text{mm}$$

$$R_{n1} := 1.2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u = 355.2 \cdot \text{Tonf}$$

$$R_{n2} := 2.4 \cdot d \cdot t \cdot F_u \cdot 2 = 67.666 \cdot \text{Tonf}$$

$$R_{n3} := \min(R_{n1}, R_{n2}) = 67.666 \cdot \text{Tonf}$$

Arrancamiento del bloque de corte

NO APLICA

RESUMEN RESISTENCIAS

$$\phi \cdot P_{n1} = 174.96 \cdot \text{Tonf}$$

$$\phi \cdot 2 \cdot P_{n2} = 167.732 \cdot \text{Tonf}$$

$$\phi \cdot R_n = 12.96 \cdot \text{Tonf}$$

$$\phi \cdot R_{n3} = 60.899 \cdot \text{Tonf}$$

Todas estan **OK**

Cálculo del largo de pandeo

$$E := 200000 \text{ MPa}$$

$$L := 200 \text{ mm}$$

$$r := 6 \text{ mm}$$

$$I := \frac{\pi \cdot r^4}{4} = 1.018 \times 10^3 \cdot \text{mm}^4$$

$$P := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} = 5.122 \text{ Tonf}$$

$$A_{\phi 12} := \pi \cdot r^2 = 113.097 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{\text{pandeo}} := \frac{P}{A_{\phi 12}} = 444.132 \text{ MPa}$$

$$f_y := 420 \text{ MPa}$$

A.3.2 Cuñas de sostenimiento de los bloques de hormigón

Diseño cuñas sostenimiento bloques de hormigón

Conexión inferior A

$$e_{\text{cuña}} := 5 \text{ mm}$$

$$P_v := 3 \text{ Tonf} \quad \text{Carga de diseño lateral por placa}$$

$$P_t := 0 \text{ Tonf} \quad \text{Carga de diseño transversal por placa}$$

$$e_1 := 2.5 \text{ cm} \quad e_2 := 180 \text{ mm}$$

$$L := 7 \text{ cm}$$

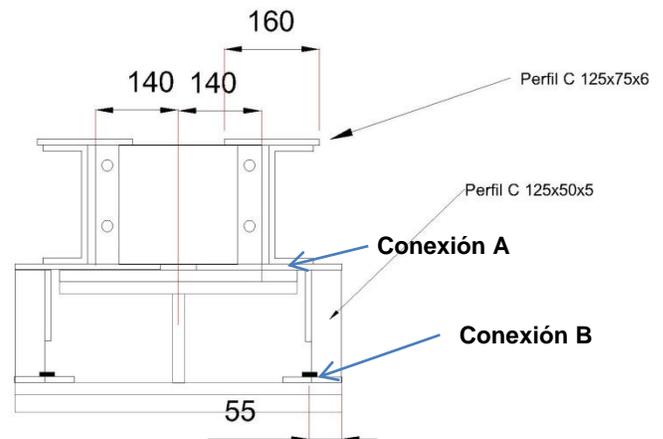
$$f_v := \frac{P_v}{2 \cdot L} = 0.214 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}}$$

$$f_t := \frac{P_t}{2 \cdot L} = 0$$

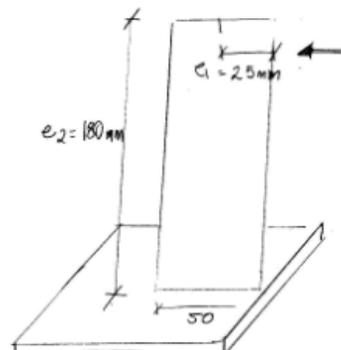
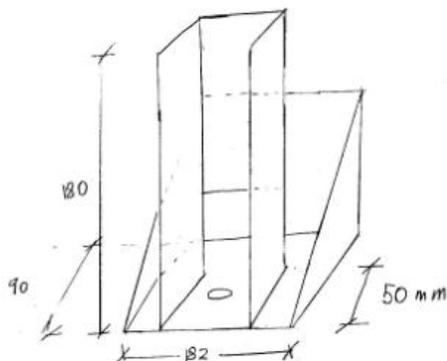
$$M := P_v \cdot e_1 + P_t \cdot e_2 = 7.5 \text{ Tonf} \cdot \text{cm}$$

$$f_m := \frac{M \cdot \left(\frac{L}{2}\right)}{\frac{(L)^3}{12}} = 0.918 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}}$$

$$f_{\text{dis}} := \sqrt{(f_t + f_m)^2 + f_v^2} = 0.943 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}}$$



Basta con un filete de 10 mm (1.563 Tonf/cm), con un electrodo E70XX



Conexión superior B

$$e_{\text{cuña}} := 6 \text{ mm}$$

$$P_v := 2 \cdot \text{Tonf} \quad \text{Carga de diseño lateral por perfil}$$

$$P_t := 0 \text{ Tonf} \quad \text{Carga de diseño transversal por perfil}$$

$$e_1 := \frac{125}{2} \cdot \text{mm} \quad e_2 := \frac{475}{2} \cdot \text{mm}$$

$$L := 475 \text{ mm} \quad \text{Largo Soldadura}$$

$$f_v := \frac{P_v}{2 \cdot L} = 0.021 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}}$$

$$f_t := \frac{P_t}{2 \cdot L} = 0$$

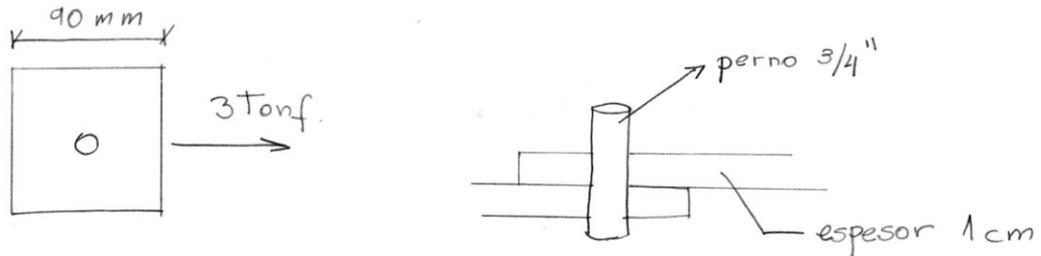
$$M := P_v \cdot e_1 + P_t \cdot e_2 = 12.5 \text{ Tonf} \cdot \text{cm}$$

$$f_m := \frac{M \cdot \left(\frac{L}{2}\right)}{\frac{(L)^3}{12}} = 0.033 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}}$$

$$f_{\text{dis}} := \sqrt{(f_t + f_m)^2 + f_v^2} = 0.039 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}}$$

Basta con un filete de 5 mm (0.782 Tonf/cm), con un electrodo E70XX o una soldadura parcial en ambos extremos de 10 cm

Resistencia de perno en la parte inferior, el cual esta conectado a la viga (conexión A)



$d_p = 0.019m$ Diámetro de perno 3/4" hilo incluido, cizalle simple

ϕR_n perno es de 7,2 Tonf, entonces esta ok considerando que la carga de diseño por perno es 3 Tonf

Fractura en el área neta efectiva

$$F_u := 3.7 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$A_g := 90 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm} = 900 \text{ mm}^2$$

$$d_{ef} := d_p + \frac{1}{8} \cdot \text{in} = 2.222 \text{ cm}$$

$$A_n := A_g - d_{ef} \cdot e_{\text{cuña}}$$

$$A_e := 680 \text{ mm}^2$$

$$P_n := F_u \cdot A_e = 25.16 \text{ Tonf}$$

$$\phi_2 = 0.75$$

$$\phi_2 \cdot P_n = 18.87 \text{ Tonf}$$

OK

A.3.3 Diseño perfil “C” inferior

PERFIL C125X50X5

1. Características de los materiales

$$F_y := 2.53 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Tensión de fluencia}$$

$$E := 2100 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Módulo elasticidad del acero}$$

2.1 Perfiles

Sea la sección C12,5x50x5

Variables

$$B := 50 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Tonf} := 1000 \cdot \text{kgf}$$

$$D := 125 \cdot \text{mm}$$

$$t := 5 \cdot \text{mm}$$

$$R := 0$$

$$L := 575 \cdot \text{mm}$$

$$K := 2.1 \quad \text{Largo de Pand}$$

Parámetros auxiliares

$$r := R + \frac{t}{2}$$

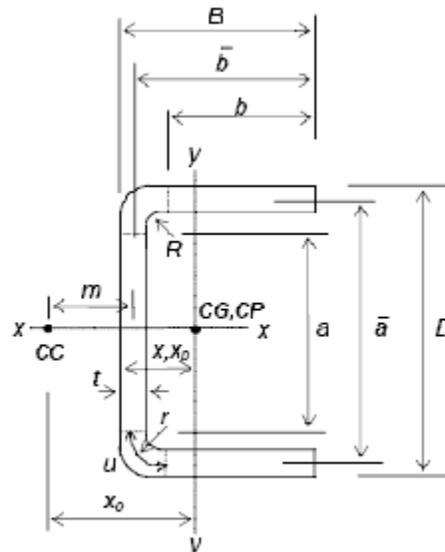
$$u := \pi \cdot \frac{r}{2}$$

$$a := D - 2 \cdot (t + R)$$

$$\alpha := D - t$$

$$b := B - t - R$$

$$\beta := B - \frac{t}{2}$$



Propiedades

Área perfil

$$A := t \cdot [a + 2 \cdot (b + u)] = 10.643 \cdot \text{cm}^2$$

Centro de gravedad

$$x := \frac{t \cdot \left[a \cdot \frac{t}{2} + b^2 + (b + u) \cdot (2 \cdot r + t) - 2 \cdot r^2 - \frac{t^2}{6} \right]}{A} = 1.308 \cdot \text{cm}$$

$$y := \frac{D}{2} = 6.25 \cdot \text{cm}$$

Momento de inercia

$$I_x := 2 \cdot t \cdot \left[0.0417 \cdot a^3 + b \cdot \left(\frac{a}{2} + r \right)^2 + u \cdot \left(\frac{a}{2} + 0.637 \cdot r \right)^2 + 0.149 \cdot r^3 \right]$$

$$I_y := 2 \cdot t \cdot \left[0.0833 \cdot b^3 + b \cdot \left(\frac{b}{2} + r \right)^2 + 0.356 \cdot r^3 \right] - A \cdot \left(x - \frac{t}{2} \right)^2$$

$$I_x = 239.136 \cdot \text{cm}^4$$

$$I_y = 23.798 \cdot \text{cm}^4$$

Módulo Plástico

$$Z_x := t \cdot \left(\frac{a^2}{4} + \alpha \cdot b + \frac{\pi \cdot r \cdot a}{2} + 2 \cdot r^2 + \frac{t^2}{6} \right)$$

$$Z_x = 45.873 \cdot \text{cm}^3$$

Propiedades flexotorsionales

$$\text{eme} := \frac{3\beta^2}{(\alpha + 6 \cdot \beta)}$$

$$J := \frac{t^3 \cdot (a + 2 \cdot b + 2 \cdot u)}{3} = 0.887 \cdot \text{cm}^4$$

$$C_w := \frac{t \cdot \alpha^2 \cdot \beta^2 \cdot (2 \cdot \alpha^3 \cdot \beta + 3 \cdot \alpha^2 \cdot \beta^2)}{12 \cdot (6 \cdot \alpha^2 \cdot \beta + \alpha^3)} = 607.307 \cdot \text{cm}^6$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 4.74 \cdot \text{cm}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 1.495 \cdot \text{cm}$$

Resumen propiedades

$$B = 50 \cdot \text{mm}$$

$$D = 125 \cdot \text{mm}$$

$$t = 5 \cdot \text{mm}$$

$$A = 10.643 \cdot \text{cm}^2$$

$$I_x = 2391356 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_y = 23.798 \cdot \text{cm}^4$$

$$Z_x = 45.873 \cdot \text{cm}^3$$

$$J = 0.887 \cdot \text{cm}^4$$

$$r_x = 4.74 \cdot \text{cm}$$

$$r_y = 1.495 \cdot \text{cm}$$

$$S_x := \frac{I_x}{\frac{D}{2}} = 38.262 \cdot \text{cm}^3$$

2.2 Solicitaciones

$$M := 180 \cdot 2 \cdot \text{Tonf} \cdot \text{mm}$$

$$P := 0 \cdot \text{Tonf}$$

$$V := 0 \cdot \text{Tonf}$$

$$\phi_{\text{flexión}} := 0.9$$

2.3 Diseño a flexión

2.3.1 Pandeo local del elemento

$$\lambda_L := \frac{D - 2t}{t} = 23$$

λ_p NO APLICA

$$\lambda_r := 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 42.928$$

Sección compacta

2.3.2 Estado límite : plastificación

$$M_p := F_y \cdot Z_x$$

$$M_{n1} := M_p = 1.161 \cdot \text{Tonf} \cdot \text{m}$$

2.3.3 Estado límite : pandeo local

$$L_p := 1.76 \cdot r_y \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.758 \text{ m}$$

$$r_{ts} := \sqrt{\frac{\sqrt{I_y \cdot C_w}}{S_x}}$$

$$h_0 := x + e_{me} - \frac{t}{2}$$

$$c := \frac{h_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{I_y}{C_w}}$$

$$L_r := 1.95 \cdot r_{ts} \cdot \frac{E}{0.7 \cdot F_y} \cdot \sqrt{\frac{J \cdot c}{S_x \cdot h_0}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \cdot \left(\frac{0.7 \cdot F_y \cdot S_x \cdot h_0}{E \cdot J \cdot c} \right)^2}} = 3.031 \times 10^3 \cdot \text{mm}$$

$$L_b := L \cdot K = 1.208 \times 10^3 \cdot \text{mm}$$

En este caso al ser menor L_b que L_r no aplica el pandeo local

Entonces

$$M_n := M_{n1} = 1.161 \times 10^3 \cdot \text{Tonf} \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{\text{flexión}} \cdot M_n = 1045 \cdot \text{Tonf} \cdot \text{mm}$$

OK

2.4 Diseño a compresión

2.4.1. Cálculo de esbeltez

$$k := 1$$

$$\lambda := k \cdot \frac{L}{r_x}$$

Resistencia de diseño:

$$F_{ec} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

$$F_{ec} = 140.856 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{crc} := \begin{cases} 0.658 \left(\frac{F_y}{F_{ec}} \right) \cdot F_y & \text{if } F_{ec} \geq 0.44 \cdot F_y \\ (0.877 \cdot F_{ec}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$F_{crc} = 2.511 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$P_n := A \cdot F_{crc}$$

$$P_n = 26.724 \cdot \text{Tonf} \quad \text{OK}$$

2.5 Esfuerzos combinados

$$P_r := P$$

$$P_c := \frac{P_n}{1.67}$$

$$M_r := M$$

$$M_c := \frac{M_n}{1.67}$$

$$FU := \begin{cases} \left[\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{M_r}{M_c} \right) \right] & \text{if } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 \\ \left[\left[\frac{P_r}{2P_c} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{M_r}{M_c} \right) \right] \right] & \text{if } \frac{P_r}{P_c} < 0.2 \end{cases}$$

FU = 0.46

OK

A.3.4 Diseño perfil “C” superior (que sostiene al hormigón)

PERFIL C125X75X6

Tonf := 1000·kgf

1. Características de los materiales

$$F_y := 2.53 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Tensión de fluencia}$$

$$E := 2100 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Módulo elasticidad del acero}$$

2.1 Perfiles

Sea la sección C12,5x50x6

Variables

$$B := 75 \cdot \text{mm}$$

$$D := 125 \cdot \text{mm}$$

$$t := 6 \cdot \text{mm}$$

$$R := 0$$

$$L := 575 \cdot \text{mm}$$

$$K := 2.1$$

Tonf := 1000·kgf

Parámetros auxiliares

$$r := R + \frac{t}{2}$$

$$u := \pi \cdot \frac{r}{2}$$

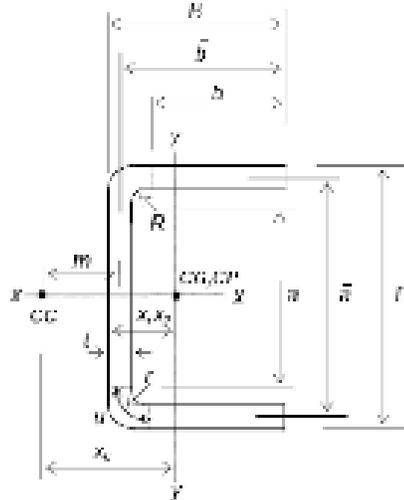
$$a := D - 2 \cdot (t + R)$$

$$\alpha := D - t$$

$$b := B - t - R$$

$$\beta := B - \frac{t}{2}$$

Largo de Pandeo



Propiedades

Área perfil

$$A := t \cdot [a + 2 \cdot (b + u)] = 15.625 \cdot \text{cm}^2$$

Centro de gravedad

$$x := \frac{t \cdot \left[a \cdot \frac{t}{2} + b^2 + (b + u) \cdot (2 \cdot r + t) - 2 \cdot r^2 - \frac{t^2}{6} \right]}{A} = 2.289 \cdot \text{cm}$$

$$y := \frac{b}{2} = 6.25 \cdot \text{cm}$$

Momento de inercia

$$I_x := 2 \cdot t \cdot \left[0.0417 \cdot a^3 + b \cdot \left(\frac{a}{2} + r \right)^2 + u \cdot \left(\frac{a}{2} + 0.637 \cdot r \right)^2 + 0.149 \cdot r^3 \right]$$

$$I_y := 2 \cdot t \cdot \left[0.0833 \cdot b^3 + b \cdot \left(\frac{b}{2} + r \right)^2 + 0.356 \cdot r^3 \right] - A \cdot \left(x - \frac{t}{2} \right)^2$$

$$I_x = 384.634 \cdot \text{cm}^4$$

$$I_y = 87.484 \cdot \text{cm}^4$$

Módulo Plástico

$$Z_x := t \cdot \left(\frac{a^2}{4} + \alpha \cdot b + \frac{\pi \cdot r \cdot a}{2} + 2 \cdot r^2 + \frac{t^2}{6} \right)$$

$$Z_x = 71.758 \cdot \text{cm}^3$$

Propiedades flexotorsionales

$$\text{eme} := \frac{3\beta^2}{(\alpha + 6 \cdot \beta)}$$

$$J := \frac{t^3 \cdot (a + 2 \cdot b + 2 \cdot u)}{3} = 1.875 \cdot \text{cm}^4$$

$$C_w := \frac{t \cdot \alpha^2 \cdot \beta^2 \cdot (2 \cdot \alpha^3 \cdot \beta + 3 \cdot \alpha^2 \cdot \beta^2)}{12 \cdot (6 \cdot \alpha^2 \cdot \beta + \alpha^3)} = 2.178 \times 10^3 \cdot \text{cm}^6$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 4.961 \cdot \text{cm}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 2.366 \cdot \text{cm}$$

Resumen propiedades

$$B = 75 \cdot \text{mm}$$

$$D = 125 \cdot \text{mm}$$

$$t = 6 \cdot \text{mm}$$

$$A = 15.625 \cdot \text{cm}^2$$

$$I_x = 3846336 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_y = 87.484 \cdot \text{cm}^4$$

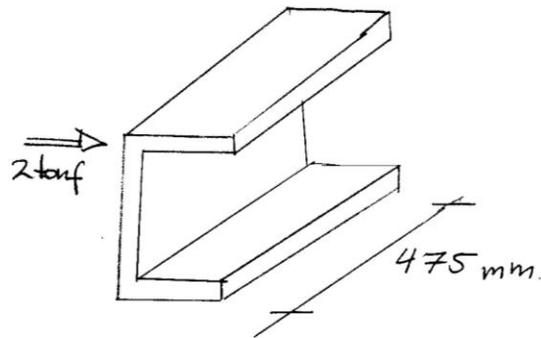
$$Z_x = 71.758 \cdot \text{cm}^3$$

$$J = 1.875 \cdot \text{cm}^4$$

$$r_x = 4.961 \cdot \text{cm}$$

$$r_y = 2.366 \cdot \text{cm}$$

$$S_x := \frac{I_x}{\frac{D}{2}} = 61.541 \cdot \text{cm}^3$$



2.2 Solicitaciones

$$M := 475 \cdot 2 \cdot \text{Tonf} \cdot \text{mm}$$

$$P := 0 \cdot \text{Tonf}$$

$$V := 0 \cdot \text{Tonf}$$

$$\phi_{\text{flexión}} := 0.9$$

2.3 Diseño a flexión

2.3.1 Pandeo local del elemento

$$\lambda_L := \frac{D - 2t}{t} = 18.833$$

λ_p NO APLICA

$$\lambda_Y := 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_Y}} = 42.928$$

Sección compacta

2.3.2 Estado límite : plastificación

$$M_p := F_Y \cdot Z_x$$

$$M_{n1} := M_p = 1.815 \cdot \text{Tonf} \cdot \text{m}$$

2.3.3 Estado límite : pandeo local

$$l_p := 1.76 \cdot r_Y \cdot \sqrt{\frac{E}{F_Y}} = 1.2 \text{ m}$$

$$r_{ts} := \sqrt{\frac{\sqrt{l_y \cdot C_w}}{S_x}}$$

$$h_0 := x + e_m e - \frac{t}{2}$$

$$c := \frac{h_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{l_y}{C_w}}$$

$$L_r := 1.95 \cdot r_{ts} \cdot \frac{E}{0.7 \cdot F_Y} \cdot \sqrt{\frac{J \cdot c}{S_x \cdot h_0}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \cdot \left(\frac{0.7 \cdot F_Y}{E} \cdot \frac{S_x \cdot h_0}{J \cdot c} \right)^2}} = 5.083 \times 10^3 \cdot \text{mm}$$

$$L_b := L \cdot K = 1.208 \times 10^3 \cdot \text{mm}$$

En este caso al ser menor L_b que L_r no aplica el pandeo local

Entonces

$$M_n := M_{n1} = 1.815 \times 10^3 \cdot \text{Tonf} \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{\text{flexión}} \cdot M_n = 1634 \cdot \text{Tonf} \cdot \text{mm}$$

OK

2.4 Diseño a compresión

2.4.1. Cálculo de esbeltez

$$k := 1$$

$$\lambda := k \cdot \frac{L}{r_x}$$

Resistencia de diseño:

$$F_{ec} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

$$F_{ec} = 154.311 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{cr} := \begin{cases} 0.658 \left(\frac{F_y}{F_{ec}} \right) \cdot F_y & \text{if } F_{ec} \geq 0.44 \cdot F_y \\ (0.877 \cdot F_{ec}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$F_{cr} = 2.513 \cdot \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$P_n := A \cdot F_{cr}$$

$$P_n = 39.262 \cdot \text{Tonf} \quad \text{OK}$$

2.5 Esfuerzos combinados

$$P_r := P$$

$$P_c := \frac{P_n}{1.67}$$

$$M_r := M$$

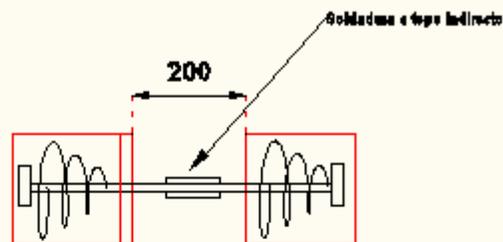
$$M_c := \frac{M_n}{1.67}$$

$$FU := \begin{cases} \left[\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{M_r}{M_c} \right) \right] & \text{if } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 \\ \left[\frac{P_r}{2P_c} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{M_r}{M_c} \right) \right] & \text{if } \frac{P_r}{P_c} < 0.2 \end{cases}$$

FU = 0.777

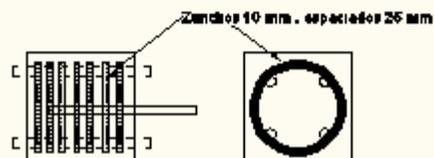
OK

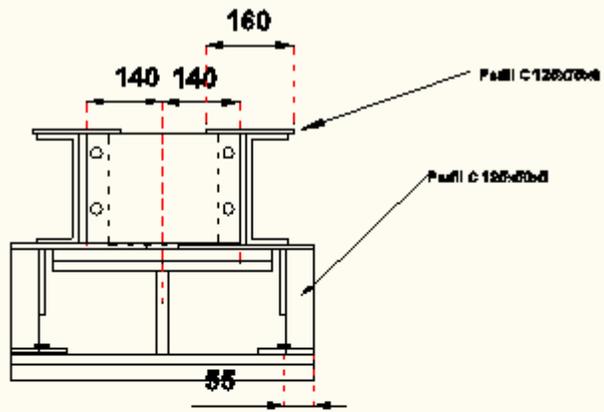
A.3.5 Detalles piezas



DETALLE SOLDADURAS

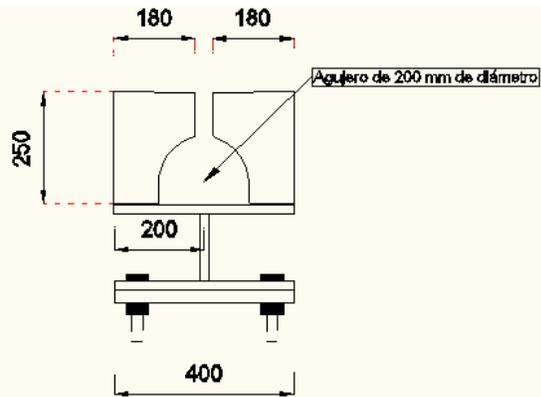
ESCALA 1:10





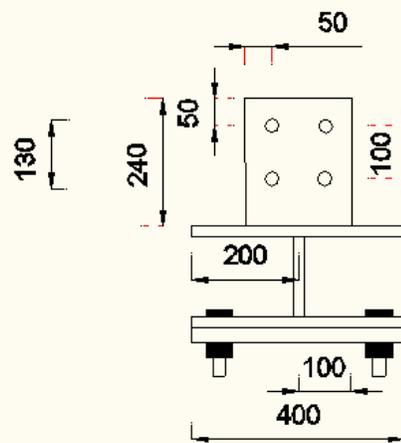
DETALLE GUÍA

ESCALA 1:10

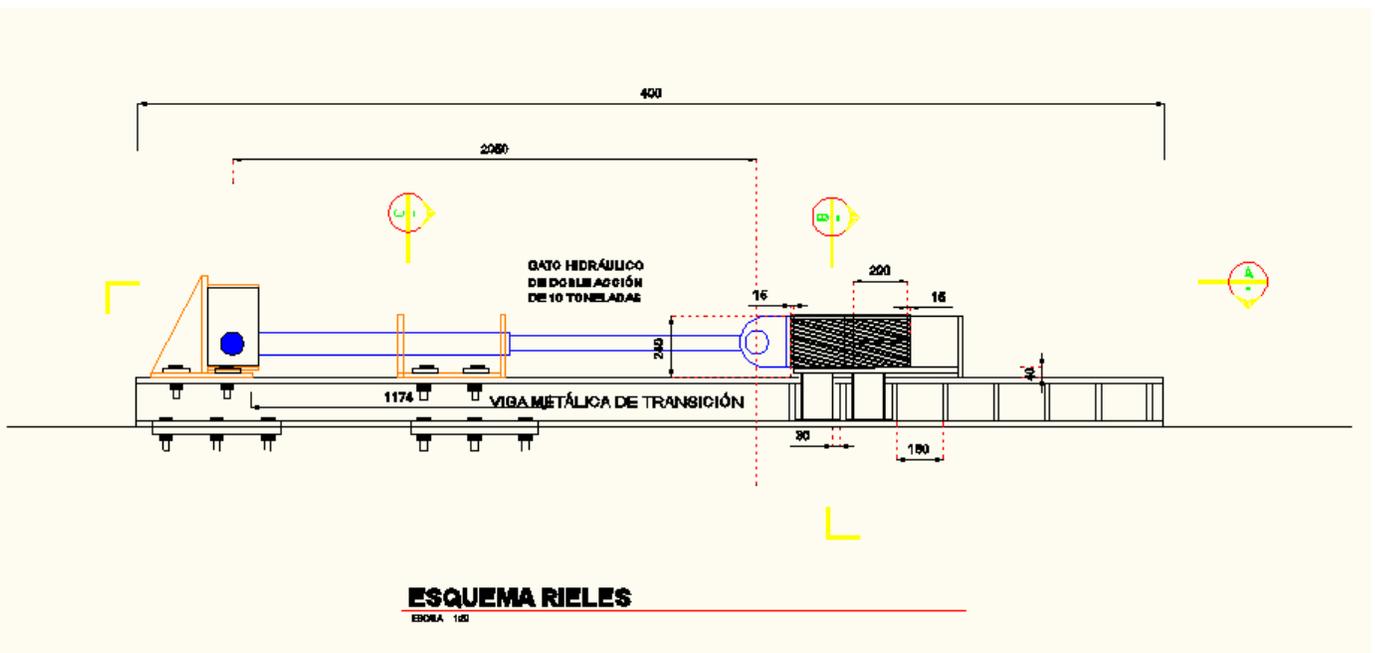


CORTE C

ESCALA 1:20

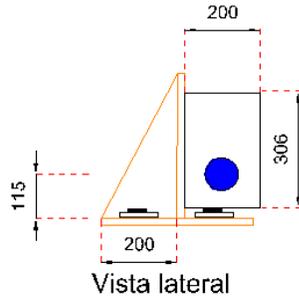


CORTE B

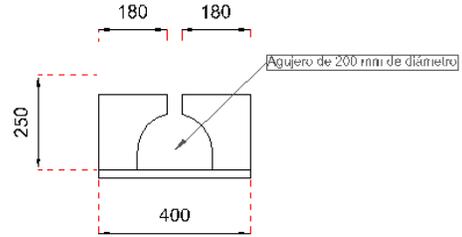


ESQUEMA RIELES

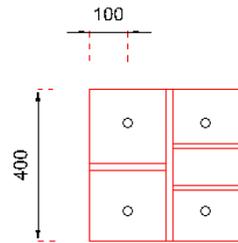
ESORA 180



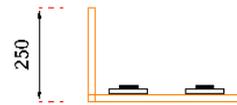
Vista lateral



Vista corte C



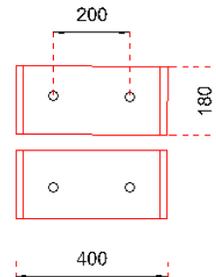
Vista en planta



Vista lateral

PIEZA A

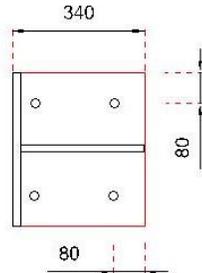
ESCALA 1:20



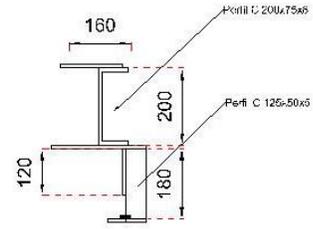
Vista en planta

PIEZA B

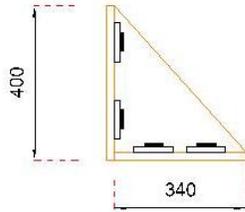
ESCALA 1:20



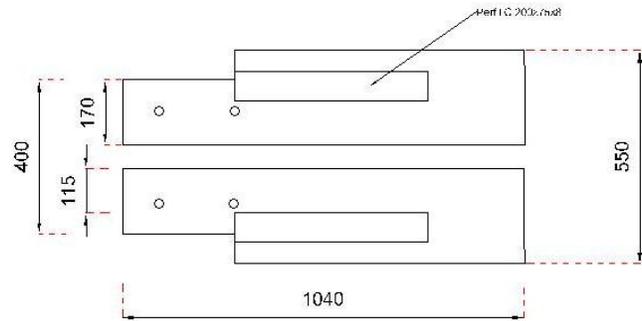
Vista en planta



Vista lateral

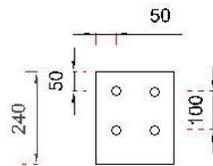


Vista lateral



PIEZA D

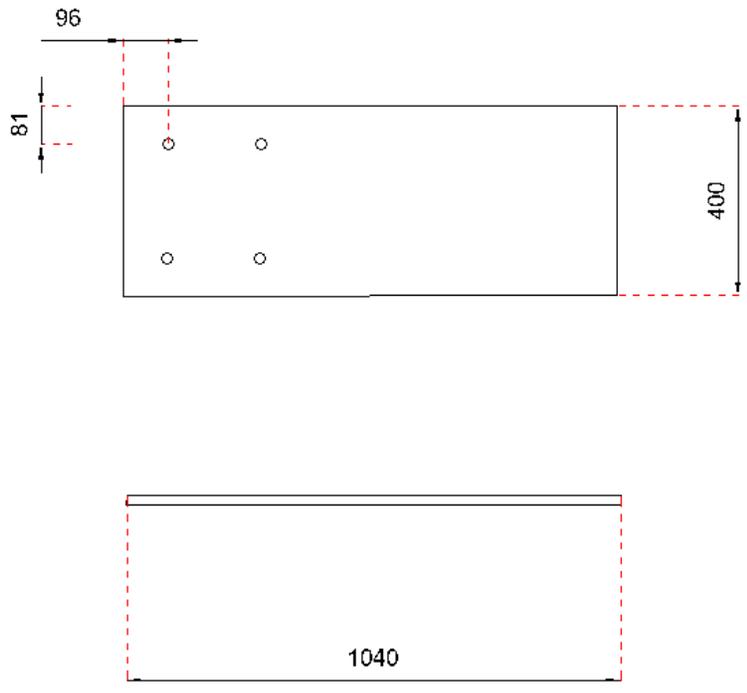
ESCALA 1:20



Vista corte B

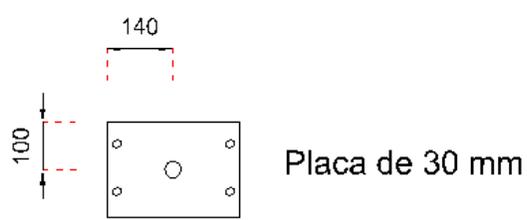
PIEZA C

ESCALA 1:20



PIEZA E

ESCALA 1:20



PIEZA F

ESCALA 1:20

A.4 Diseño 2 del sistema cíclico (detalles)

A.4.1 Diseño sección interacción pernos de anclaje y refuerzo vertical

Diseño a corte

(ACI 318-05)

$$\phi_{\text{corte}} := 0.6$$

$$\text{Tonf} := 1000\text{kgf}$$

1. Resistencia al corte proporcionado por el hormigón

$$V_u := 8.66\text{Tonf}$$

$$f_c := 2500 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}^2} = 24.517\text{MPa} \quad \text{Resistencia especificada a la compresión del hormigón}$$

$$\text{raiz}f_c := \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 4.951\text{MPa}$$

$$f_y := 42000 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}^2} \quad \text{Acero A630-420H}$$

$$h := 30\text{cm}$$

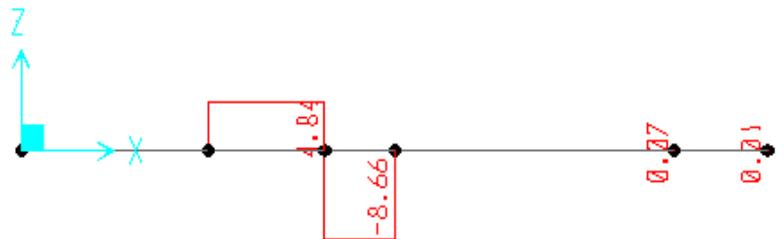
$$\text{rec} := 3.5\text{cm} \quad \text{Recubrimiento}$$

$$d := h - \text{rec} = 0.265\text{m}$$

$$b := 40\text{cm}$$

$$V_c := \left(\text{raiz}f_c \cdot b \cdot \frac{d}{6} \right) = 8.92\text{Tonf}$$

$$V_c = 8.92\text{Tonf}$$



2. Resistencia al corte proporcionado por el acero

$$V_s := \frac{V_u}{\phi_{\text{corte}}} - V_c = 5.513\text{Tonf}$$

Refuerzo de corte por metro lineal

$$A_v := \frac{\frac{V_u}{\phi_{\text{corte}}} - V_c}{f_y \cdot d} = 495.359 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{mm}^2$$

Se propone un EΦ8@10

A.4.2 Diseño viga de fundación

1. Datos viga de fundación

Tonf := 1000kgf

$L_{\text{muro}} := 1000\text{mm}$ Largo del muro
 $BF := 40\text{cm}$ Ancho de la fundación
 $LF := 1.6\text{m}$ Largo de la fundación
 $hF := 30\text{cm}$ Altura de la fundación
 $\gamma_h := 2.5 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$ Densidad del hormigón
 $AF := BF \cdot LF = 0.64\text{m}^2$ Área fundación

$$WF := \frac{LF^2 \cdot BF}{6} = 0.171\text{m}^3$$

2. Solicitaciones

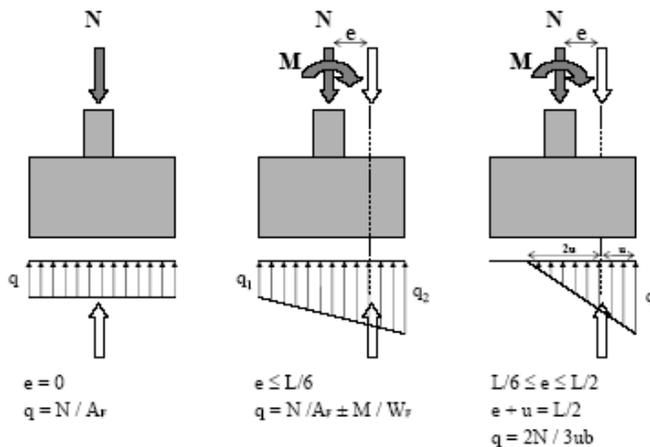
$$M := 6 \cdot \text{Tonf} \cdot \text{m}$$

$$N := 0.630\text{Tonf}$$

$$N_{\text{PP}} := AF \cdot hF \cdot \gamma_h = 0.435\text{Tonf} \quad \text{Peso propio fundación}$$

$$eF := \frac{M}{N} = 9.524\text{m} \quad \text{Excentricidad}$$

3. Análisis de presiones en la base

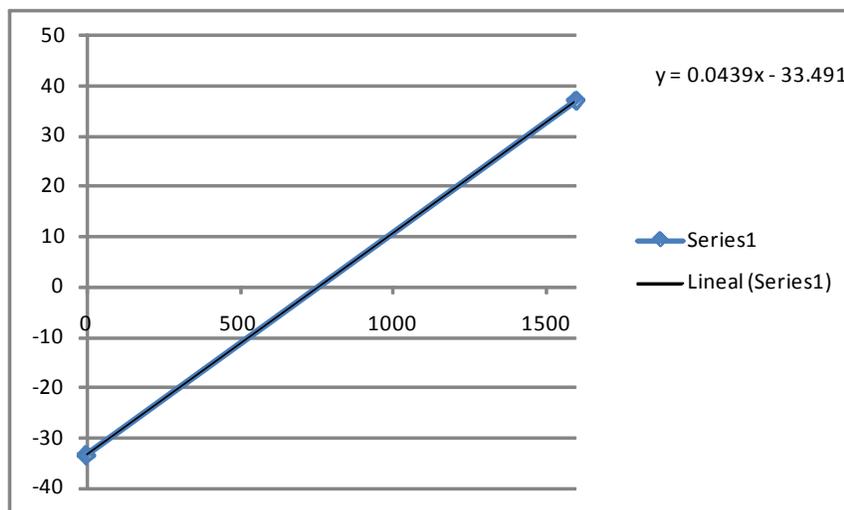


$$\sigma_1 := \frac{(N + N_{PP})}{AF} - \frac{M}{WF}$$

$$\sigma_2 := \frac{(N + N_{PP})}{AF} + \frac{M}{WF}$$

$$\sigma_1 = -33.491 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_2 = 36.821 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}^2}$$



Como el suelo no puede tomar esfuerzos de tracción, toda la parte negativa de la curva no es válida y es igual a 0, la cual se corta en el punto $x=763$ (aproximadamente)

4. Refuerzo a utilizar

La fundación se diseña como una viga empotrada con una carga distribuida calculada con las tensiones obtenidas de los puntos anteriores.

Se considera además una carga distribuida debido al peso propio de la zapata, tal como se muestra en la siguiente figura.

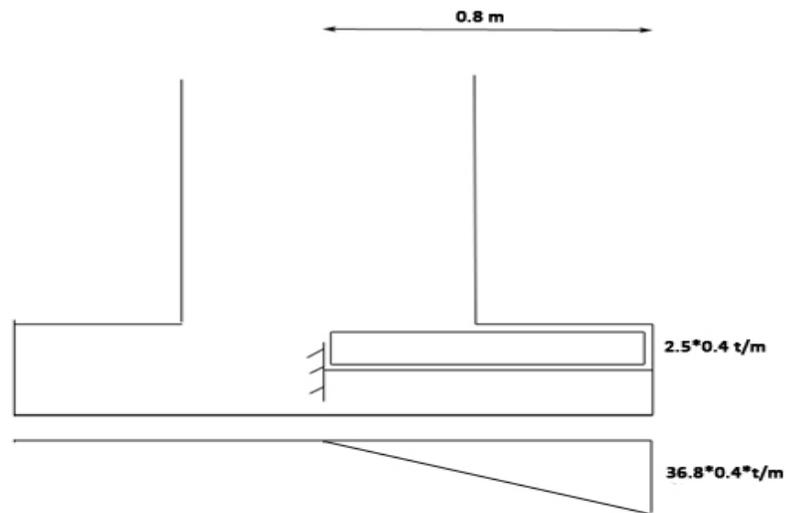


Diagrama de momento

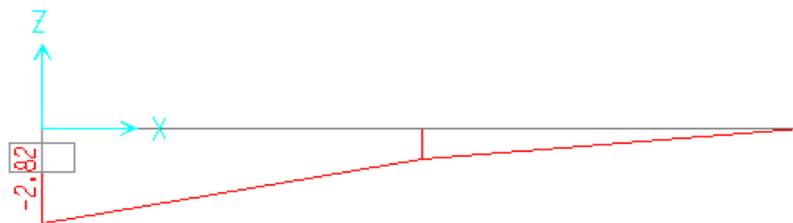
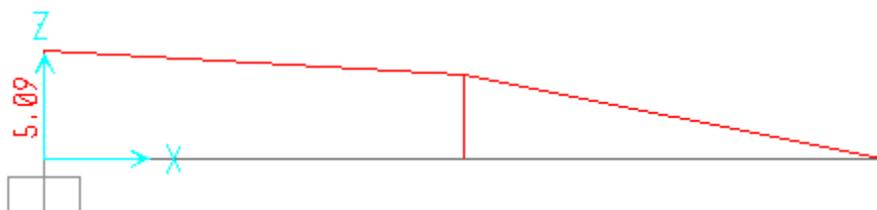


Diagrama de corte



Finalmente se obtienen los siguientes áreas de refuerzo:

$$A_{\text{refuerzo flexión}} := 3.08 \text{ cm}^2$$

Área de refuerzo flexión

Se propone utilizar:

4φ10

$$A_{\text{refuerzo flexión}} = 308 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{refuerzo corte}} := 0.29 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

Área de refuerzo de corte

Se propone utilizar:

Φ8@20

$$A_{\text{refuerzo corte}} = 29 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{mm}^2$$

A.4.3 Longitud de desarrollo barras en tracción

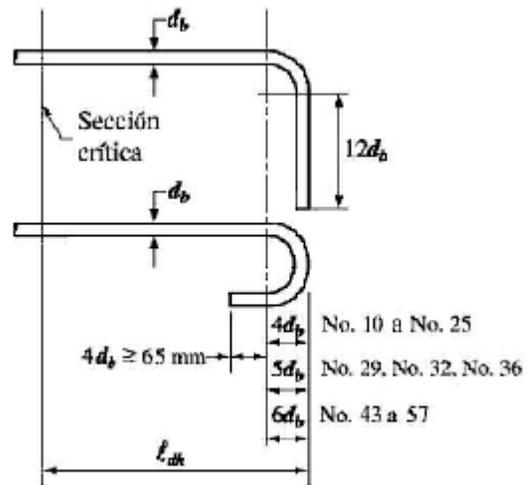
$$d_b := 10 \text{ mm}$$

Ganchos a 90°

$$l_{dh} := \min\left(\frac{f_y \cdot d_b}{5.4 \sqrt{f_c}}, 8 \cdot d_b, 190 \text{ mm}\right) = 8 \cdot \text{cm}$$

Largo gancho

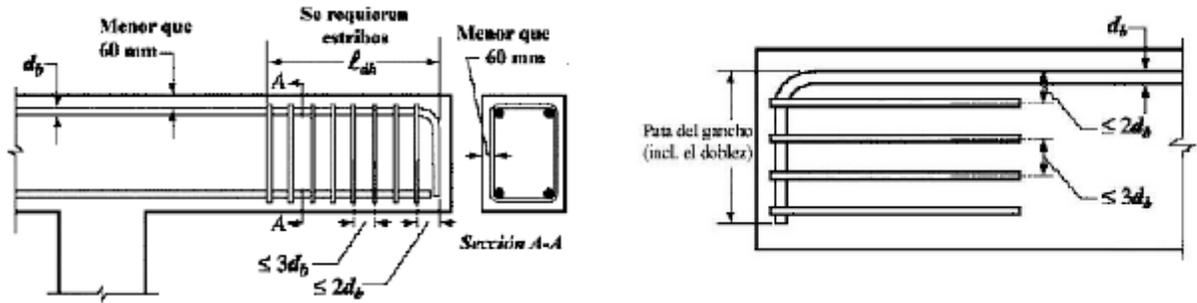
$$12 \cdot d_b = 12 \text{ cm}$$



Según lo indicado en el ACI318-2005,

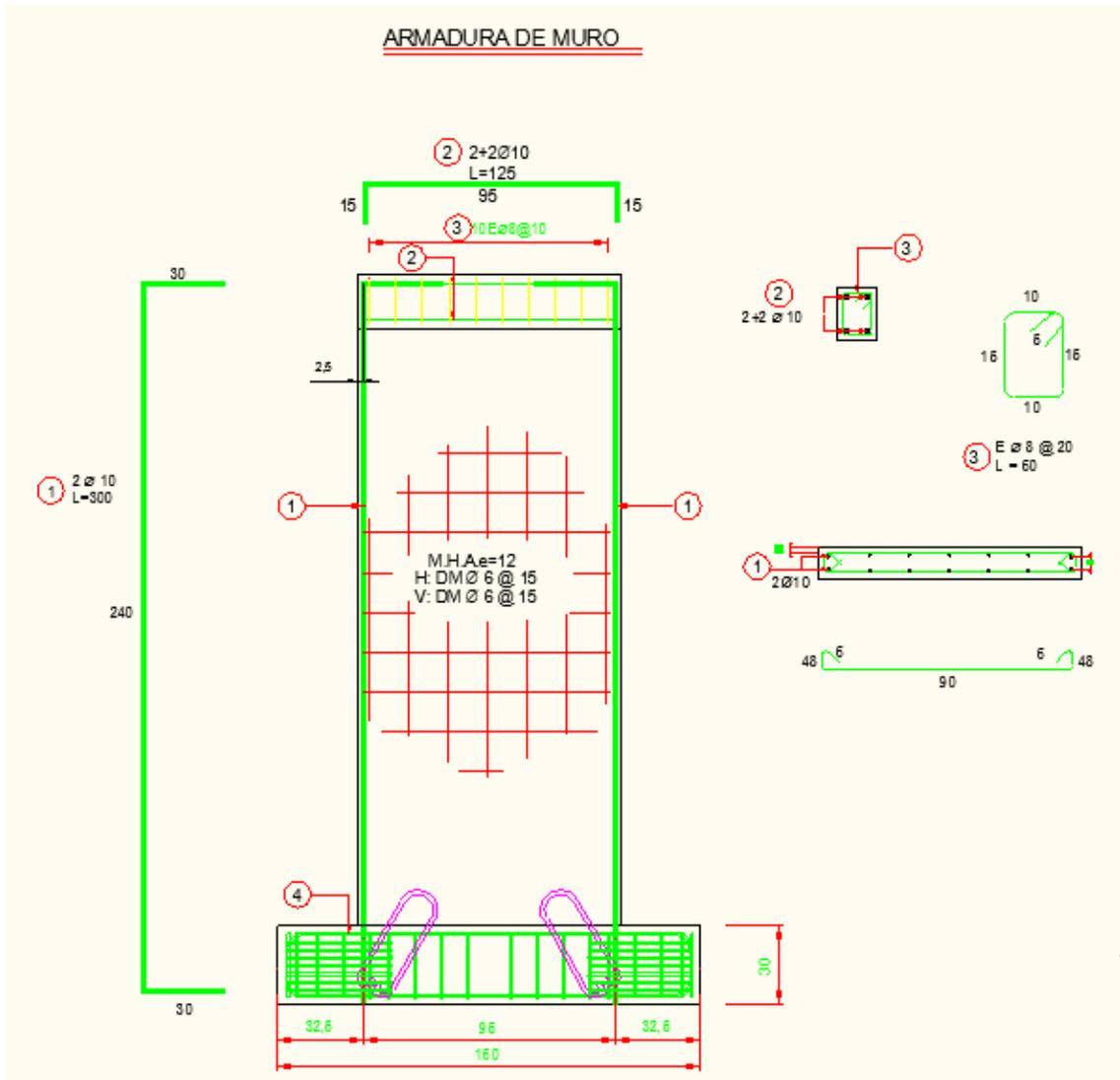
"Para barras que son desarrolladas mediante un gancho estándar en extremos discontinuos de elementos con recubrimiento sobre el gancho de menos de 65 mm en ambos lados y en el borde superior (o inferior), la barra con el gancho se debe confinar con estribos"

Luego se debe tener un confinamiento, como se muestra en la siguiente figura, tanto verticalmente como horizontalmente:

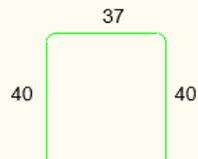
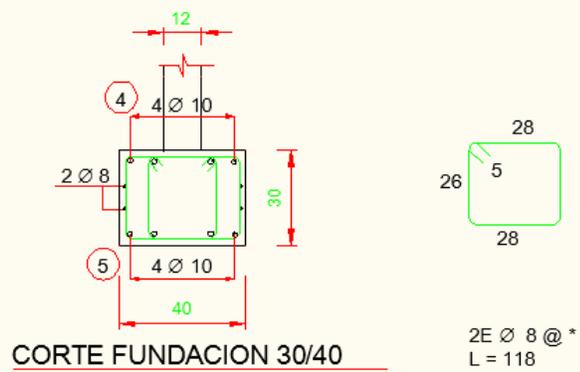
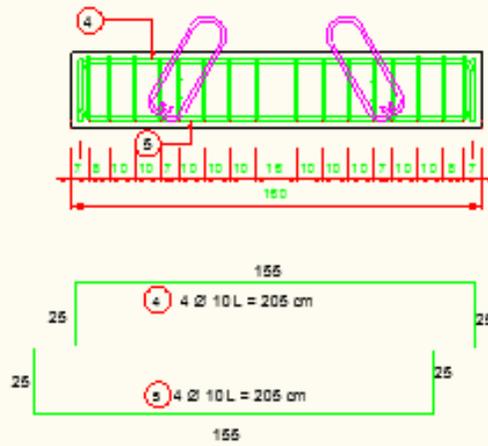


Se coloca una cadena en la parte superior de modo de evitar la fisuración al ser aplicada la carga del gato hidráulico, se utiliza armadura de corte mínima EΦ8@20 y 2Φ10 para resistir flexión, esto se hace además para tener un confinamiento adecuado.

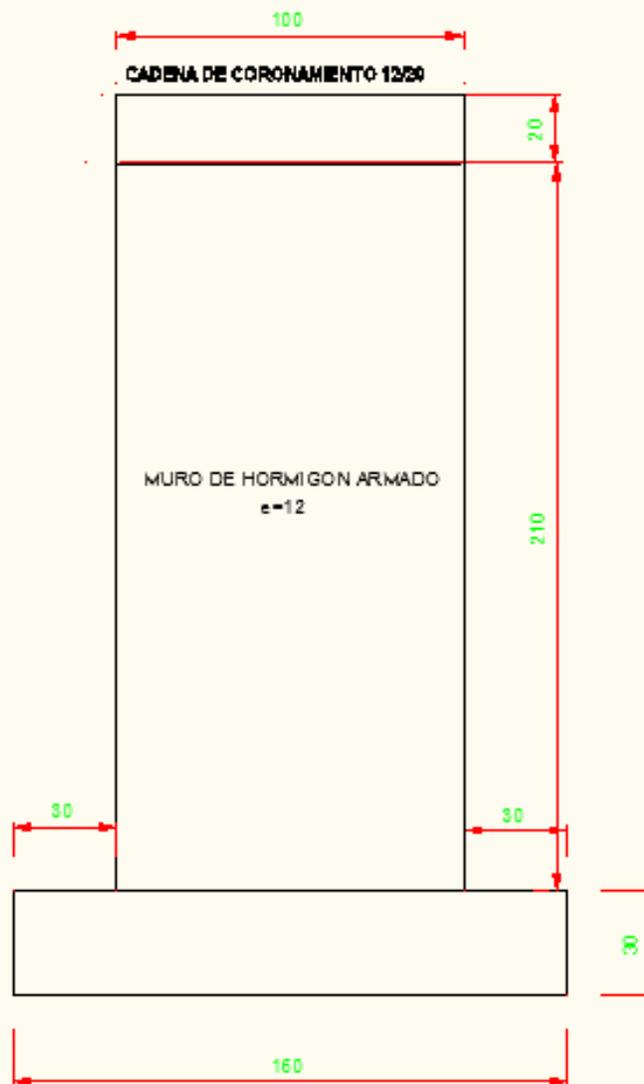
A.4.4 Resumen diseño (detalles)



CORTE VIGA FUNDACIÓN



Hor. $\varnothing 8$ (viga fundación)
 $L = 117$



VISTA FRONTAL

