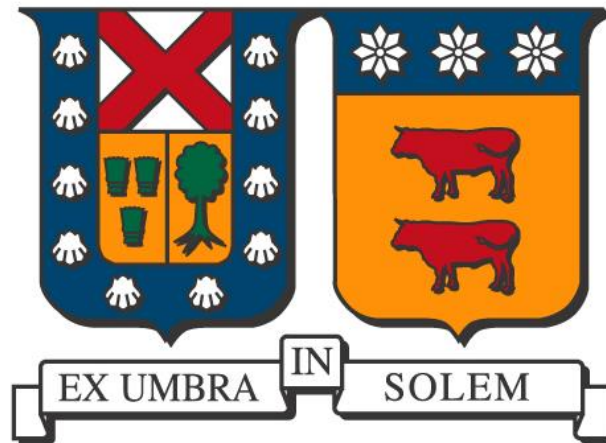


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO – CHILE



**INFLUENCIA DE LA METODOLOGÍA DE PERFORACIÓN EN EL
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE CONEXIONES DE ACERO APERNADAS**

Trabajo de título presentado por
FELIPE ANDRÉS CASTRO OLGUÍN

Como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
CHRISTIAN SCHNAIDT MECKLENBURG

Valparaíso, Octubre de 2018.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio busca determinar la influencia del corte térmico, analizando principalmente el método de corte por plasma en perforaciones de conexiones de acero de calidad ASTM-A36 aplicando cargas estáticas y comparando su desempeño con métodos comunes de perforado mecánico como punzonado y taladrado. La necesidad de este estudio proviene de la actualización de la norma NCh428 que no se había modificado desde 1957, donde la utilización de métodos de corte térmico en agujeros de conexiones apernadas no era aplicable.

Para lograr este objetivo se realizaron siete tipos de ensayos experimentales, en donde se indujo distintos modos de falla. En cada ensayo se utilizó probetas compuestas por dos placas conectadas por un perno para así poder modelar una conexión típica apernada. Las placas poseen la misma geometría en cada tipo de ensayo, pero la perforación se realiza con diferentes métodos: punzonado, taladrado, plasma de definición estándar y plasma de alta definición. La diferencia en la geometría de las probetas de cada uno de ellos permite inducir distintos modos de falla, aplicándoles una carga de tracción proporcionada por la máquina de ensayo a tracción MTS 810.

Finalizado el estudio (usando un total de 84 probetas), se observó que la utilización de plasma de alta definición para la fabricación de agujeros en las conexiones de las probetas, presenta un desempeño similar a las perforaciones con taladro y punzonado, obteniendo un coeficiente de variación en las resistencias para los distintos métodos, inferior a 5% en todos los ensayos. Esto permitió concluir que al aplicar cargas estáticas no existe diferencia significativa en la resistencia de los modos de falla analizados al utilizar los distintos métodos de perforado.

ABSTRACT

The present study seeks to determine the influence of the thermal cut, mainly analyzing the method of plasma cutting in perforations of steel connections of quality ASTM-A36 applying static loads and comparing their performance with common mechanical methods such as punching and drilling. The need for this study comes from the updating of the NCh428 standard that had not been modified since 1957, where the use of thermal cutting methods in bolted connections holes was not applicable.

To achieve this objective, seven types of experimental tests were carried out, where different failure modes were induced. In each one, test pieces composed of two plates connected by a bolt were used in order to model a typical bolted connection. The plates have the same geometry in each type of test, but the hole is done with different methods: punching, drilling, standard definition plasma and high definition plasma. The difference in the geometry of the specimens of each of them allows to induce different failure modes, applying a tensile load provided by the MTS 810 tensile testing machine.

After the study (using a total of 84 specimens), it was observed that the use of high definition plasma for the manufacture of holes in the connections of the specimens, presents a similar performance to drilling and punching, obtaining a coefficient of variation in resistances for the different methods, less than 5% in all the tests. This allowed us to conclude that when applying static loads there is no significant difference in the resistance of the failure modes analyzed when using the different methods.

ÍNDICE

Resumen Ejecutivo	iii
Abstract.....	iv
Índice.....	v
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas.....	x
Capítulo 1	
Introducción.....	1
1.1. Justificación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Alcance y Limitaciones.....	3
Capítulo 2	
Antecedentes generales	4
2.1. Planchas de acero ASTM A36.....	4
2.2. Perno de alta resistencia	4
2.3. Métodos Mecánicos de Perforado.....	6
2.4. Métodos Térmicos de Perforado	7
2.5. Bases de Diseño	13
2.6. Modos de Fallas.....	13
Capítulo 3	
Diseño Previo.....	17
3.1. Materiales utilizados.....	17
3.2. Diseño de Probetas.....	18
3.3. Mecanismo de amplificación de fuerza.....	31
3.4. Verificación del cálculo previo	43
Capítulo 4	
Equipo Experimental	44
4.1. Descripción de los aparatos	44

4.2. Procedimiento experimental.....	48
4.3. Resguardos.....	52
Capítulo 5	
Certificación de Materiales	53
5.1. Certificado de calidad de planchas.....	53
5.2. Comprobación de certificados de calidad.....	54
5.3. Certificado de calidad de pernos	58
Capítulo 6	
Cálculo y Comparación de Resultados	60
6.1. Ensayo I: “Ruptura del área neta con perno de 5/8 [pulg]”	60
6.2. Ensayo II: “Aplastamiento con perno de 5/8 [pulg]”	64
6.3. Ensayo III: “Corte del perno hilo incluido con perno de 5/8 [pulg]”	68
6.4. Ensayo IV: “Corte del perno hilo excluido con perno de 5/8 [pulg]”	71
6.5. Ensayo V: “Ruptura del área neta con perno de 3/4 [pulg]”	74
6.6. Ensayo VI: “Aplastamiento con perno de 3/4 [pulg]”	78
6.7. Ensayo VII: “Corte del perno hilo incluido con perno de ¾ [pulg]”	81
6.8. Comparación de Resultados	85
6.9. Recomendaciones	88
Capítulo 7	
Conclusiones Finales.....	89
Referencias	91
Anexos	93

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 PROBETA COMPUESTA POR DOS PLACAS Y UN PERNO CENTRAL	2
FIGURA 2-1 GEOMETRÍA GENERAL DEL HILO DE UN PERNO DE ALTA RESISTENCIA [8].....	5
FIGURA 2-2 ESQUEMA GENERAL DE UNA BROCA DE ACERO [10].....	6
FIGURA 2-3 ESQUEMA DEL CORTE POR PUNZONADO [11].....	7
FIGURA 2-4 ESQUEMA DEL PROCESO DE OXICORTE [13]	8
FIGURA 2-5 ESQUEMA DE CORTE POR LASER [14]	10
FIGURA 2-6 ESQUEMA DE CORTE POR PLASMA DE ALTA DEFINICIÓN [15]	11
FIGURA 2-7 FALLA A CORTE DEL PERNO [19]	14
FIGURA 2-8 FALLA POR TRACCIÓN DEL ÁREA NETA [19]	15
FIGURA 2-9 FALLA POR APLASTAMIENTO DE LA PLACA [19]	15
FIGURA 2-10 FALLA POR CORTE DEL ÁREA NETA.....	16
FIGURA 3-1: MÁQUINA DE CORTE TÉRMICO PROARC	19
FIGURA 3-2 ACABADO SUPERFICIAL DE AGUJERO REALIZADO CON PLASMA DE ALTA DEFINICIÓN	19
FIGURA 3-3: MÁQUINA DE CORTE TÉRMICO HOUGONG	20
FIGURA 3-4 ACABADO SUPERFICIAL DE AGUJERO REALIZADO CON PLASMA DE DEFINICIÓN ESTÁNDAR.....	20
FIGURA 3-5: MÁQUINA DE CORTE MECÁNICO GEKA	21
FIGURA 3-6 ACABADO SUPERFICIAL DE PERFORACIÓN REALIZADA CON PUNZONADO	21
FIGURA 3-7: TALADRO ELECTROMAGNÉTICO.....	22
FIGURA 3-8 ACABADO SUPERFICIAL DE PERFORACIÓN REALIZADA CON TALADRO	22
FIGURA 3-9 GEOMETRÍA DE LAS PLACAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO I	27
FIGURA 3-10 GEOMETRÍA DE LAS PLACAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO II	27
FIGURA 3-11 GEOMETRÍA DE LAS PLACAS UTILIZADAS EN LOS ENSAYO III Y IV.....	28
FIGURA 3-12 GEOMETRÍA DE LAS PLACAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO V	28
FIGURA 3-13 GEOMETRÍA DE LAS PLACAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO VI.....	29
FIGURA 3-14 GEOMETRÍA DE LAS PLACAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO VII	29
FIGURA 3-15 VISTA LATERAL Y FRONTAL DEL MECANISMO Y PROBETA ENSAMBLADOS	31
FIGURA 3-16 VISTA ISOMÉTRICA DEL MECANISMO DE AMPLIFICACIÓN DE FUERZA ENSAMBLADO	32
FIGURA 3-17 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE UNA VIGA DEL MECANISMO	33
FIGURA 3-18 CURVA DE ESFUERZO DE CORTE VS DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL DE PERNOS A325 [21]	34
FIGURA 3-19: APERTURA MÁXIMA ENTRE MORDAZAS DE LA MÁQUINA MTS 810.....	36
FIGURA 3-20 FUERZAS QUE INTERACTÚAN EN UNA VIGA DEL MECANISMO	37
FIGURA 3-21 COTAS DE PLACAS DE CONEXIÓN.....	39
FIGURA 3-22 MEDIDAS EN [MM] DEL MECANISMO Y PROBETAS ENSAMBLADOS	41

FIGURA 3-23 PLACAS TP1, TP3 Y VIGA CON PLACAS TP2 SOLDADAS.....	42
FIGURA 4-1 MAQUINA MTS 810	45
FIGURA 4-2 SISTEMA MTS 647 HYDRAULIC WEDGE GRIP	45
FIGURA 4-3 MORDAZA N°1 (IZQUIERDA) Y N°2 (DERECHA)	46
FIGURA 4-4 HERRAMIENTA DE AJUSTE, RESORTES Y TORNILLOS PARA INSTALAR LAS MORDAZAS	46
FIGURA 4-5 GABINETE CON CONTROLADOR MTS 407	47
FIGURA 4-6 UNIDAD DE CONTROL HIDRÁULICO MTS HYDRAULIC POWER UNIT CONTROL	48
FIGURA 4-7 MEDICIÓN Y CONTABILIZACIÓN DE PLACAS (IZQUIERDA); PINTURA Y CUADRICULADO (DERECHA)	49
FIGURA 4-8 UNIÓN DE PLACAS MEDIANTE UN PERNO	49
FIGURA 4-9 MONTAJE DE PROBETA DIRECTO A MÁQUINA MTS 810	50
FIGURA 4-10 MONTAJE DEL MECANISMO DE AMPLIFICACIÓN DE FUERZA	50
FIGURA 4-11 MONTAJE DE LA PROBETA EN MECANISMO	51
FIGURA 5-1 PROBETAS CONFECCIONAS PARA REALIZAR ENSAYO A TRACCIÓN	55
FIGURA 5-2 CURVAS DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN PARA CERTIFICACIÓN DE PROBETAS T5 Y T6	56
FIGURA 5-3 CURVAS DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN PARA CERTIFICACIÓN DE PROBETAS T8 Y T9	57
FIGURA 6-1 GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN DE TODAS LAS PROBETAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO I	61
FIGURA 6-2 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS SEGÚN MÉTODO DE PERFORACIÓN EN ENSAYO I	62
FIGURA 6-3 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE DEFORMACIONES ENSAYO I	63
FIGURA 6-4 GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN DE TODAS LAS PROBETAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO II	64
FIGURA 6-5 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS SEGÚN MÉTODO DE PERFORACIÓN EN ENSAYO II	66
FIGURA 6-6 FALLA INICIAL POR APLASTAMIENTO Y POSTERIOR FALLA POR CORTE [27]	67
FIGURA 6-7 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE DEFORMACIONES ENSAYO II	67
FIGURA 6-8 GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN DE TODAS LAS PROBETAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO III	68
FIGURA 6-9 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS SEGÚN MÉTODO DE PERFORACIÓN EN ENSAYO III	70
FIGURA 6-10 GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN DE TODAS LAS PROBETAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO IV	72
FIGURA 6-11 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS SEGÚN MÉTODO DE PERFORACIÓN EN ENSAYO IV	73
FIGURA 6-12 GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN DE TODAS LAS PROBETAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO V	74
FIGURA 6-13 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS SEGÚN MÉTODO DE PERFORACIÓN EN ENSAYO V	76
FIGURA 6-14 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE DEFORMACIONES [CM] ENSAYO V	77

FIGURA 6-15 GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN DE TODAS LAS PROBETAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO VI.....	78
FIGURA 6-16 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS SEGÚN MÉTODO DE PERFORACIÓN EN ENSAYO VI.....	80
FIGURA 6-17 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE DEFORMACIONES ENSAYO VI.....	81
FIGURA 6-18 GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN DE TODAS LAS PROBETAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO III.....	82
FIGURA 6-19 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS SEGÚN MÉTODO DE PERFORACIÓN EN ENSAYO VII.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS PERNOS DE DIÁMETRO 5/8" Y 3/4" [8]	5
TABLA 2-2 ESFUERZO NOMINAL A TRACCIÓN Y CORTE DE PERNOS A325 [9]	6
TABLA 3-1: MATRIZ DE ENSAYO.....	24
TABLA 3-2 DIMENSIÓN NOMINAL DE AGUJEROS SEGÚN DIÁMETRO DEL PERNO [9]	25
TABLA 3-3 DISTANCIA MÍNIMA AL BORDE DESDE EL CENTRO DEL AGUJERO [9]	26
TABLA 3-4 CÓDIGO DE PLACA, DIÁMETRO Y LARGO DEL PERNO UTILIZADO EN LOS ENSAYOS..	26
TABLA 3-5 RESUMEN DE LAS RESISTENCIAS NOMINALES DE LOS MODOS DE FALLA PARA LOS 7 ENSAYOS	30
TABLA 3-6 PROPIEDADES DE PERFIL HEB 160.....	37
TABLA 4-1 DATOS DE ENTRADA INGRESADOS AL SOFTWARE	51
TABLA 5-1 DATOS DE CERTIFICADO DE PLANCHA PARA LOS ENSAYO I Y II.....	54
TABLA 5-2 DATOS DE CERTIFICADO DE PLANCHA PARA LOS ENSAYO V Y VI.....	54
TABLA 5-3 RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYO A TRACCIÓN	57
TABLA 5-4 PROMEDIO DE ESFUERZO A FLUENCIA Y TENSIÓN ÚLTIMA POR COLADA	58
TABLA 5-5 RESISTENCIA TEÓRICA DE LOS ENSAYO I, II, V Y VI A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE LOS CERTIFICADOS.....	58
TABLA 5-6 RESISTENCIA TEÓRICA DE LOS ENSAYO III, IV Y VII A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE LOS CERTIFICADOS.....	59
TABLA 6-1 CARGAS MÁXIMAS SEGÚN PROBETAS DEL ENSAYO I	61
TABLA 6-2 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA ENSAYO I	62
TABLA 6-3 VALORES COMPARATIVOS DE RESISTENCIA DE ENSAYO I.....	62
TABLA 6-4 CARGAS MÁXIMAS SEGÚN PROBETAS DEL ENSAYO II	65
TABLA 6-5 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA ENSAYO II	65
TABLA 6-6 VALORES COMPARATIVOS DE RESISTENCIA DE ENSAYO II	66
TABLA 6-7 CARGAS MÁXIMAS SEGÚN PROBETAS DEL ENSAYO III.....	69
TABLA 6-8 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA ENSAYO III	69
TABLA 6-9 VALORES COMPARATIVOS DE RESISTENCIA DE ENSAYO III	70
TABLA 6-10 DIAMETRO Y ÁREA PERNO 5/8"	71
TABLA 6-11 CARGAS MÁXIMAS SEGÚN PROBETAS DEL ENSAYO IV.....	72
TABLA 6-12 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA ENSAYO IV.....	73
TABLA 6-13 VALORES COMPARATIVOS DE RESISTENCIA DE ENSAYO IV	74
TABLA 6-14 CARGAS MÁXIMAS SEGÚN PROBETAS DEL ENSAYO V	75
TABLA 6-15 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA ENSAYO V	75

TABLA 6-16 VALORES COMPARATIVOS DE RESISTENCIA DE ENSAYO V	76
TABLA 6-17 CARGAS MÁXIMAS SEGÚN PROBETAS DEL ENSAYO VI.....	79
TABLA 6-18 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA ENSAYO VI.....	79
TABLA 6-19 VALORES COMPARATIVOS DE RESISTENCIA DE ENSAYO VI.....	80
TABLA 6-20 CARGAS MÁXIMAS SEGÚN PROBETAS DEL ENSAYO VII	82
TABLA 6-21 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA ENSAYO VII	83
TABLA 6-22 VALORES COMPARATIVOS DE RESISTENCIA DE ENSAYO VII.....	83
TABLA 6-23 SECCIÓN TRANSVERSAL PERNOS DE 3/4"	84
TABLA 6-24 RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS SIETE ENSAYOS	85

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

En Chile la utilización de métodos de corte térmico en planchas de acero se hace cada vez más recurrente ya que el avance tecnológico que conlleva ha significado que los procesos de corte y perforación se realicen de forma mucho más precisa, rápida y eficiente además de un importante ahorro en cuanto a costos de producción. Sin embargo, la utilización de estos métodos en agujeros de conexiones apernadas estaba muy restringida, ya que la NCh428 of.57 “Ejecución de construcciones de acero” [1] solo consideraba el uso de métodos mecánicos como el taladrado o punzonado. Por la antigüedad de la norma era indispensable su actualización, con el objetivo de incorporar los avances en cuanto a fabricación, montaje y control de calidad, que son las materias que están dentro de su alcance. A fines del año 2016 la versión en estudio de la nueva norma incorporó la utilización de métodos de corte térmico para perforaciones en conexiones de acero apernadas, pero sólo bajo “la aprobación del ingeniero a cargo”, lo que significaba una limitación en cuanto a su uso.

Diversos estudios desarrollados [2][3] advierten que el método que se haya empleado para realizar la perforación influye considerablemente en la resistencia a las cargas cíclicas. Es curioso que exista menor cantidad de estudios en los que se utilizan cargas unidireccionales, dejando en evidencia que los esfuerzos por comprender este fenómeno aún son insuficientes. Por ello, es interesante un análisis experimental que ayude a aclarar el real desempeño de este tipo de métodos y con materiales empleados usualmente en Chile.

Por lo anterior, este estudio busca determinar experimentalmente cuanto influye en la resistencia de conexiones apernadas, al utilizar el método de corte por plasma comparándolo con métodos de perforado mecánico. Para este efecto se realizó un total de siete tipos de ensayos en los cuales se tuvo cuidado de mantener constantes todas las condiciones exceptuando el acabado del agujero. Se utilizarán probetas compuestas por dos placas de acero ASTM A36 y un perno de calidad ASTM A325, como se muestra en la Figura 1-1, donde en cada una se indujo diferentes modos de falla. Las placas se construyeron con una geometría específica para cada ensayo, aplicándoles una carga de tracción en la máquina MTS 810 del laboratorio de ingeniería sismorresistente de la Universidad Técnica Federico Santa María hasta alcanzar la rotura.



Figura 1-1 Probeta compuesta por dos placas y un perno central

Los modos de falla analizados fueron la fractura del área neta, el aplastamiento de las placas y la ruptura por corte del perno con el hilo incluido o con el hilo excluido del plano de corte los cuales se detallaran en el siguiente capítulo y que fallaran aplicando un desplazamiento monótonamente creciente.

1.2. OBJETIVOS

El presente estudio de título tiene como objetivo lo siguiente:

1. Realizar un estudio experimental utilizando probetas que poseen perforaciones realizadas con métodos mecánicos y térmicos (Plasma).
2. Analizar la influencia que ejerce el método de perforación en conexiones de acero aplicando cargas estáticas a partir de los resultados obtenidos.
3. Poner en discusión la utilización de métodos térmicos en agujeros para pernos de conexiones en la nueva actualización de la norma NCh428:2017 [4] que reemplaza a la antigua norma NCh428:1957.
4. Tener registro sobre los resultados del estudio de perforaciones en conexiones realizadas con métodos térmicos para materiales utilizados frecuentemente en Chile.

1.3. ALCANCE Y LIMITACIONES

El presente estudio se basa en resultados de ensayos de probetas compuestas por placas acero de calidad A36 y pernos de alta resistencia de calidad ASTM A325. Se eligieron estos materiales porque son utilizados frecuentemente en construcciones de acero en Chile y también por las limitaciones del aparato experimental en cuanto a capacidad, ya que con materiales de mayor resistencia no sería posible inducir las fallas requeridas en este estudio.

Para efectos de comparación, en la confección de las placas se utilizaron cuatro de métodos de perforación, dos realizados de forma mecánica, punzonado y taladrado, y dos con corte térmico, empleándose dos tipos plasma que logran un acabado superficial de distinta calidad. La utilización del método de corte por plasma se debe a que éste logra un acabado superficial de gran calidad, a un costo moderado comparado con otros métodos.

La idea principal del experimento es reproducir las condiciones de una conexión típica apernada. Debido a la limitada capacidad de la máquina MTS 810 que se utilizó para realizar los ensayos, fue que se decidió emplear un solo perno en la conexión y además crear un mecanismo capaz de aumentar en tres veces la fuerza aplicada por la máquina. Para determinar la influencia del método de perforación, se compararán las resistencias medidas en cada tipo de ensayo.

Capítulo 2

ANTECEDENTES GENERALES

En este capítulo se realiza una descripción general de los conceptos que se utilizarán a lo largo de este documento. Entre estos se describen los principales materiales utilizados y los métodos de perforación con los que se fabricaron las probetas.

Además, se mencionan las bases de diseño con la que se rige este estudio y también se describen los diferentes modos de falla que presenta el tipo de conexión analizado en este trabajo, ilustrando la falla en cada caso.

2.1. PLANCHAS DE ACERO ASTM A36

La calidad de acero ASTM A36 es la más utilizada en Chile para estructuras industriales en proyectos de ingeniería civil de acuerdo a un artículo publicado por la CChC [5]. Por lo anterior es que se considerará esta calidad de acero para el desarrollo del presente estudio.

Es parte del grupo de los acero de alta resistencia y es utilizado frecuentemente en todo tipo de estructuras metálicas. La denominación de este tipo de acero fue establecida por la American Society for Testing and Materials (ASTM) y presenta una resistencia mínima a la fluencia de 36 [ksi] y a la rotura de 58 [ksi] que se indica en la ASTM A36 [6].

2.2. PERNO DE ALTA RESISTENCIA

Los dos tipos más comunes de pernos de alta resistencia son designados por la especificación ASTM como A490 y A325 [7], siendo este último el que se utilizará en el presente estudio. Este perno presenta una cabeza hexagonal y se usan con tuercas hexagonales de grado 2H de acuerdo a la ASTM A194 y con golillas o arandelas redondas. Están hechos de acero aleado medio de carbono templado y revenido.

La resistencia a tracción depende del diámetro y calidad del perno mientras que la resistencia a corte depende además de la ubicación del hilo en el plano de corte, ya que el área será distinta en cada caso. La Figura 2-1 muestra las dimensiones y geometría del hilo definida por la especificación internacional ANSI/ASME B1.1 [8] mientras que la Tabla 2-1 presenta el área con y sin hilo para los dos pernos utilizados en este estudio.

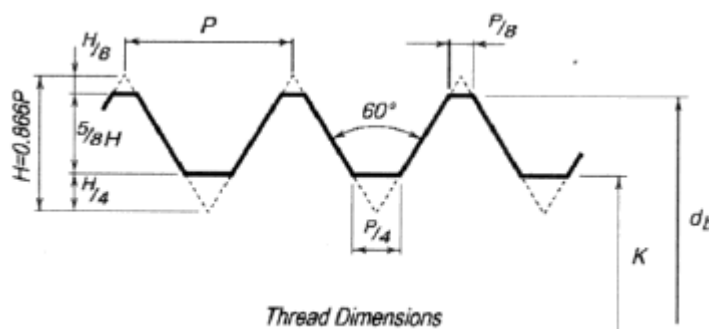


Figura 2-1 Geometría general del hilo de un perno de alta resistencia [8]

Tabla 2-1 Características geométricas de los pernos de diámetro 5/8" y 3/4" [8]

Diámetro		Área		
Diámetro Perno db, [pulg]	Raíz min. K [pulg]	Área bruta perno [pulg ²]	Área Raíz [pulg ²]	Hilos por pulgada
5/8	0.527	0.307	0.218	11
3/4	0.642	0.442	0.323	10

La resistencia nominal tanto a corte como tensión de estos pernos viene dada en la Tabla 2-2 (extraída de la tabla J3-2 de la AISC360) donde se observa una disminución del 20% de la resistencia a corte al estar el hilo incluido en el plano de corte.

Tabla 2-2 Esfuerzo nominal a tracción y corte de pernos A325 [9]

TABLE J3.2 Nominal Stress of Fasteners and Threaded Parts, ksi (Mpa)		
Description of Fasteners	Nominal Tensile Stress, F _{nt} ksi (Mpa)	Nominal Shear Stress in Bearing-Type connections, F _{nv} ksi (Mpa)
A325 or A325M bolts, when threads are not excluded from shear planes	90 (620)	48 (330)
A325 or A325M bolts, when threads are excluded from shear planes	90 (620)	60 (414)

2.3. MÉTODOS MECÁNICOS DE PERFORADO

2.3.1. TALADRADO

Estas perforaciones se realizan utilizando una broca de acero con geometría helicoidal que gira a gran velocidad (Ver Figura 2-2). Esta geometría permite penetrar y arrancar el metal sobrante en forma de viruta, logrando un agujero del mismo diámetro que la broca. La utilización de este método es la más aceptada debido a que la forma helicoidal de la broca permite sacar gradualmente el material residual sin afectar sus propiedades, logrando agujeros de gran exactitud y un buen acabado superficial.

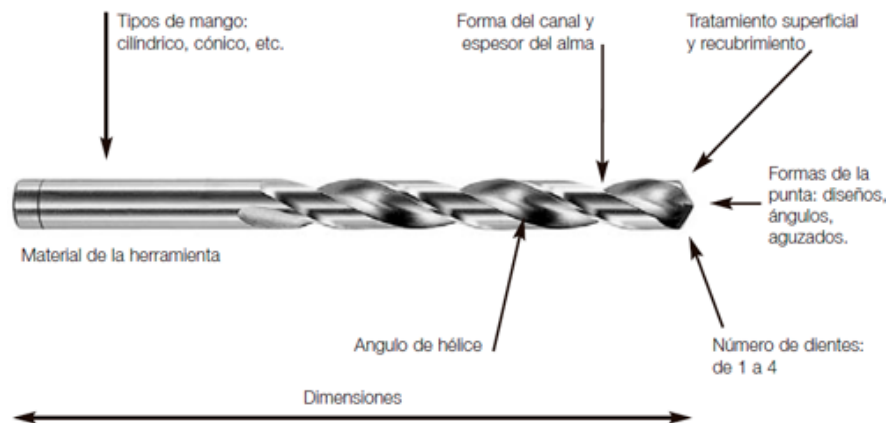


Figura 2-2 Esquema general de una broca de acero [10]

2.3.2. PUNZONADO

Los agujeros realizados con el método de punzonado se generan debido a la diferencia entre el diámetro de la matriz y el punzón utilizado. Cuando el punzón comienza a penetrar el material se generan grietas en los bordes de contacto debido a la gran concentración de esfuerzos, y a medida que avanzan esas grietas se produce la fractura que provoca la expulsión del material cortado como se observa en la Figura 2-3. Este método es más invasivo que el anterior ya que el perímetro del agujero se ve afectado por la concentración de tensiones. Dado lo anterior la norma NCh428 [1] permite su uso pero en planchas de espesores 3 [mm] menor al diámetro a punzonar.

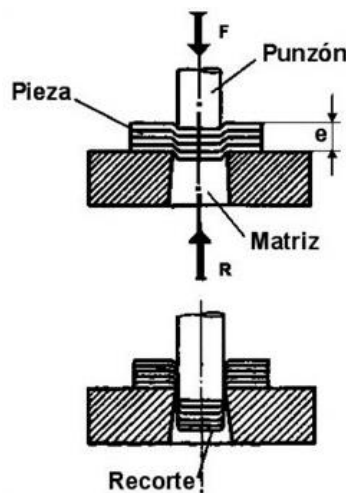


Figura 2-3 Esquema del corte por punzonado [11]

2.4. MÉTODOS TÉRMICOS DE PERFORADO

Existen diversas tecnologías para realizar agujeros en planchas metálicas y la decisión de cuál es la más apropiada dependerá de distintas variables como la geometría de la pieza, el espesor, tipo de material, la precisión y calidad requerida, entre otras. A continuación se muestran algunos de los métodos térmicos para realizar cortes en planchas metálicas describiendo sus principales características.

2.4.1. OXICORTE

La tecnología del oxicorte funciona a través del calor generado químicamente, que permite aumentar la temperatura de la pieza a trabajar hasta llegar a su punto de fusión, donde posteriormente el metal fundido es expulsado con adición de oxígeno [12].

Cuando el oxígeno se mezcla con el metal incandescente, lo oxida y se convierte en escoria, por tanto el operador debe ser extremadamente riguroso al manipular los gases en cada corte. Ahora bien, dependiendo del tipo de material y espesor se aplican diferentes tipos de técnicas que utilizan distintos tipos de gases.

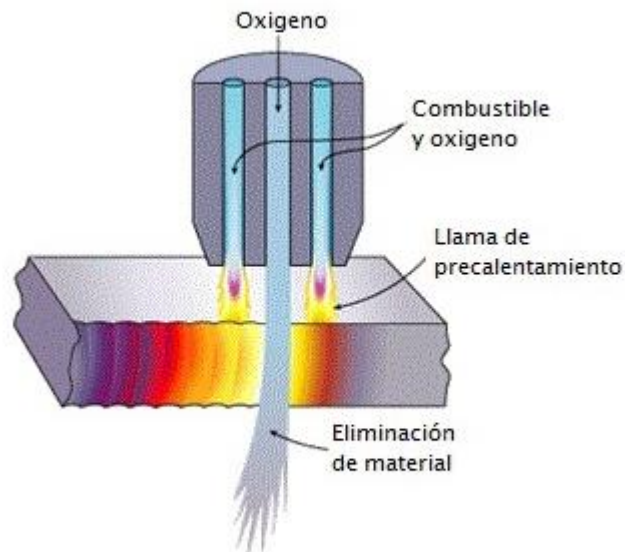


Figura 2-4 Esquema del proceso de oxicorte [13]

Los principales parámetros que permiten evaluar el desempeño de este método son [12]:

Calidad del corte

- Buena angulosidad.
- Amplia deformación de la zona afectada por el calor (HAZ) en placas delgadas.
- Niveles de escoria que requieren mucho trabajo posterior.

Trabajo previo

- Las máquinas de oxicorte tienen que precalentar la pieza de trabajo antes de cortarla.

- El área de corte debe estar libre de óxido, suciedad y/o pintura antes de efectuar el corte.
- El operador debe regular el flujo de gas para cada antorcha.

Velocidad de corte

- Es lenta en una amplia gama de espesores.
- El tiempo de precalentamiento aumenta significativamente los tiempos de perforación, disminuyendo la velocidad general del corte.
- Para compensar las menores velocidades de corte, frecuentemente las mesas de oxicorte disponen de varias antorchas en movimiento.

Flexibilidad

- El oxicorte está limitado a acero al carbono y no es eficaz en acero inoxidable o aluminio.

Acabado posterior

- Es posible que el operador deba esmerilar la zona afectada por el calor, que es más extensa que con otros sistemas; este proceso puede ser lento y difícil.

Mantenimiento

- Requisitos simples que frecuentemente pueden ser realizados por los grupos de mantenimiento de la empresa.

Costo inicial

- El oxicorte tiene el costo inicial más bajo de todos los procesos de corte térmico.

2.4.2. LÁSER

El método a través de láser, consiste en transmitir energía mediante la aceleración de fotones que se encuentran circulando dentro de una cámara con dos espejos en sus extremos, logrando generar radiaciones luminosas que rebotan y se amplifican. La perforación realizada con este tipo de técnica es de alta calidad, ya que el material se vaporiza y se expulsa a través de un chorro de gas de alta velocidad, generando anchos de corte muy estrechos, especialmente en materiales delgados [12].

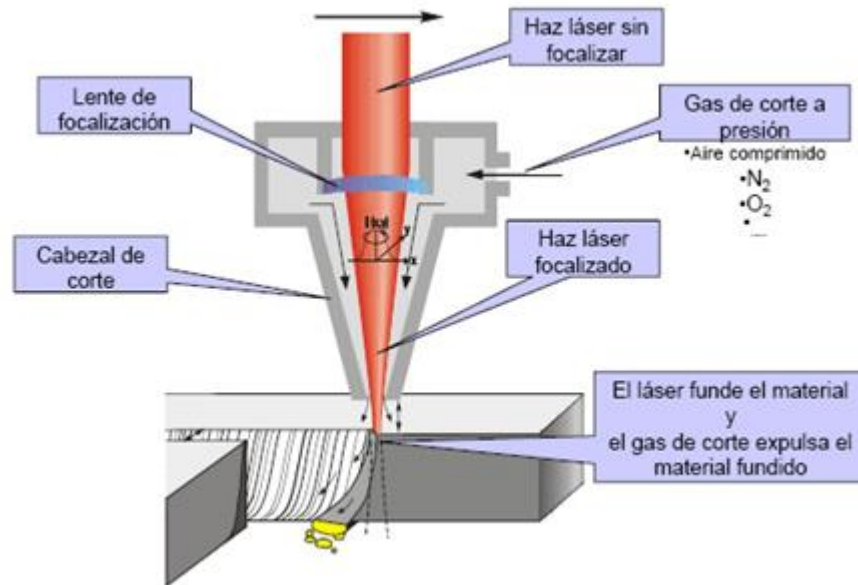


Figura 2-5 Esquema de corte por laser [14]

A continuación se observan las principales características de este tipo de corte [12]:

Calidad del corte

- De buena a excelente angulosidad.
- Pequeña zona afectada por el calor.
- Virtualmente sin escoria.

Trabajo previo

- Para que el láser funcione, el material tiene que estar limpio.

Velocidad de corte

- Muy rápido en material delgado y más lento en materiales más gruesos.
- Requiere más tiempo de perforación en material grueso.

Flexibilidad

- El láser es el mejor sistema para el corte de acero al carbono delgado.
- Con una sola pasada puede producir cortes finales en ambas direcciones. Esto reduce o elimina las partes que se desechan de las láminas metálicas después de cortar piezas en ellas.
- No existen sistemas láser manuales, por lo que la pieza de trabajo debe colocarse horizontalmente sobre una mesa.
- El corte de material reflectante (aluminio) requiere de trabajo previo para cubrir la superficie del material.
-

Acabado posterior

- De escaso a ninguno.

Mantenimiento

- Tareas complejas que requieren técnicos especializados.

Costo inicial

- El láser tiene el costo inicial más alto de todos los sistemas de corte térmico.
- Existen modelos de mesas de corte láser que cuestan diez veces más que una mesa de corte por plasma.

2.4.3. PLASMA

El método de corte mediante plasma consiste en utilizar una temperatura ideal para fundir y calentar el material mediante un chorro de gas ionizado, llamado plasma, que luego de la fusión, permite expulsar el material fundido por la parte inferior del mismo material [12].

Para lograr este proceso es necesario provocar un arco eléctrico estrecho a través de la boquilla del soplete en una sección muy pequeña, lo que concentra la energía del gas empleado, que adquiere la propiedad de cortar. La principal ventaja de este sistema radica en su reducido riesgo de deformaciones debido a la concentración calorífica en la zona de corte.

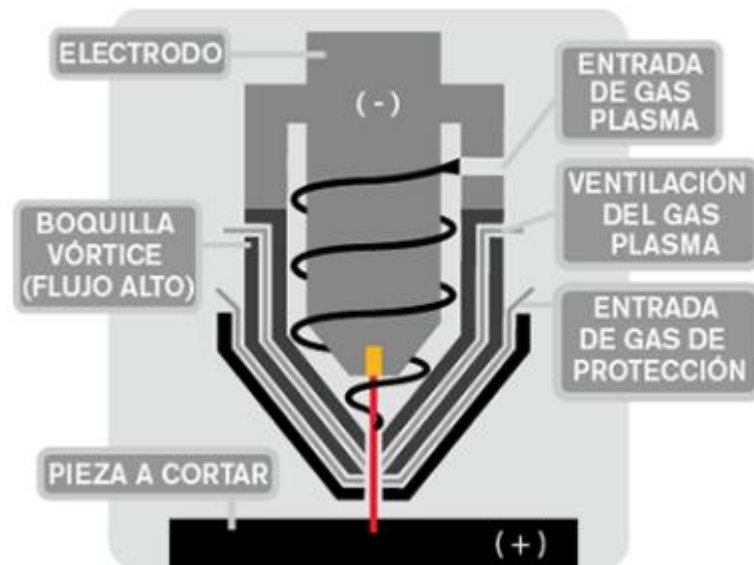


Figura 2-6 Esquema de corte por plasma de alta definición [15]

Las principales características de esta técnica se resumen a continuación [12]:

Calidad del corte

- Excelente angulosidad.
- Pequeña zona afectada por el calor.
- Virtualmente sin escoria.

Trabajo previo

- Poca o ninguna preparación.
- Tolera pintura, suciedad, óxido y/o aceite.

Velocidad de corte

- Rápida en una amplia gama de espesores.

Flexibilidad

- Corta una amplia variedad de espesores y tipos de material.

Acabado posterior

- Escaso o ningún esmerilado, típicamente mucho menos que el oxicorte.

Mantenimiento

- Requisitos moderados.
- Muchos componentes son reparables por el equipo de mantenimiento interno de una industria.

Costo inicial

- Típicamente entre el de oxicorte y un láser.

Por las características mencionadas de este último método es que se decidió utilizar el plasma como proceso de corte para realizar los agujeros para conexiones de este estudio y comparar su desempeño con las perforaciones realizadas con taladro y punzonado.

2.5. BASES DE DISEÑO

En cuanto al diseño de estructuras de acero incluida sus conexiones, la NCh433of96 [16] en su anexo B establece que mientras no se oficialice la norma de dimensionamiento y construcción de estructuras de acero se deben utilizar las disposiciones contempladas en la *Specification for Structural Steel Buildings* del *American Institute of Steel Construction* (AISC360-10) [9].

Ahora bien, cuando se partió escribiendo esta memoria la NCh427 “Especificaciones para el cálculo, fabricación y construcción de estructuras de acero” aún se encontraba en estudio por lo que no era válida su aplicación. A la fecha actual esta norma ya se encuentra oficializada y en ella se menciona de igual forma que se basa en el documento AISC 360-10. En consecuencia, el dimensionamiento de las conexiones estudiadas en este trabajo se realizó a partir de los diferentes modos de falla incluidos en la presente norma que se muestran en el siguiente apartado

Para la utilización de métodos térmicos en la fabricación de agujeros en conexiones apernadas, este trabajo se basó en la RCSC, 2014 [17] que permite su uso siempre que la superficie tenga un acabado con una rugosidad de no más 1000 [μin] (definida por la ASME B46.1 [18]). Por otro lado, el uso de perforaciones realizadas mediante taladro y punzonado son permitidas por la norma la NCh428 [1] por lo que se utilizarán las disposiciones de dicha norma para su fabricación.

2.6. MODOS DE FALLAS

Las probetas utilizadas en este estudio poseen una conexión de tipo corte simple utilizando un perno para su unión. Éstas se diseñaron a partir del código AISC360 del 2010 [9] de manera de inducir diferentes modos de falla. Las ecuaciones utilizadas son recopiladas de los capítulos de la norma antes mencionada.

2.6.1. FLUENCIA POR TRACCIÓN DEL ÁREA BRUTA

$$P_n = F_y * A_g \quad \text{Sección D2(a) AISC360-10}$$

Donde:

F_y : resistencia a la fluencia acero

A_g : área bruta del miembro

Corresponde a la fluencia del área posterior a la conexión. En este caso la falla se produce de manera dúctil.

2.6.2. ROTURA POR CORTE DEL PERNO

$$R_{nv} = F_{nv} * \frac{d_p^2 * \pi}{4}$$

Donde:

d_p : diámetro perno

F_{nv} : resistencia admisible corte del perno (tabla J3.2 AISC360-10)

La falla se produce con el cizalle del perno como se muestra en la Figura 2-7 y dependerá del diámetro y de la resistencia de éste. Este modo de falla es frágil y por lo tanto no deseable. Como es de tipo frágil es riesgoso verlo de forma experimental, por lo que deben tomarse medidas adecuadas de seguridad.

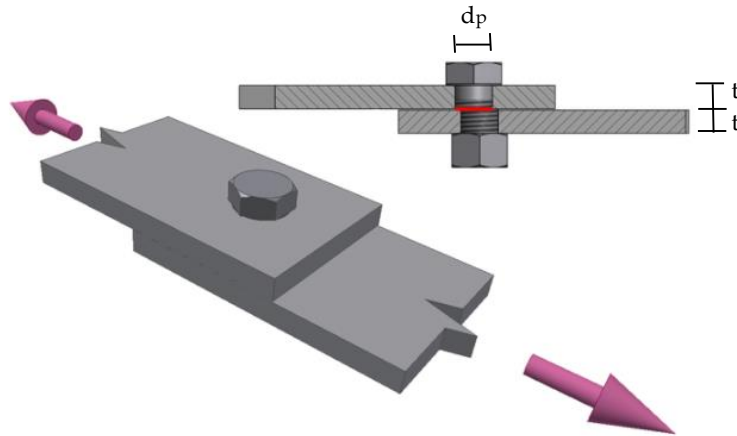


Figura 2-7 Falla a corte del perno [19]

2.6.3. FRACTURA A TRACCIÓN DEL ÁREA NETA

$$P_n = F_u * 2 * t * b_e \quad \text{Sección D5 AISC360-10}$$

Donde:

F_u : resistencia última acero placa

t : espesor placa

b_e : $2t + 16[mm]$ pero no mayor a la distancia desde el borde de la perforación a otro borde libre perpendicular a la fuerza aplicada (b)

Este tipo de falla es frágil pero en menor medida que la falla anterior. La capacidad queda determinada por el espesor y la distancia perpendicular a la fuerza medida desde la

perforación al borde. La fractura se produce transversal a la fuerza como se observa en la Figura 2-8.

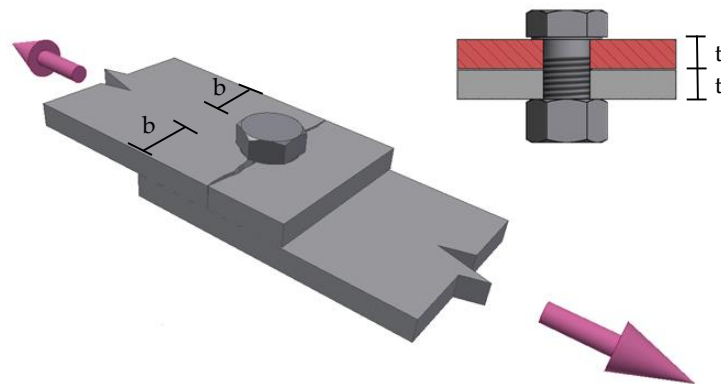


Figura 2-8 Falla por tracción del área neta [19]

2.6.4. APLASTAMIENTO

$$R_{n.aplas} = \min(1.2 * L_c * t * F_u; 2.4 * d_p * t * F_u) \quad \text{Sección J7 AISC360-10}$$

L_c : distancia en la dirección de la carga medida desde el borde de la perforación al borde libre

En este caso la falla se produce de forma dúctil, donde el perno comprime el borde de la placa provocando el aplastamiento y posterior destaje como se aprecia en la Figura 2-9.

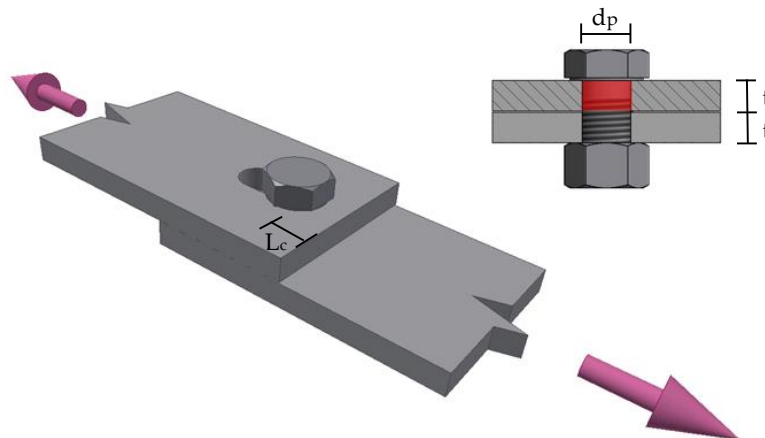


Figura 2-9 Falla por aplastamiento de la placa [19]

2.6.5. FRACTURA EN CORTE DEL ÁREA NETA

$$P_{nv} = 0.6 * F_u * A_{sf} \quad \text{Sección D5 AISC2010}$$

Donde:

$$A_{sf} : \quad 2t * \left(a + \frac{d_p}{2}\right)$$

a : distancia más corta desde el borde de la perforación del pasador hasta el borde del miembro medido paralelamente a la dirección de la fuerza, igual a L_c .

Para el caso de una probeta sometida a corte simple con un perno, la falla de fractura en corte ocurre siempre después que la falla por aplastamiento por lo que no se considerará dentro de los modos de falla analizados en esta memoria. La Figura 2-10 ilustra la forma de falla de esta conexión.

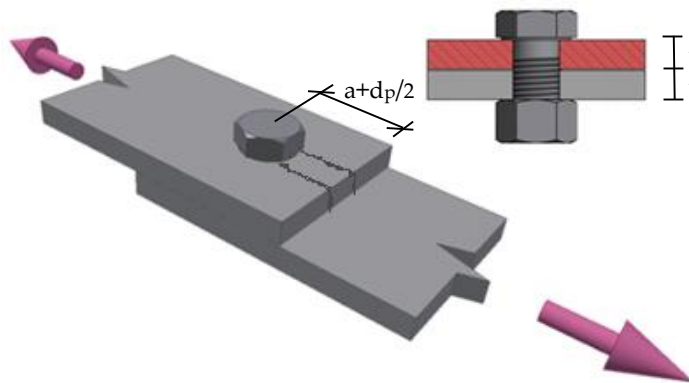


Figura 2-10 Falla por corte del área neta

Capítulo 3

DISEÑO PREVIO

En este capítulo se revisarán aspectos importantes referentes a la utilización del mecanismo creado para aumentar la fuerza que ejerce el aparato experimental sobre las probetas, ya que la fuerza aplicada solo por la máquina MTS no es suficiente para lograr la falla en todos los ensayos. Se explicará la función que cumple en este estudio y cuáles fueron las variables que se consideraron en su diseño.

Además, se caracterizarán los materiales utilizados y se describirán los métodos de fabricación que se utilizaron para construir las probetas.

En términos generales, es necesario aclarar que para poder determinar cuál es la influencia del método de perforación en placas de acero, ya sea térmica o mecánica, se llevaron a cabo siete tipos mediciones experimentales en las cuales se mantuvieron los materiales utilizados, pero se varió el método de perforación con que se realizaron los agujeros de cada una de las probetas.

3.1. MATERIALES UTILIZADOS

Con el fin de hacer este estudio lo más cercano a la realidad chilena, se decidió utilizar placas de acero con calidad ASTM A36 y pernos de calidad ASTM A325 ya que son materiales conocidos y utilizados frecuentemente en estructuras de acero en Chile.

Con el propósito que todas las probetas de un ensayo posean las mismas propiedades, se utilizaron placas que se cortaron de una misma plancha de acero de material ASTM A36. De esta forma, se previene que existan diferencias significativas en cada una de las probetas a ensayar logrando mayor precisión a la hora de comparar los resultados.

Del mismo modo, y con el fin de generar probetas comparables entre sí, los pernos son sacados de una sola partida ayudando de esta manera a disminuir la probabilidad que existan pernos que posean mayor resistencia. El acero utilizado en los pernos de todos los ensayos es de calidad ASTM A325.

3.2. DISEÑO DE PROBETAS

3.2.1. FABRICACIÓN DE PLACAS

Para la fabricación de las probetas se debe llevar un control de calidad de cada una de las placas de manera de verificar que sus dimensiones sean las señaladas. Si una placa no cumple con las dimensiones o con la correcta posición de la perforación, se deberá rechazar no solo esa placa sino que el conjunto de placas con que se realizaran un ensayo en específico, ya que todas las placas de ese ensayo en particular deben provenir de una misma plancha.

Hay diversas formas de realizar cortes y perforaciones en planchas de acero, pudiendo ser éstas mecánicas o térmicas. Actualmente existen diferentes máquinas que realizan tanto cortes mecánicos, térmicos y mixtos de manera automatizada. A continuación se presentan de manera general las diferentes máquinas que se utilizaron para la fabricación de probetas durante este estudio:

a) ProArc – Master 35

Esta máquina se utiliza para realizar cortes y perforaciones en planchas con plasma de alta definición. Posee una gran precisión lo que significa que puede cortar una amplia gama de espesores con conicidades reducidas. Además, al ser programable, es perfecta para realizar cortes con diferentes geometrías. Por otro lado, posee una auto-calibración de gases ayudando a mantener su precisión en el tiempo. Dada sus características esta máquina es ideal para realizar de manera rápida piezas irregulares pequeñas o grandes, agujeros para conexiones apertadas o una gran cantidad de piezas con muy poca pérdida de material, entre muchas otras opciones.



Figura 3-1: Máquina de corte térmico ProArc

La Figura 3-2 muestra el acabado superficial de un agujero realizado con la ProArc:



Figura 3-2 Acabado superficial de agujero realizado con plasma de alta definición

b) Hugong

Esta máquina también se utiliza para realizar cortes y perforaciones pero con plasma de definición estándar lo que significa que presenta un sistema de engranaje menos fino que la ProArc, disminuyendo su precisión a mayores espesores, por lo cual se recomienda no utilizar planchas de espesor superior a 10 [mm]. En su proceso existe mayor pérdida de material ya que el corte produce una conicidad cercana al 20% del espesor de la plancha por lo que es necesario dejar una separación entre las piezas que deben cortar. Al ser menos precisa la Hugong, el diseño de circunferencias u otras formas, son menos regulares por lo que su principal función es cortar normalmente planchas ciegas o planchas de conexiones no apernadas.



Figura 3-3: Máquina de corte térmico Hougong

La Figura 3-4 muestra el acabado superficial de un agujero realizado con esta máquina:



Figura 3-4 Acabado superficial de agujero realizado con plasma de definición estándar

c) GEKA – HYD 10

Se utiliza para realizar perforaciones mediante punzonado. Esta máquina al ser de posicionamiento manual presenta una mayor probabilidad de error en la posición de la perforación. La GEKA se utiliza normalmente para el punzonado y corte de ángulos.



Figura 3-5: Máquina de corte mecánico GEKA

La Figura 3-6 muestra el acabado superficial de una perforación realizada con punzonado donde se aprecia las vetas verticales:



Figura 3-6 Acabado superficial de perforación realizada con punzonado

d) Taladro Electromagnético

Tal como lo dice su nombre, este aparato realiza perforaciones con el método del taladrado, siendo el operador el encargado de cambiar la broca manualmente. Se utiliza normalmente para realizar correcciones de perforaciones en casos en que no hayan quedado en la posición correcta.



Figura 3-7: Taladro Electromagnético

La Figura 3-8 muestra el acabado superficial de una perforación realizada con taladro donde se aprecia las vetas horizontales:



Figura 3-8 Acabado superficial de perforación realizada con taladro

Conocidas las características generales de las máquinas y debido a las formas que presentan las probetas, se utilizó la máquina ProArc para realizar el corte perimetral en las placas, máquina que cumple con las tolerancias y geometrías recomendadas por la ISO 9013 [20]. Por otro lado, las perforaciones se hicieron con punzonado (GEKA), taladrado (Taladro magnético) y plasma de alta definición. Sin embargo, las placas cuyas perforaciones fueron realizadas con plasma de definición estándar (Hugong), también se realizó el corte perimetral con el mismo método, debido a que tanto el corte perimetral como la perforación se realizan en un único proceso que es continuo, y por tanto, realizar probetas con plasma de diferente definición no es una práctica real.

3.2.2. DISEÑO

Las probetas consisten en dos placas iguales de acero A36 conectadas por un perno de material A325 el cual está sometido a corte simple en todos los ensayos. Para este estudio se consideró que las probetas fallarán de cuatro diferentes maneras:

1. Fractura del área neta de la sección.
2. Aplastamiento en la conexión.
3. Corte del perno con hilo incluido en el plano de corte.
4. Corte del perno con hilo excluido del plano de corte.

Por otro lado, el agujero en donde se introduce el perno para conectar ambas placas fue realizado utilizando cuatro métodos de perforado distinto, con el propósito de determinar si existen diferencias en la resistencia de las probetas al aplicar cargas estáticas. Los métodos utilizados son los siguientes:

- Cortes mecánicos: -Punzonado
-Taladrado
- Cortes térmicos: -Plasma de definición estándar (HD)
-Plasma de alta definición (SD)

Además, se utilizaron dos diámetros de pernos distintos usados frecuentemente en Chile, para de esta manera aumentar la cantidad de escenarios realizados en este estudio. Los diámetros de los pernos escogidos son de 5/8[pulg] y 3/4[pulg] donde su largo varía según cada ensayo.

Se realizó un total de siete tipos de ensayos, cuatro utilizando un perno de 5/8[pulg] y tres con un perno de 3/4[pulg]. Las placas utilizadas en los ensayos III y IV poseen las mismas dimensiones, independiente si el hilo está incluido o excluido con el fin de estudiar su comportamiento en ambos casos.

A continuación se muestra la matriz de ensayos utilizando pernos de 5/8" y 3/4" (Tabla 3-1: Matriz de ensayo) donde se especifica la cantidad total de ensayos que se realizaron en este estudio:

Tabla 3-1: Matriz de ensayo

Tipo de Perforación	Perno 5/8"		Tipo de Falla
	Espesor Placa [mm]	Espesor Placa [mm]	
Plasma definición estándar	10	12	Corte del Perno
	6	6	Ruptura área neta
	6	6	aplastamiento
Plasma alta definición	10	12	Corte del Perno
	6	6	Ruptura área neta
	6	6	aplastamiento
Punzonamiento	10	12	Corte del Perno
	6	6	Ruptura área neta
	6	6	aplastamiento
Taladrado	10	12	Corte del Perno
	6	6	Ruptura área neta
	6	6	aplastamiento

En cuanto al diseño de cada placa, la geometría y espesor varía dependiendo de la falla que se desea inducir. Esto quiere decir que la resistencia sin factor de seguridad de la falla deseada, debe ser la menor de todos los modos de fallas posibles. Las probetas siempre estarán a tracción por lo cual las verificaciones a realizar son las siguientes:

- 1) Fractura en tracción del área neta efectiva
- 2) Fractura en corte en el área efectiva
- 3) Fluencia en tracción de la sección bruta
- 4) Aplastamiento
- 5) Rotura en corte del Perno

Además, las probetas al poseer una conexión de tipo aplastamiento se debe utilizar el tipo de perforación con diámetro estándar como se muestra en la Tabla 3-2 donde se especifica que al diámetro del perno se le debe sumar 1/16".

Tabla 3-2 Dimensión nominal de agujeros según diámetro del perno [9]

TABLE J3.3 Nominal Hole Dimensions, in.				
Bolt Diameter, in.	Hole Dimensions			
	Standard (Dia.)	Oversize (Dia.)	Short-Slot (Width × Length)	Long-Slot (Width × Length)
$\frac{1}{2}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{9}{16} \times \frac{11}{16}$	$\frac{9}{16} \times 1\frac{1}{4}$
$\frac{5}{8}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{11}{16} \times \frac{7}{8}$	$\frac{11}{16} \times 1\frac{9}{16}$
$\frac{3}{4}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{15}{16}$	$\frac{13}{16} \times 1$	$\frac{13}{16} \times 1\frac{7}{8}$
$\frac{7}{8}$	$\frac{15}{16}$	$1\frac{1}{16}$	$\frac{15}{16} \times 1\frac{1}{8}$	$\frac{15}{16} \times 2\frac{3}{16}$
1	$1\frac{1}{16}$	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{16} \times 1\frac{5}{16}$	$1\frac{1}{16} \times 2\frac{1}{2}$
$\geq 1\frac{1}{8}$	$d + \frac{1}{16}$	$d + \frac{5}{16}$	$(d + \frac{1}{16}) \times (d + \frac{3}{8})$	$(d + \frac{1}{16}) \times (2.5 \times d)$

Si bien, para este estudio se utilizaron pernos de diámetro 5/8" y 3/4", con lo que el diámetro de la perforación debe ser de 11/16" y 13/16" o 17,46 [mm] y 20,64 [mm] respectivamente, se utilizaron realmente diámetros de 18[mm] y 21 [mm] tanto para probetas taladradas como punzonadas debido a que estos son los diámetros comerciales de taladros y punzones, mientras que las cortadas térmicamente se utilizó diámetros de $19 \pm 0,4$ [mm] y $22 \pm 0,6$ [mm], variación asociada a la conicidad propia del corte. De esta forma, las perforaciones realizadas mecánica y térmicamente quedaran aproximadamente con el mismo diámetro para cumplir con el fin comparativo de este estudio.

Por otro lado, la AISC360-10 limita la distancia mínima desde el centro de la perforación hasta el borde más próximo, como se puede observar en la Tabla 3-3 adjunta.

Tabla 3-3 Distancia mínima al borde desde el centro del agujero [9]

TABLE J3.4 Minimum Edge Distance^[a] from Center of Standard Hole^[b] to Edge of Connected Part, in.	
Bolt Diameter, in.	Minimum Edge Distance
1/2	3/4
5/8	7/8
3/4	1
7/8	1 1/8
1	1 1/4
1 1/8	1 1/2
1 1/4	1 5/8
Over 1 1/4	1 1/4 × <i>d</i>
^[a] If necessary, lesser edge distances are permitted provided the appropriate provisions from Sections J3.10 and J4 are satisfied, but edge distances less than one bolt diameter are not permitted without approval from the engineer of record. ^[b] For oversized or slotted holes, see Table J3.5.	

El dimensionamiento de todas las placas se realizó para que cumplan con estas limitaciones.

Otro de los factores a considerar es el largo de los pernos en cada ensayo, debido a que la resistencia de estos dependerá si el hilo está o no incluido en el plano de corte. Solo los ensayos III y VII poseen el hilo incluido en el plano de corte, que son los ensayos en que se induce la falla del perno. En el resto de los ensayos el hilo no está incluido. La Tabla 3-4 muestra los ensayos y el largo que se ocupó en cada uno:

Tabla 3-4 Código de placa, diámetro y largo del perno utilizado en los ensayos

Tipo de Falla	Ensayo	Código Placa	Diámetro del perno [pulg]	Largo del perno [pulg]
Ruptura área neta	I	T6	5/8	1 3/4
	V	T9	3/4	1 3/4
Aplastamiento	II	T5	5/8	1 3/4
	VI	T8	3/4	1 3/4
Corte del Perno HI	III	T4	5/8	1 1/2
	VII	T7	3/4	1 3/4
Corte del Perno HE	IV	T4	5/8	2

Los cálculos de cada ensayo se encuentran en el Anexo B donde se utilizó como base de diseño las fórmulas de las secciones de la AISC360-10 mencionadas anteriormente.

La geometría de cada una de las placas utilizadas en cada ensayo se muestran a continuación:

Ensayo I: “Ruptura del área neta con perno de 5/8 [pulg]”

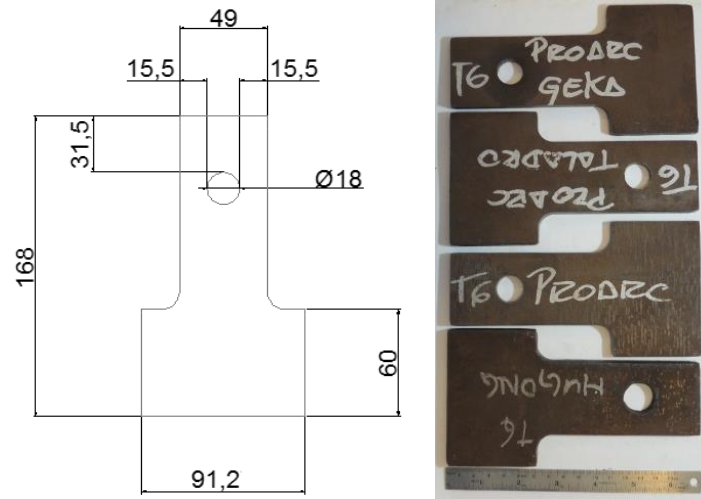


Figura 3-9 Geometría de las placas utilizadas en el Ensayo I

Ensayo II: “Aplastamiento con perno de 5/8 [pulg]”

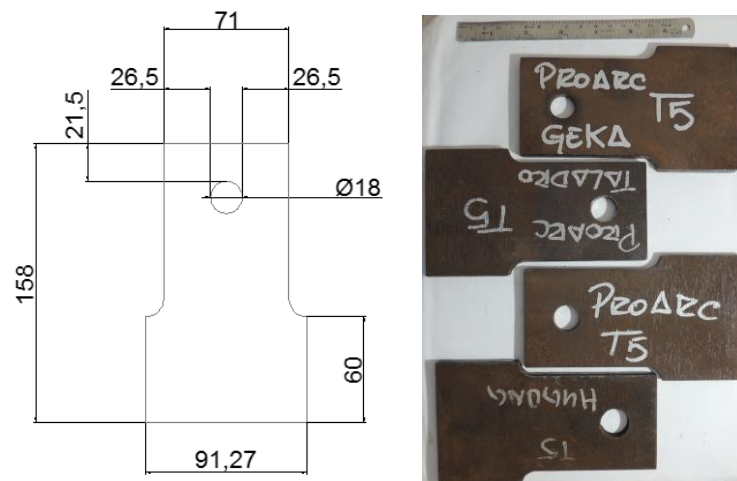


Figura 3-10 Geometría de las placas utilizadas en el Ensayo II

Ensayo III y IV: “Corte del perno hilo incluido y excluido con perno de 5/8 [pulg]”

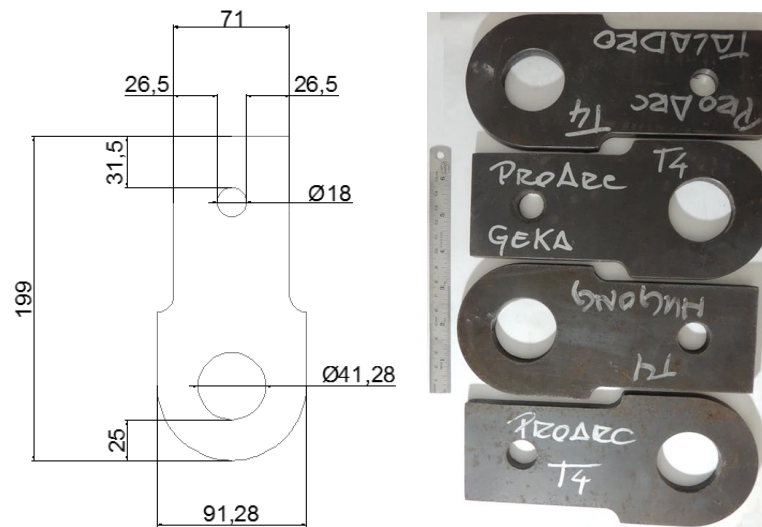


Figura 3-11 Geometría de las placas utilizadas en los Ensayo III y IV

Ensayo V: “Ruptura del área neta con perno de 3/4 [pulg]”

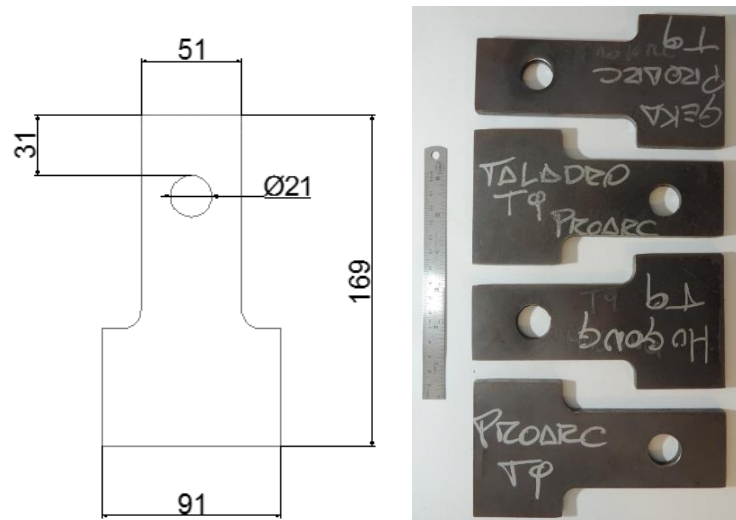


Figura 3-12 Geometría de las placas utilizadas en el Ensayo V

Ensayo VI: “Aplastamiento con perno de 3/4 [pulg]”

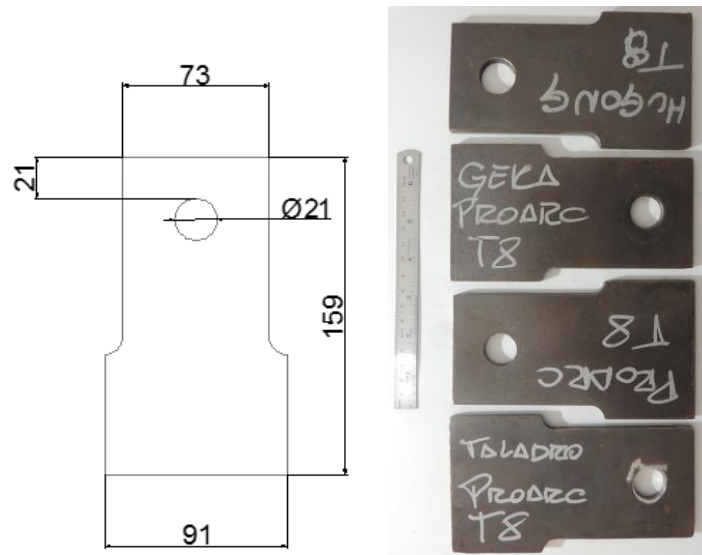


Figura 3-13 Geometría de las placas utilizadas en el Ensayo VI

Ensayo VII: “Corte del perno hilo incluido con perno de 3/4 [pulg]”

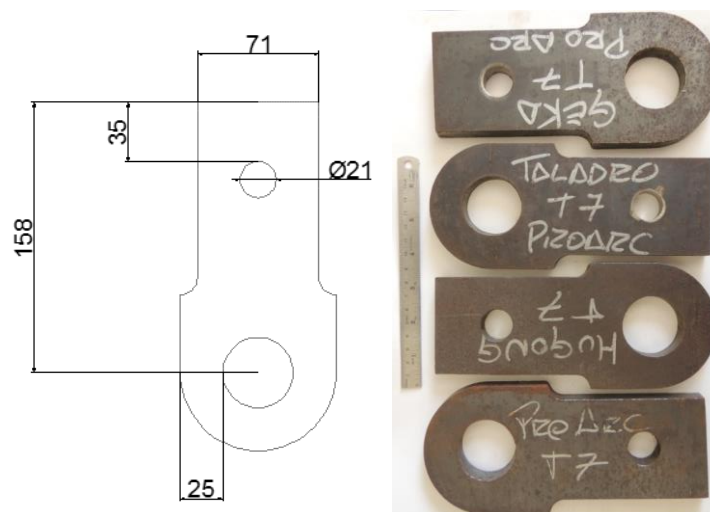


Figura 3-14 Geometría de las placas utilizadas en el Ensayo VII

Por otro lado, la Tabla 3-5 muestra un resumen de las resistencias nominales de los modos de fallas para los siete ensayos, destacando la más desfavorable en cada uno. Si bien estos datos fueron calculados a partir de las secciones antes mencionadas de la AISC-360-10, no significa que sean las resistencias reales que se darán en el laboratorio, pero sí una aproximación, ya que se espera que ocurra primero la falla más desfavorable de cada caso.

Tabla 3-5 Resumen de las resistencias nominales de los modos de falla para los 7 ensayos

			Resistencia Nominal [Tonf]			
Ensayos		Diámetro del perno [pulgadas]	Ruptura tracción área neta	Ruptura corte del área efectiva	Aplastamiento	Rotura del Perno
Modo de Falla	Ruptura tracción área neta	5/8	7,59	11,14	8.81	8,35
		3/4	7,34	11,14	8,81	12,02
	Aplastamiento	5/8	12,23	8,21	6,31	8,35
		3/4	12,23	9,11	6,17	12,02
	Corte del Perno Hilo Incluido	5/8	20,39	16,12	12,23	6,68
		3/4	24,47	24,09	20,55	9,62
	Corte del Perno Hilo Excluido	5/8	20,39	16,12	12,23	8,35

Estas resistencias fueron calculadas sin utilizar el factor de seguridad, esperando de esta forma acercarnos más al valor real que se dará en laboratorio.

3.3. MECANISMO DE AMPLIFICACIÓN DE FUERZA

3.3.1. DESCRIPCIÓN

El mecanismo de amplificación de fuerza se compone por dos vigas idénticas que poseen tres conexiones rotuladas. La primera conexión es la encargada de transmitir la fuerza de la máquina MTS hacia el mecanismo, mientras que la segunda permite conectar el mecanismo a la probeta y finalmente la tercera tiene el propósito de ajustar el soporte que une ambas vigas. La Figura 3-15 proyecta una vista lateral y frontal del mecanismo donde se especifica la posición de la probeta y el lugar de ajuste de las mordazas de la máquina MTS.

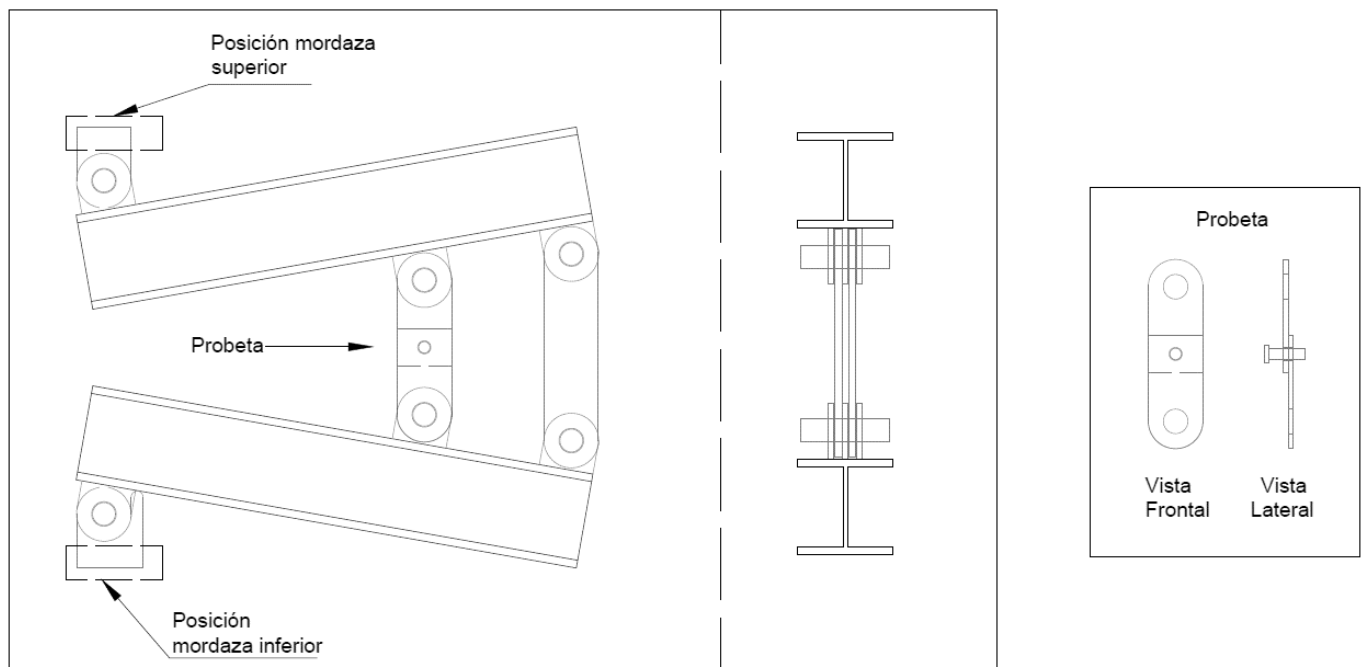


Figura 3-15 Vista lateral y frontal del mecanismo y probeta ensamblados

La Figura 3-16 muestra una vista isométrica del mecanismo y la probeta, que se encuentran conectados mediante pasadores que producen un efecto de rótula en todas las conexiones.

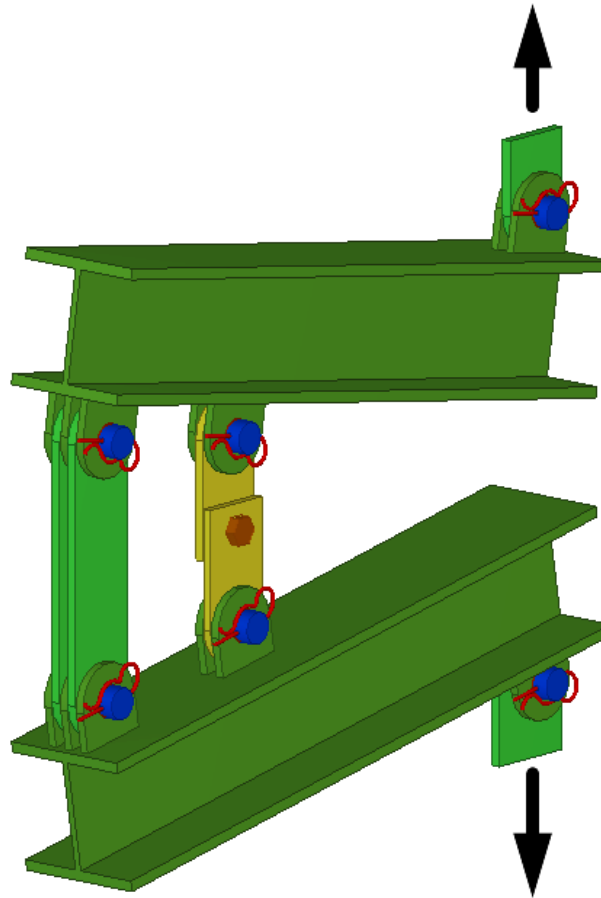


Figura 3-16 Vista isométrica del mecanismo de amplificación de fuerza ensamblado

En color amarillo se encuentra la probeta compuesta por dos placas unidas por un perno color naranja. En color verde se puede observar las vigas y placas que conforman el mecanismo que se unen mediante pasadores de color azul, fijadas con chavetas de color rojo. Las flechas indican el sentido de la fuerza aplicada sobre el mecanismo.

Para entender el funcionamiento del conjunto se presenta a continuación el diagrama de cuerpo libre de una sola viga del mecanismo:

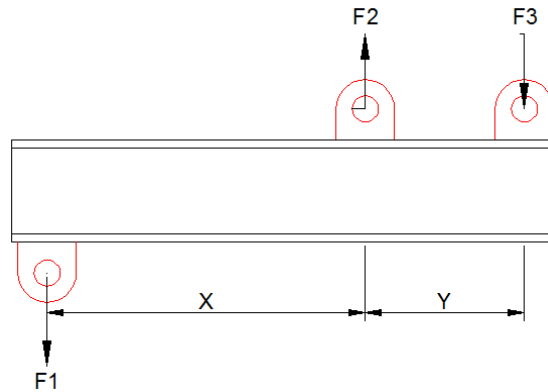


Figura 3-17 Diagrama de cuerpo libre de una viga del mecanismo

Dónde:

- F1: fuerza aplicada y transmitida por la máquina MTS en la conexión n°1.
- F2: fuerza reactiva transmitida a la probeta en la conexión n°2.
- F3: fuerza reactiva en el soporte entre vigas en la conexión n°3.
- X e Y: distancia entre los puntos de aplicación de las fuerzas.

Realizando sumatoria de momento en el eje de la conexión 3 se tiene lo siguiente:

$$F1 * (X + Y) - F2 * Y = 0$$

$$F2 = \frac{F1 * (X + Y)}{Y}$$

Esto quiere decir que la fuerza que se transmite a la probeta es la fuerza aplicada por la máquina MTS amplificada $\frac{(X+Y)}{Y}$ veces.

Para el diseño del mecanismo se requiere en primer lugar saber cuál es la fuerza máxima real necesaria (sin factor de reducción) que se requiere para inducir la falla de la probeta que más resiste, siendo en este caso, la falla en cizalle del perno de 3/4" de calidad ASTM A325 con hilo incluido en el plano de corte.

Si bien la resistencia nominal de un perno se puede determinar a partir de la tabla J3.2 de la AISC360-10, este valor no es el esfuerzo real que se busca, ya que la resistencia nominal tiene incluido cierto grado de confiabilidad que permite asegurar que la mínima resistencia sea la señalada.

Pues bien, el trabajo realizado por James J. Wallaert y John W. Fisher " Shear strength of high-strength bolts" [21] determina empíricamente el esfuerzo a corte de pernos de alta

resistencia. El siguiente gráfico muestra la curva de esfuerzo de corte vs deformación para pernos A325 realizada en este estudio.

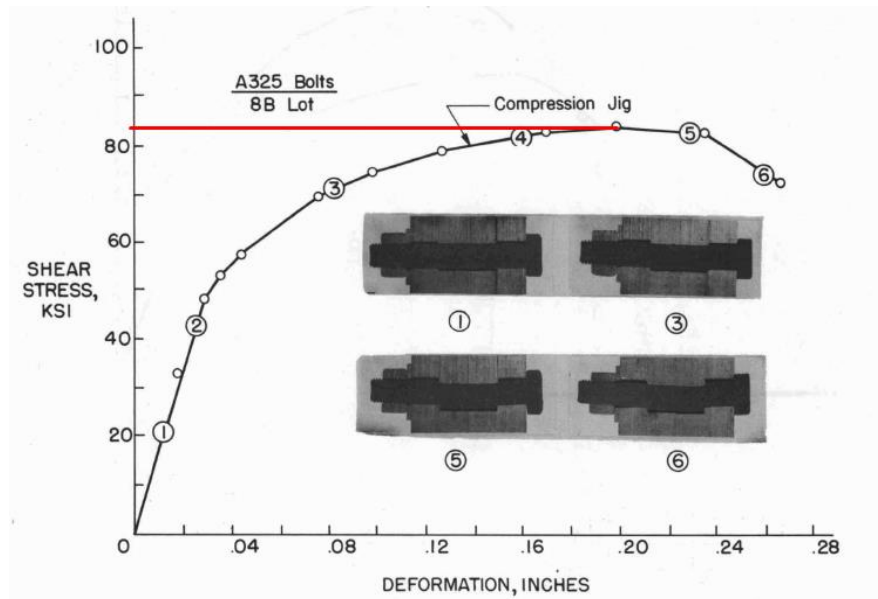


Figura 3-18 Curva de esfuerzo de corte vs deformación experimental de pernos A325 [21]

Se desprende del gráfico que el valor máximo de esfuerzo a corte es aproximadamente 85 [ksi], por lo que se utiliza este valor como resistencia real. Posteriormente se verificará para confirmar su validez. Teniendo la fuerza máxima real requerida es posible dimensionar el mecanismo.

Luego, la fuerza que debe resistir el mecanismo es la siguiente:

$$R_t = \left(\frac{D}{2}\right)^2 * \pi * F_{uv} = \left(\frac{3/4 [in]}{2}\right)^2 * \pi * 85 [ksi] * 0.8 = 13,627 [Tonf]$$

Un correcto diseño permite aumentar la fuerza con la que se ensaya la probeta sin que el mecanismo sufra acumulación de esfuerzos o deformaciones permanentes. Para esto se debe procurar que las vigas trabajen solamente dentro del rango lineal elástico. Esto permite que las deformaciones se mantengan lineales respecto a la aplicación de una fuerza y que las vigas se vean inalteradas por los ciclos de ensayo lo que ayuda a que los resultados sean comparables entre sí.

3.3.2. DISEÑO ESTRUCTURAL

Para hacer un dimensionamiento sencillo del mecanismo de amplificación de fuerza asumimos hipótesis simples de forma que este cumpliera con las características necesarias para realizar los ensayos sin alterar los resultados. Como dato inicial, se consideró que la máquina MTS posee una capacidad máxima a tracción de 10 [tonf]. Teniendo en cuenta que la fuerza con la que debe trabajar el mecanismo es de aproximadamente 14 [tonf] (debido a la falla del perno de 3/4" con hilo incluido), y considerando una amplificación de la fuerza con razón 1:3 entre la fuerza de la máquina MTS y la del mecanismo, éste se diseñó para poder aplicarle una fuerza de 5 [tonf] lo que significa que la probeta podrá alcanzar una fuerza máxima de 15 [tonf], 1 [tonf] superior a lo exigido.

Por otra parte, para que el mecanismo funcione de forma apropiada sin que se deteriore con el paso de los ensayos, es necesario diseñar las vigas de manera que no permitan deformaciones permanentes. En la práctica, para no tener problemas con la fatiga de material y tampoco con el límite de proporcionalidad, se consideró conservadoramente que los esfuerzos aplicados no deben superar el 50% del esfuerzo de fluencia del material. En este caso, al utilizar un material A36 ($F_y=2531 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$) el máximo esfuerzo con que debe trabajar el perfil de la viga escogido es de $1265 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$ para que no supere el rango lineal elástico.

Adicionalmente, existen dos limitaciones adicionales a este esfuerzo en cuanto a diseño, que son el peso del mecanismo completo y la capacidad de deformación o apertura máxima que posee la máquina MTS, indicada en la Figura 3-19.

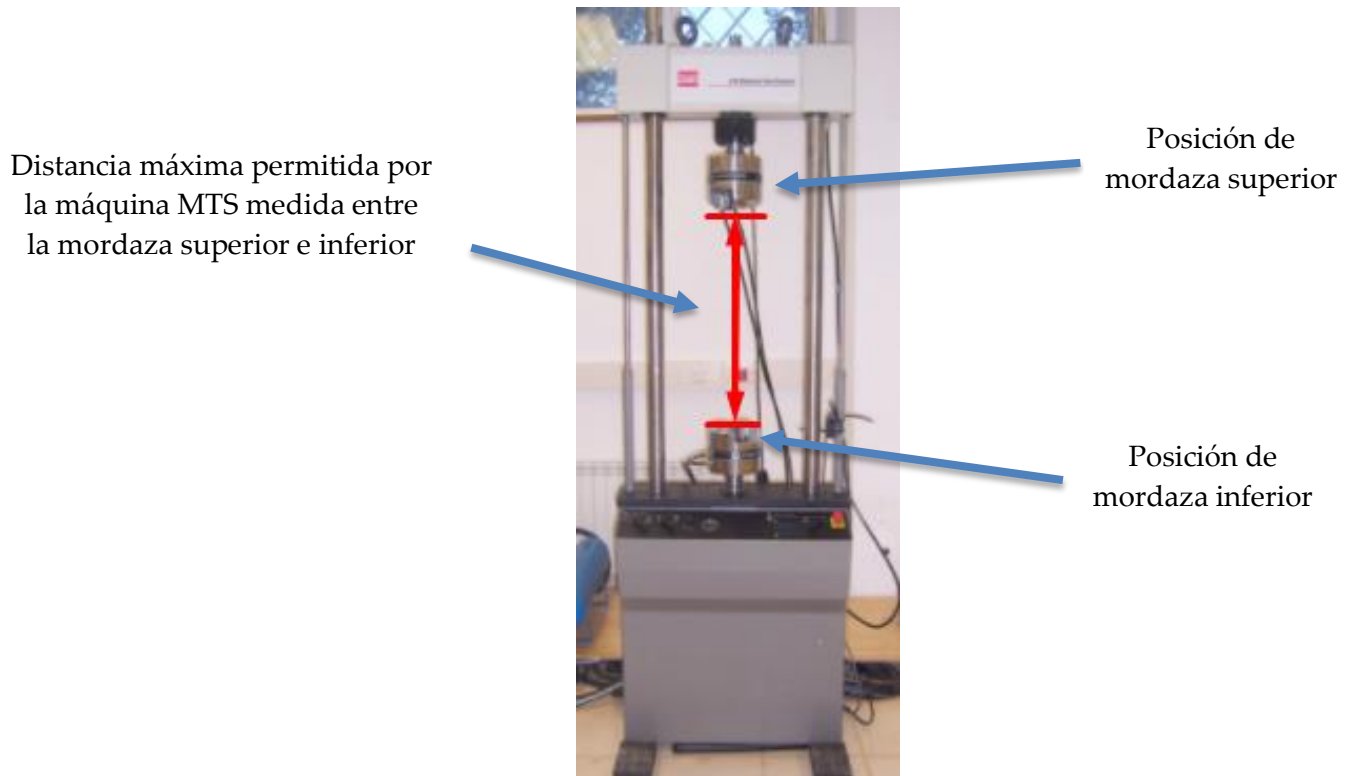


Figura 3-19: Apertura máxima entre mordazas de la máquina MTS 810

Si bien se tiene que la razón entre las fuerzas es de 1:3, se debe tener cuidado con las dimensiones de la viga ya que dependiendo del perfil escogido y el largo de la viga, el peso del mecanismo aumenta considerablemente dificultando el montaje. Por otro lado, si la viga es muy corta, el ángulo con que trabaja el mecanismo aumentaría drásticamente modificando la razón 1:3 y por tanto perjudicando los resultados finales del ensayo. Debido a lo anterior, se consideró que un largo apropiado entre ejes es de 75 [cm] quedando el eje de la conexión 2 a una distancia de 50 [cm] del eje 1 y a 25 [cm] del eje de la conexión 3, cumpliendo con la razón 25:75 = 1:3.

Con estos datos y utilizando la fórmula de Navier para determinar el máximo esfuerzo al que estará sometido el perfil, se comienza a iterar con distintos perfiles hasta llegar al más adecuado.

$$\sigma = \frac{y_{\text{máx}} * M_z}{I_z}$$

Donde el momento máximo de la viga se calcula como un simple voladizo:

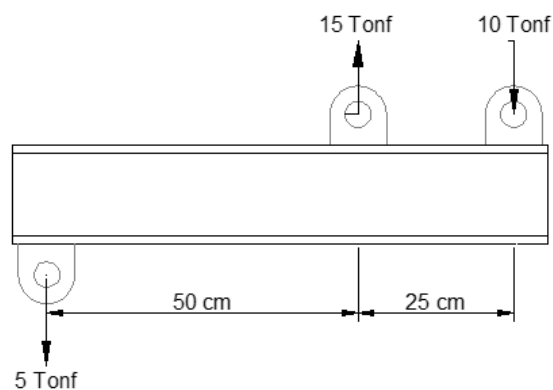


Figura 3-20 Fuerzas que interactúan en una viga del mecanismo

$$M_z = F1 * X = 5[\text{tonf}] * 50[\text{cm}] = 2,5[\text{tonf} * \text{m}]$$

Luego, se utilizó un perfil HEB 160 [22] con las siguientes propiedades:

Tabla 3-6 Propiedades de perfil HEB 160

HEB	h Alma mm	b Ala mm	a Espesor Alma mm	e Espesor Ala mm	r1 Espesor ángulo mm	Masa kg/m
160	160	160	8	13	15	42,6
A sección cm^2	Momento de Inercia $I_x \text{ cm}^4$	Módulo Resistente $W_x \text{ cm}^3$	Radio de giro $i_x \text{ cm}$	Momento de Inercia $I_y \text{ cm}^4$	Módulo Resistente $W_y \text{ cm}^3$	Radio de giro $i_y \text{ cm}$
54,3	2473	311	6,78	889	111	4,05

A partir de estos datos, se determina el esfuerzo producto de la flexión al que estará solicitado este perfil:

$$\sigma_{\text{máx, flexión}} = \frac{16[\text{cm}]/2 * 2,5[\text{tonf} * \text{m}]}{2473[\text{cm}^4]} = 808 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] \leq 1265 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right]$$

Por otro lado, el esfuerzo producto del corte al que estará solicitado el perfil:

$$\sigma_{\text{máx, corte}} = \frac{15[\text{tonf}]}{160[\text{mm}] * 8[\text{mm}]} = 1171 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] \leq 1265 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right]$$

Se observa que el perfil cumple con el diseño pues no supera el límite de esfuerzo impuesto. Por otro lado, el peso aproximado de la viga será de $42,6 \text{ [kg/m]} * 75 \text{ [cm]} = 31,95 \text{ [kg]}$, siendo adecuado para el montaje del mecanismo en el aparato experimental.

Una vez dimensionada la viga se debe diseñar las conexiones de manera que el conjunto trabaje realmente como un mecanismo. Para ello se utilizó pasadores en cada una de las conexiones cumpliendo la función de una rótula en el plano de trabajo. El diseño de cada una de estas conexiones dependerá de las solicitaciones mostradas en la Figura 3-20. Adicionalmente, al igual que en el diseño de la viga, no se utiliza factor de reducción.

Conexión n°1

Esta conexión tiene la función de transmitir la fuerza desde la máquina MTS al mecanismo, por lo que su principal elemento es una placa lisa y rectangular por un lado, y redondeado con un agujero por la otro (placa TP1). El lado rectangular y liso sirve para ser sujetado por la mordaza mientras que el lado redondeado y perforado es donde se ajusta el pasador para ser conectado a las dos placas TP2 que se encuentran soldadas a la viga.

El diseño y las dimensiones de las placas de esta conexión se muestran a continuación:

- Datos:

$d_p = \frac{3}{2} \text{ [pulg]}$	diámetro del pasador
$F_y = 36 \text{ [ksi]}$	resistencia a la fluencia acero A36
$F_u = 58 \text{ [ksi]}$	resistencia última acero A36
$F_{nv} = 60 \text{ [ksi]}$	resistencia admisible corte del pasador A325
$\Omega = 2$	factor de reducción
$t_1 = 12 \text{ [mm]}$	espesor placa TP1
$t_2 = 10 \text{ [mm]}$	espesor placa TP2
$b = 25 \text{ [mm]}$	distancia desde el borde de la perforación a otro borde libre perpendicular a la dirección
$b_e = \min(2t + 16[\text{mm}]; b)$	
$A_g = t * (2b + d_p + \frac{1}{16} \text{ "})$	área bruta del miembro

$$a = L_c = 25[mm]$$

distancia más corta desde el borde de la perforación del pasador hasta el borde del miembro medido paralelamente a la dirección de la fuerza

$$A_{sf} = 2t * \left(a + \frac{d_p}{2}\right) [mm^2]$$

A continuación, la Figura 3-21 muestra con detalle las dimensiones señaladas:

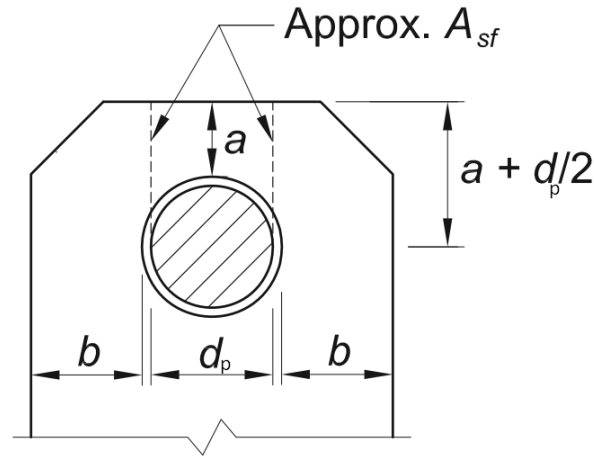


Figura 3-21 Cotas de placas de conexión

- Corte admisible del pasador (tabla J3.2 AISC360-10)

$$R_{nv} = F_{nv} * d_p^2 * \pi / 4 = 48,094 [tonf]$$

$$R_{nv} / \Omega = 24,047 [tonf]$$

Diseño TP1

- Resistencia a tracción (Sección D5 AISC360-10)

1) Rotura en tracción del área neta efectiva

$$P_n = F_u * 2 * t * b_e = 24,467 [tonf]$$

2) Rotura en corte en el área efectiva

$$P_{nv} = 0.6 * F_u * A_{sf} = 25,866 [tonf]$$

- Fluencia en tracción de la sección bruta (Sección D2(a) AISC360-10)

$$P_n = F_y * A_g = 19,647[tonf]$$

- Aplastamiento (Sección J7 AISC360-10)

$$R_{n.aplas} = \min(1.2 * L_c * t * F_u; 2.4 * d_p * t * F_u) = 14,680[tonf]$$

Diseño TP2

- Resistencia a tracción (Sección D5 AISC360-10)

1) Fractura en tracción del área neta efectiva

$$P_n = F_u * 2 * t * b_e = 20,389[tonf]$$

2) Fractura en corte en el área efectiva

$$P_{nv} = 0.6 * F_u * A_{sf} = 21,555[tonf]$$

- Fluencia en tracción de la sección bruta (Sección D2(a) AISC360-10)

$$P_n = F_y * A_g = 16,373[tonf]$$

- Aplastamiento (Sección J7 AISC360-10)

$$R_{n.aplas} = \min(1.2 * L_c * t * F_u; 2.4 * d_p * t * F_u) = 12,233[tonf]$$

Se observa que en todos los modos de falla la resistencia de la placa TP1 supera la sollicitación $F1$. Por otro lado, la resistencia del pasador fue diseñada con bastante holgura con el fin de que no sufra deformaciones permanentes para que no exista problema alguno en el montaje y desmontaje del mecanismo.

Conexión n°2

La segunda conexión permite transmitir la fuerza desde las vigas a la probeta estando compuesta por dos placas TP2 soldadas a la viga que se unen a la probeta mediante un pasador. La resistencia de dos placas TP2 superan la sollicitación de 15 [tonf]. Además, el pasador utilizado será el mismo de la conexión n°1, resistiendo con holgura las 7.5 [tonf] de sollicitación.

Conexión n°3

Para esta última conexión se debe tener en cuenta que la fuerza solo actúa en compresión y que la forma de unir ambas vigas es considerando dos placas alargadas

llamadas TP3, por lo tanto, para que la conexión sea simétrica se necesitarán tres placas TP2 soldadas a cada viga. La sollicitación en este caso es de $10/3$ [tonf] por lo que las placas TP2 cumplen con el diseño descrito en la conexión n°1.

Para que el mecanismo cumpla con la deformación limitada por la apertura máxima de 850 [mm] entre la separación de las mordazas de la máquina MTS (ver Figura 3-19), el largo de las placas TP3 debe ser superior a 400 [mm]. De esta forma, existen 200 [mm] de holgura para que el mecanismo pueda deformarse. La Figura 3-22 muestra las dimensiones del mecanismo en conjunto.

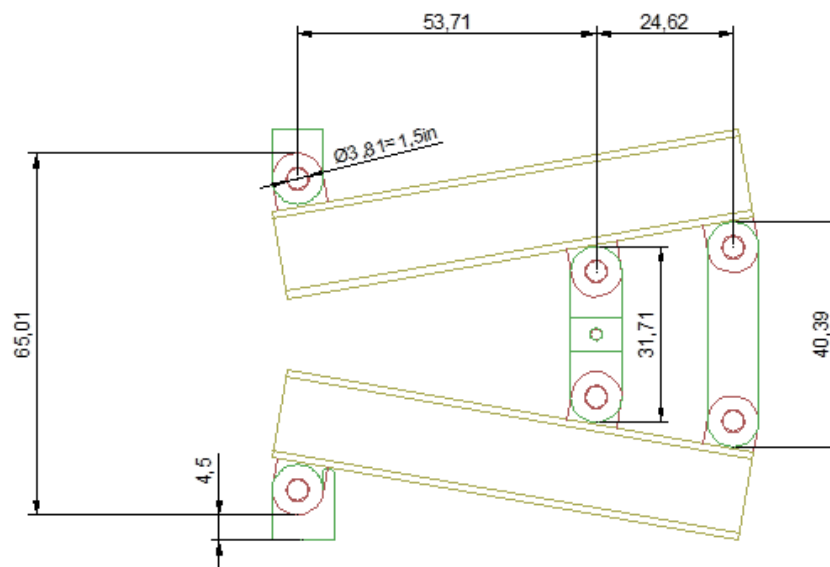


Figura 3-22 Medidas en [mm] del mecanismo y probetas ensamblados

Para realizar el diseño a compresión de las placas TP3, se utilizó el largo entre perforaciones y el mismo ancho de las placas TP2. Los cálculos se realizaron utilizando el radio de giro del eje menor por ser el caso más desfavorable.

Diseño TP3

- Datos:

$K = 1$	factor de longitud efectiva
$L = 0,31$ [m]	largo del elemento
$e = 12$ [mm]	espesor del elemento

$$F_y = 36 \text{ [ksi]}$$

resistencia a la fluencia acero A36

- Resistencia a compresión (Sección J4.4 y E3 AISC360-10)

$$r = e / \sqrt{12} = 0.346 \text{ [cm]}$$

$$E = 2.1 * 10^6 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$\lambda = K * L / r$$

$$F_e = \pi^2 * E / \lambda^2 = 2.588 * 10^3 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$F_e / F_y = 0.978$$

$$F_{cr} = 0.658^{F_e / F_y} * F_y = 1.681 * 10^3 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$P_n = F_{cr} * 9.1 \text{ [cm]} * 1.2 \text{ [cm]} = 18.355 \text{ [Tonf]}$$

La placa TP3 cumple con la esbeltez mínima de 200 recomendada por la norma y su resistencia de 18.3 [tonf] supera la sollicitación en cada una de las placas.

Finalmente, la Figura 3-23 ilustra las partes materializadas del mecanismo de amplificación de fuerza.

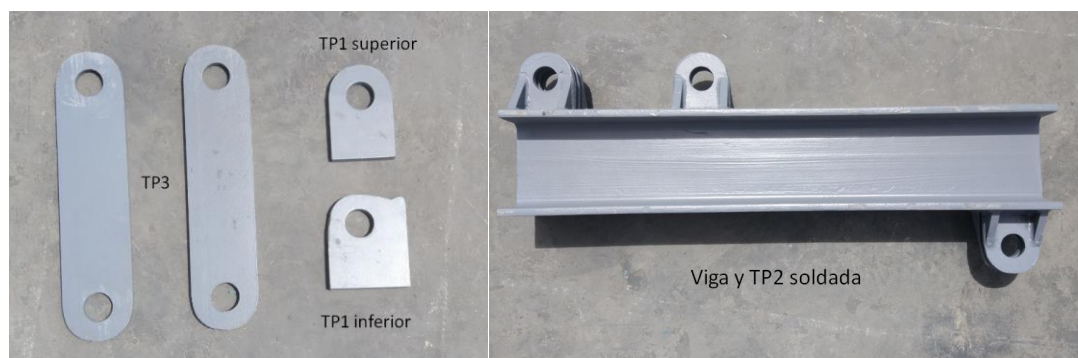


Figura 3-23 Placas TP1, TP3 y viga con placas TP2 soldadas

3.4. VERIFICACIÓN DEL CÁLCULO PREVIO

Como primera aproximación, se realizó una prueba del ensayo VII utilizando el mecanismo de amplificación de fuerza ya que este ensayo es el que más fuerza requiere para lograr la falla. El objetivo de esta prueba es verificar si los cálculos y suposiciones tanto del mecanismo como de la probeta se hicieron de manera correcta.

Al realizar el ensayo ocurrió la falla deseada, es decir, la rotura del perno con el hilo incluido en el plano de corte. Para determinar el error experimental se utilizó el esfuerzo de rotura por corte del perno, extraído del estudio de J Wallaert [21] y verificado con los de la guía de diseño 13.1 de la AISC [23], ya que poseen valores prácticamente iguales. Luego, los resultados arrojaron los siguientes valores:

Datos:

- Diámetro perno hilo incluido: $d_p = 16,31 [mm]$
- Esfuerzo de rotura del perno: $F_{nv} = 85 [ksi]$
- Resistencia teórica rotura perno: $R_t = F_{nv} * d_p^2 * \pi / 4 = 12,481 [Tonf]$

Valores ensayo:

- Resistencia experimental sistema MTS: $R_{R,mts} = 4,299 [Tonf]$
- Resistencia experimental amplificada: $R_R = 3 * 4,299 [Tonf] = 12,898 [Tonf]$

Error

- $E[\%] = \frac{|R_R - R_t|}{R_R} = 3,23[\%]$

Durante este ensayo de prueba se observó un comportamiento adecuado del mecanismo, lo que permitirá realizar de manera correcta todos los ensayos de este estudio.

Por otro lado, se observó que el error entre la resistencia real y la teórica de este primer ensayo fue basten baja, no superando el 4%, validando el esfuerzo de rotura extraído del estudio [21] Además, se observa que la relación 1:3 de la amplificación de fuerza se acerca bastante al valor real ya que también se encuentra incluido en el error experimental. Finalmente, cabe mencionar que la probeta utilizada no presentó daños ni signos de fluencia por lo que se verifica su diseño.

Capítulo 4

EQUIPO EXPERIMENTAL

Antes de realizar cualquier tipo de medición es preciso conocer a cabalidad todas las partes y componentes del equipo experimental. Para ello, este capítulo ahonda en todos los elementos que fueron utilizados en menor o mayor medida para realizar las mediciones de este estudio y los procesos y procedimientos que se deben llevar a cabo para utilizar el equipo experimental, de manera segura y correcta.

En la primera sección de este capítulo, se muestra una descripción general de todos los elementos del equipo experimental, incluyendo tanto los principales componentes como las herramientas secundarias.

Posteriormente, se especifica uno a uno todos los pasos y procedimientos que se deben seguir para llevar a cabo cada una de las mediciones, desde la preparación de las probetas hasta su montaje y posterior ensayo.

Finalmente se entregan recomendaciones y resguardos que se deben considerar para realizar sin contratiempos este tipo de ensayos.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS APARATOS

Para llevar a cabo el presente estudio y controlar tanto la fuerza como la deformación, se utilizó la máquina MTS 810 (Material Test System) del Laboratorio de Ingeniería simorresistente, la cual se muestra en la Figura 4-1 y que proporciona un control detallado y preciso de la velocidad de carga y la fuerza producto de la aplicación de un desplazamiento monótonamente creciente.



Figura 4-1 Máquina MTS 810

Esta máquina trabaja tanto a compresión como a tracción axial. El material, elemento o probeta que se desea ensayar debe ser ajustado según la mordaza adecuada y apretado hidráulicamente por el sistema MTS 647 Hydraulic Wedge Grip que se muestra en la Figura 4-2.

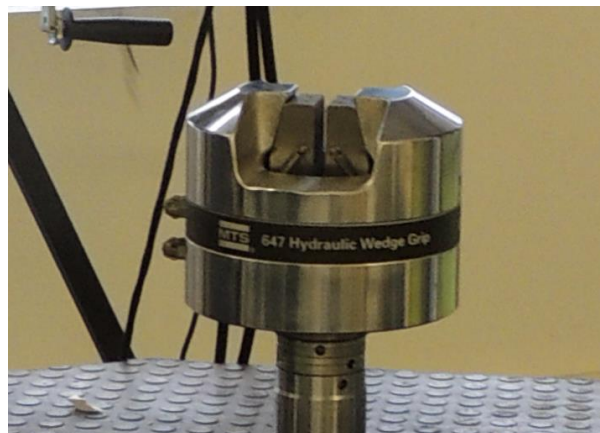


Figura 4-2 Sistema MTS 647 Hydraulic Wedge Grip

Para este estudio se utilizaron dos juegos de cuñas debido al espesor de las probetas que se requerían ensayar. La mordaza n°1 se utilizó para ensayar probetas con espesor menor a 7 [mm], es decir para los ensayos en que se induce el tipo de falla por aplastamiento

y fractura del área neta, mientras que la mordaza n°2 (ver Figura 4-3) se utilizó para placas con espesor superior a 8 [mm] que viene a ser el caso en que se necesita montar el mecanismo.

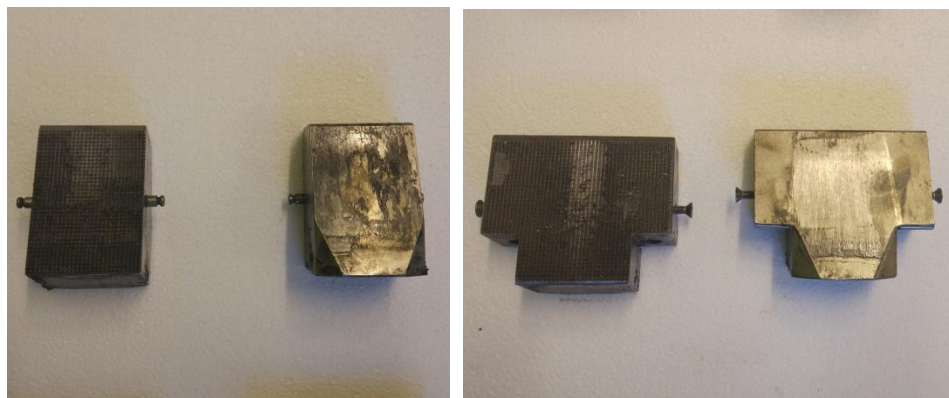


Figura 4-3 Mordaza n°1 (izquierda) y n°2 (derecha)

La herramienta de la Figura 4-4 tiene la finalidad de ajustar los resortes de la mordaza n°1 en el sistema MTS 647 Hydraulic Wedge Grip para un correcto agarre y funcionamiento. En el caso de las mordazas n°2, los resortes deben ajustarse mediante alambres para luego ser atornillados.



Figura 4-4 Herramienta de ajuste, resortes y tornillos para instalar las mordazas

Otro de los aparatos utilizados en este estudio es el sistema de control y adquisición de datos MTS 407 Controller (Figura 4-5) que trabaja en conjunto con el software integrado para ajustar la velocidad de carga, la deformación máxima que se quiere alcanzar y la posición en que se desea colocar la empuñadura para comenzar el ensayo que está conectado con la máquina MTS 810 (para su instalación y configuración consultar manual

de uso [24]). Por otro lado se utilizó el software Tracer DAQ Pro para graficar en tiempo real y registrar cada uno de los ensayos.



Figura 4-5 Gabinete con controlador MTS 407

La MTS Hydraulic Power Unit Control (ver Figura 4-6) es otro de los elementos fundamentales para el funcionamiento de este ensayo, y tal como lo dice su nombre es la unidad de control del sistema hidráulico el cual posee las funciones de encender, apagar, reiniciar y de ajustar la presión dependiendo de su utilización, es decir, mantener en presión alta cuando se esté ensayando y en presión baja mientras no se esté ocupando para no esforzar la máquina ni gastar energía innecesariamente.



Figura 4-6 Unidad de control hidráulico MTS Hydraulic Power Unit Control

Además, se puede observar que la mayoría de los aparatos posee un botón rojo de apagado de emergencia, que detiene inmediatamente el sistema en caso de ser activado como medida de seguridad.

4.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.2.1. PREPARACIÓN PROBETAS

En general, para llevar a cabo cualquier medición utilizando el presente equipo, es necesario seguir un sencillo procedimiento que se describirá a continuación.

Primero, se debe contabilizar y confirmar que exista un total de 24 placas por cada tipo de ensayo, es decir seis placas con el mismo método de perforación, donde se debe verificar que posean las mismas dimensiones, de manera que las probetas sean comparativas entre sí. Posteriormente, se deben pintar las probetas con cal hidráulica y una vez seco, cuadrar con lápiz cada 1 [cm]. La pintura tiene como principal función determinar las zonas donde fluyen las placas, puesto que se producirán pequeñas estrías y un descascaramiento de la pintura dejando en evidencia la fluencia del material. Por otro lado la cuadrícula sirve para medir la deformación de las placas, principalmente en los ensayos de falla por fractura del área neta y aplastamiento.



Figura 4-7 Medición y contabilización de placas (izquierda); pintura y cuadriculado (derecha)

Una vez hecho esto se deben juntar dos placas en sentido opuesto e introducir el perno (de 5/8" o 3/4" según el ensayo) en conjunto con su respectiva golilla y tuerca para luego ser apretado manualmente con una llave. Se deben mantener alineadas las placas mientras se aprieta para que estas trabajen paralelamente a la fuerza aplicada.



Figura 4-8 Unión de placas mediante un perno

4.2.2. MONTAJE

Una vez terminadas las probetas se procede a encender la MTS Hydraulic Power Unit Control y esperar al menos 5 minutos para que la presión se estabilice. Transcurrido este tiempo se podrá comenzar a manipular la máquina MTS 810.

Para el caso de los ensayos de fractura de área neta y aplastamiento, las probetas se pueden montar directamente en la máquina MTS 810 utilizando las mordazas n°1, ya que poseen un espesor de 6 [mm] y debido a que la falla inducida se producirá a una fuerza estimada menor que la admisible nominalmente por el sistema. Para montar solo es necesario ajustar la máquina MTS 810 a la altura correcta, es decir, se fija la parte inferior en +00 [mm] (según la referencia interna del sistema) para luego fijar la parte superior a una altura en que la mordaza ocupe la totalidad de su área en apretar la probeta. Finalmente la probeta se coloca alineada al eje de trabajo axial para posteriormente accionar el apriete de las mordazas (Ver Figura 4-9).



Figura 4-9 Montaje de probeta directo a máquina MTS 810

Ya ajustadas las placas, se monta la viga inferior haciendo calzar las perforaciones y fijándolas con un pasador. De la misma manera se realiza el montaje de la viga superior. Con ambas vigas montadas se ajustan las placas TP3 que unen ambas vigas colocando en cada conexión un pasador. Cada vez que se coloque un pasador, éste debe asegurarse con chavetas “R” en cada extremo, como una forma de asegurar que el pasador no se salga de la conexión. El mecanismo montado sin la probeta se muestra en la Figura 4-10.

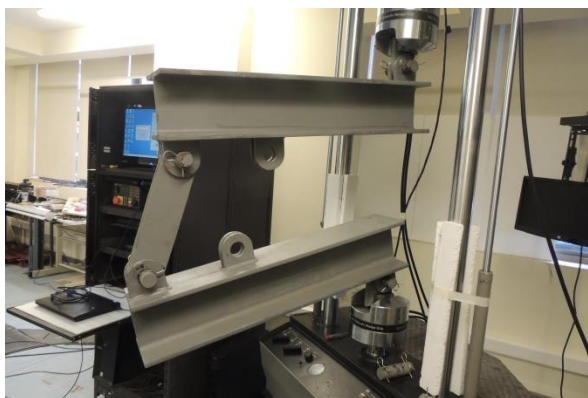


Figura 4-10 Montaje del mecanismo de amplificación de fuerza

Antes de ajustar la probeta se debe verificar que la parte inferior de la máquina MTS 810 esté fija a -50[mm] (según la referencia interna del sistema). Para ajustar la probeta se debe subir la viga superior utilizando la máquina MTS hasta que calcen las perforaciones de las conexiones. Para cerrar el mecanismo se insertan los pasadores y sus respectivas chavetas. Antes de comenzar el ensayo la probeta no debe hacer juego ni quedar suelta en ningún punto debido a que se pierde capacidad de deformación en el sistema, pudiendo llegar al límite de +70 [mm] sin producir la falla deseada. Para que esto no ocurra, se sube

la MTS 647 superior fijándose que el sistema no tome una carga superior a 1 [kN]. De esta manera el registro de la carga comienza desde el momento en que se empieza a deformar la probeta.



Figura 4-11 Montaje de la probeta en mecanismo

4.2.3. DATOS EN SOFTWARE Y APLICACIÓN DE CARGA

En todos los ensayos es la deformación la que incrementa linealmente en el tiempo por lo que la carga es la respuesta a esta deformación. Para realizar esto, se utilizó el software integrado de la MTS 407 donde previo a cada tipo de ensayo, se debe ajustar la carga máxima e ingresar la velocidad con la que se deformará la probeta, además de ajustar la posición inicial de la MTS 647 inferior. Los datos ingresados para cada ensayo se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Datos de entrada ingresados al software

Ensayo	Posición inicial [mm]	Máxima deformación [mm]	Velocidad [mm/min]
I, II, V, VI	0	+70	10
III, IV, VII	-50	+70	20

La razón por la cual se escogió estas velocidades de ensayos es más bien de tipo práctica ya que de esta forma los ensayos no se extienden por demasiado tiempo pero a la vez permiten observar con cierta detención las fases de la curva fuerza-deformación.

Para el caso de los ensayos III, IV y VII se escogió el doble de velocidad que en los otros ensayos ya que éstos utilizan el mecanismo de amplificación de fuerza por lo que la

velocidad real del ensayo se reduce aproximadamente en la misma proporción que la fuerza. De esta manera, la velocidad de ensayo aproximada es de $20/3$ [mm/min] lo que equivale a $6,67$ [mm/min].

Habiendo ingresado los datos de entrada y verificando que todo esté en su correcta posición, se procede a iniciar el ensayo hasta que se alcance la resistencia máxima de la probeta o hasta que ocurra la falla.

4.3. RESGUARDOS

Antes de comenzar una jornada de ensayo como precaución se realiza al menos un ensayo de prueba de manera de confirmar que todos los parámetros estén ingresados correctamente. De esta forma se previene que alguna de las probetas se ensaye a mayor velocidad o que no sea suficiente la fuerza o deformación para inducir la falla esperada.

Por otro lado es indispensable la ayuda de al menos dos personas y el uso de zapatos de seguridad durante el montaje debido al alto peso que se manipula. Durante el desarrollo de los ensayos se recomienda el uso de antiparras y no ubicarse en la dirección axial de los pernos por algún posible desprendimiento de materiales de las probetas, como esquirlas de las placas o partes del perno.

Capítulo 5

CERTIFICACIÓN DE MATERIALES

Una certificación de calidad permite determinar ciertas propiedades y características de una pieza en específico, con el fin de garantizar las exigencias definidas por diferentes normas establecidas [6][7].

Este capítulo detalla los certificados de calidad de cada plancha que fue cortada para extraer las probetas y de cada grupo de pernos con el que se realizaron los ensayos. A partir de los datos mostrados en cada certificado de calidad, se pueden determinar las fuerzas reales que resistirán cada una de las probetas con el objetivo de contrastarlas con las fuerzas experimentales.

Con el fin de verificar los certificados de las planchas, se determinaron experimentalmente las propiedades de éstas, basadas en la NCh200.Of72 “Productos metálicos - Ensayo a Tracción” [25] utilizando probetas de la misma colada con la que se realizaron los ensayos de este estudio.

5.1. CERTIFICADO DE CALIDAD DE PLANCHAS

Para los ensayos I y II, las probetas están compuestas por las placas T5 y T6 respectivamente, de material A36 con espesor de 6 [mm]. Como se mencionó en capítulos anteriores, todas las placas de estos ensayos provienen de la misma plancha, es decir pertenecen a la misma colada, con el fin de que los resultados experimentales sean comparables entre sí. Dado esto, todas las probetas de los ensayos I y II debiesen tener las mismas propiedades del material. El Anexo A.5 muestra el certificado de calidad de esta colada basado en la especificación ASTM A36/A36M, con los siguientes resultados:

Tabla 5-1 Datos de certificado de plancha para los ensayo I y II

<i>N° Colada</i>	J67-10418A
<i>Grado de acero</i>	A36
<i>Espesor [mm]</i>	6
<i>F_y [Mpa]</i>	353
<i>F_u [Mpa]</i>	486
<i>Deformación [%]</i>	28.5

Del mismo modo, en los ensayos V y VI, las probetas están compuestas por las placas T8 y T9, de material A36 con espesor 6 [mm]. A pesar de tener las mismas características que las placas de los ensayos I y II, las placas T8 y T9 provienen de otra colada por lo que no poseen las mismas propiedades. El Anexo A.6 muestra el certificado de calidad de esta colada basado en la especificación ASTM A36/A36M, con los siguientes resultados:

Tabla 5-2 Datos de certificado de plancha para los ensayo V y VI

<i>N° Colada</i>	17202824A
<i>Grado de acero</i>	A36
<i>Espesor [mm]</i>	6
<i>F_y [Mpa]</i>	320
<i>F_u [Mpa]</i>	465
<i>Deformación [%]</i>	24.5

5.2. COMPROBACIÓN DE CERTIFICADOS DE CALIDAD

Con el objetivo de comprobar que lo informado en los certificados de las placas T5, T6, T8 y T9 sean los correctos, se realizó el Ensayo a Tracción de acuerdo a la NCh200 que establece la terminología relacionada con el ensayo de tracción y el método normal de ensayo a la tracción para probetas extraídas de productos metálicos. En ella se indica la geometría que deben tener las probetas y el procedimiento de ensayo. A partir de esto, se confeccionaron dos probetas de cada placa de forma de tener cuatro probetas por cada colada, tal como se ilustra en la Figura 5-1. Para todas las probetas la distancia entre marcas es de 40 [mm] y la sección transversal se muestra en la Tabla 5-3.

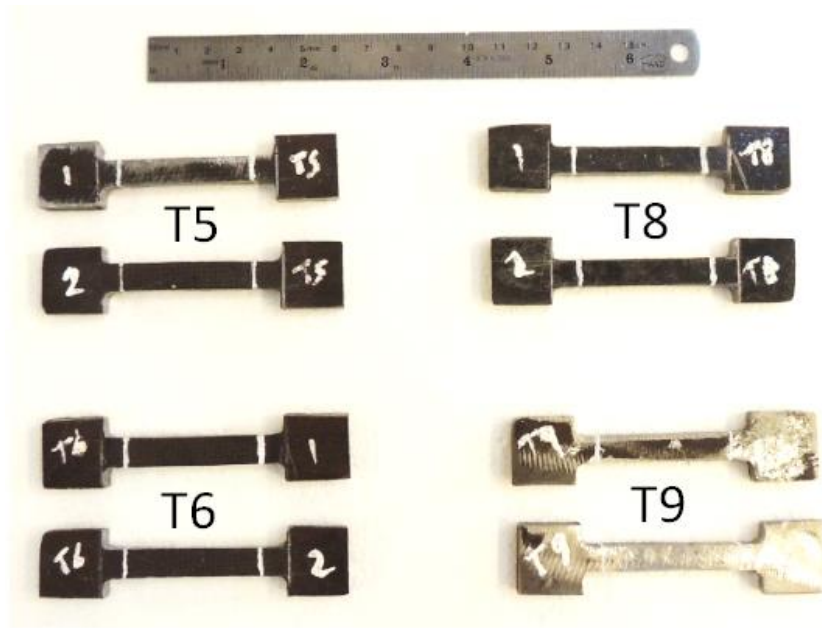


Figura 5-1 Probetas confeccionas para realizar ensayo a tracción

La curvas de esfuerzo vs deformación como resultado del ensayo a tracción de las probetas T5 y T6 muestran una gran similitud tanto en el esfuerzo de fluencia como en el esfuerzo de rotura, lo que corrobora que provienen de una misma colada.

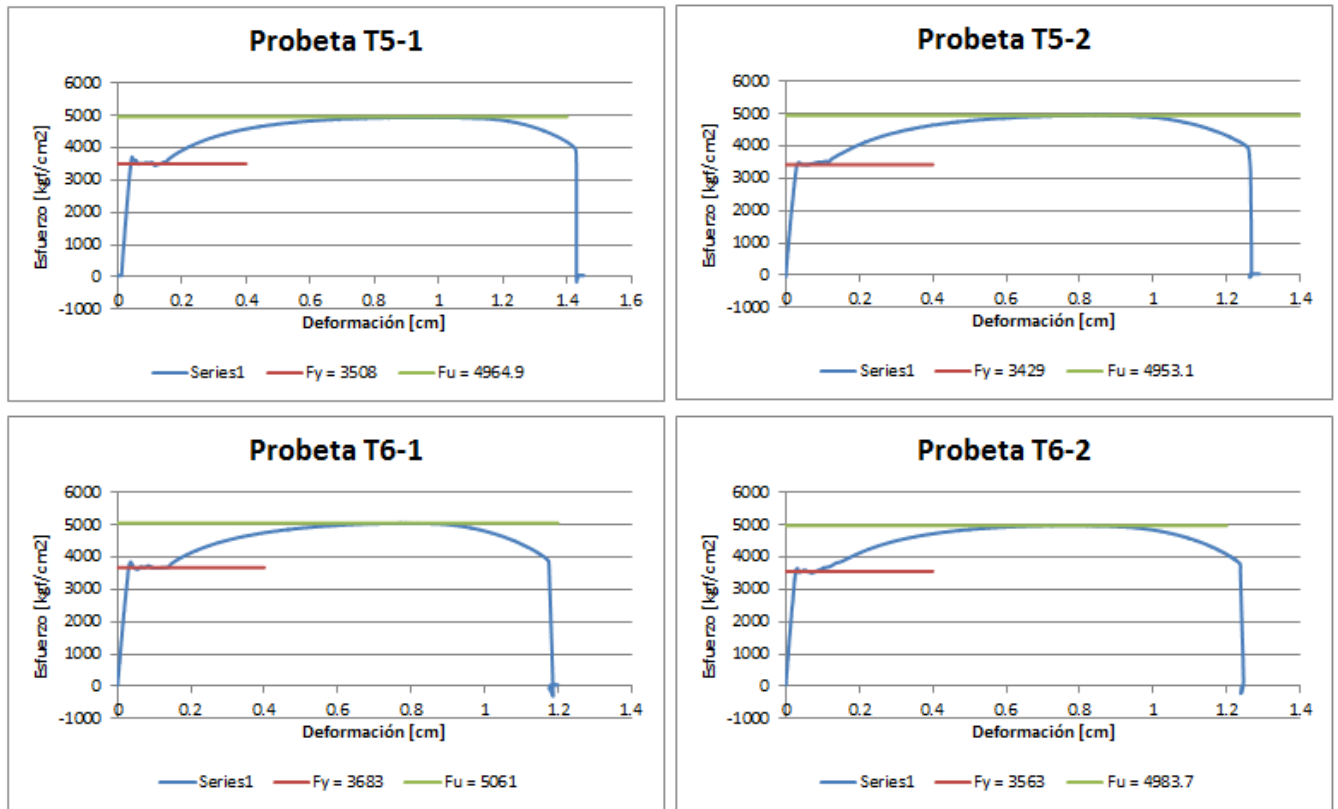


Figura 5-2 Curvas de esfuerzo vs deformación para certificación de probetas T5 y T6

Lo mismo ocurre con las curvas de esfuerzo vs deformación de las probetas T8 y T9 donde se registra un gran parecido en ellas.

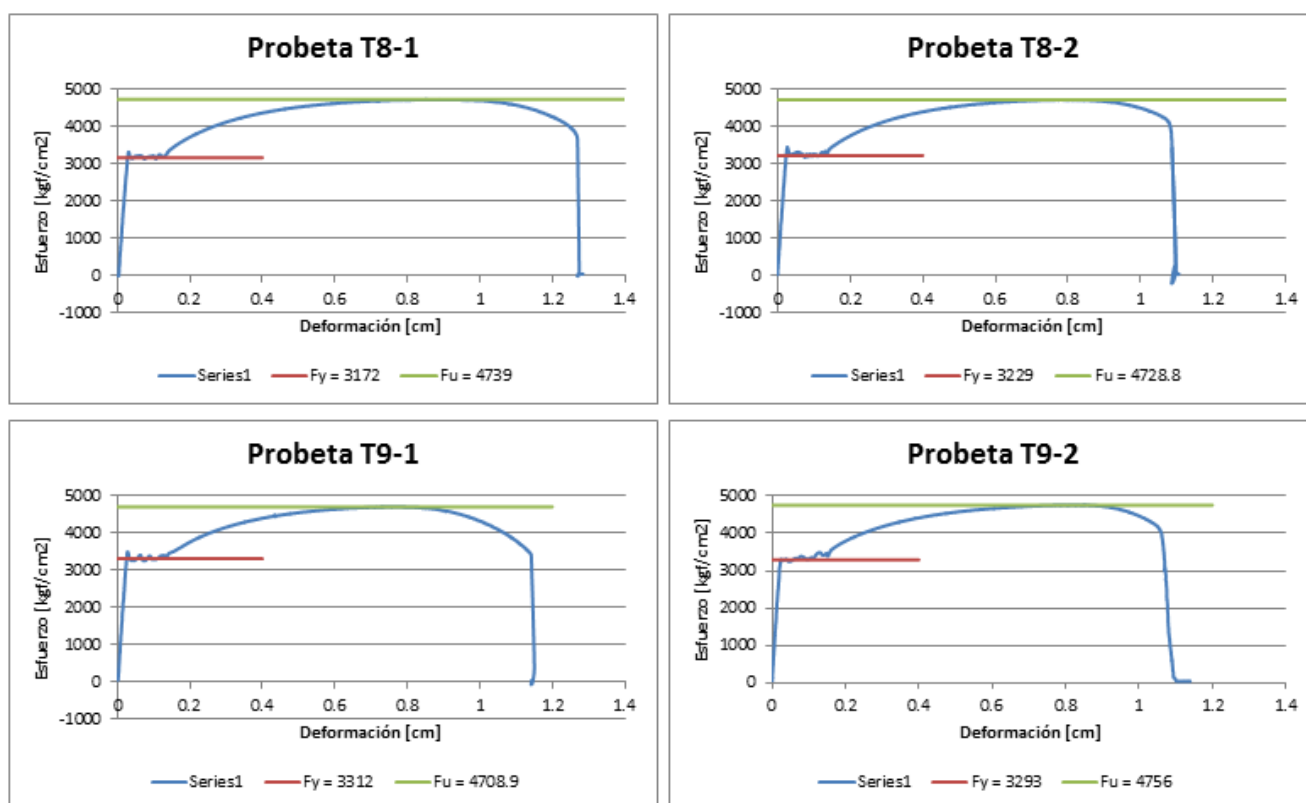


Figura 5-3 Curvas de esfuerzo vs deformación para certificación de probetas T8 y T9

La geometría de las probetas y los resultados de los ensayos se adjuntan en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3 Resumen de resultados de ensayo a tracción

Nº Colada	Probeta	Ancho [mm]	Área [mm²]	F_y [kgf/cm²]	F_u [kgf/cm²]	Def. [%]
J67-10418A	T5-1	7.90	47.4	3508	4965	31.25
	T5-2	8.50	51.0	3429	4953	26.25
	T6-1	8.55	51.3	3683	5061	30
	T6-2	8.20	49.2	3563	4984	30
17202824A	T8-1	8.15	48.9	3172	4739	28.75
	T8-2	8.10	48.6	3229	4729	27.5
	T9-1	7.85	47.1	3312	4709	25
	T9-2	7.40	44.4	3293	4756	no valido

Luego, para comparar estos resultados con cada certificado, se promedian los esfuerzos y deformaciones para cada colada.

Tabla 5-4 Promedio de esfuerzo a fluencia y tensión última por colada

<i>N° Colada</i>	<i>F_y [kgf/cm²] (Mpa)</i>	<i>F_u [kgf/cm²] (Mpa)</i>	<i>Def. [%]</i>
J67-10418A	3546 (348)	4991 (489)	29.38
17202824A	3252 (319)	4733 (464)	27.08

Se observa que los esfuerzos resultantes son prácticamente los mismos que en los certificados de calidad para ambas coladas, mientras que las deformaciones presentan pequeñas diferencias, siendo menores en el caso de los certificados. Dado lo anterior, se comprueba la veracidad de los resultados y por lo tanto, se utilizarán dichos esfuerzos para cálculos posteriores.

A partir del esfuerzo último de cada colada y de la geometría de las probetas de los ensayos I, II, V y VI se determina la resistencia por certificado que debe alcanzar cada probeta para cada modo de falla.

Tabla 5-5 Resistencia teórica de los ensayos I, II, V y VI a partir de los resultados de los certificados

<i>Ensayo</i>	<i>Modo de falla</i>	<i>Resistencia según certificado [tonf]</i>
<i>I</i>	<i>Fractura área neta</i>	9.283
<i>II</i>	<i>Aplastamiento</i>	7.726
<i>V</i>	<i>Fractura área neta</i>	8.519
<i>VI</i>	<i>Aplastamiento</i>	7.156

5.3. CERTIFICADO DE CALIDAD DE PERNOS

Los certificados de calidad de los pernos utilizados se encuentran en los Anexos A.1 hasta A.4 donde el dato de mayor importancia es la resistencia última a tracción. Para los ensayos en que se induce la falla del perno, es decir, los ensayos III, IV y VII, el esfuerzo de corte se calculará utilizando la norma AISC 360-10, y dependerá de la resistencia a tracción indicada y de si el hilo se encuentra fuera o dentro del plano de corte. Frank and Yura, 1981 [26], determinó que la resistencia a corte cuando el hilo se encuentra en el plano de corte es de 0.8 veces la resistencia con el hilo excluido del plano de corte.

$$F_{uvX} = F_{ut} * \frac{2}{3} \quad [\text{hilo excluido del plano de corte}]$$

$$F_{uvN} = 0.8 * F_{ut} * \frac{2}{3} \quad [\text{hilo incluido en el plano de corte}]$$

Dónde:

- F_{ut} : Esfuerzo a tracción del perno especificado en certificado de calidad.
- F_{uvX} : Esfuerzo de corte del perno con hilo excluido en el plano de corte.
- F_{uvN} : Esfuerzo de corte del perno con hilo incluido en el plano de corte.

A partir de este análisis, se determina el esfuerzo y resistencia a corte que alcanzarán los pernos utilizados en cada ensayo a partir de los certificados de calidad:

Tabla 5-6 Resistencia teórica de los ensayo III, IV y VII a partir de los resultados de los certificados

<i>Ensayo</i>	<i>Modo de falla</i>	F_{ut} [KSI]	F_{uv} [KSI]	<i>Resistencia a corte por certificado [tonf]</i>
<i>III</i>	<i>Hilo incluido</i>	134	71.5	9.945
<i>IV</i>	<i>Hilo excluido</i>	134	89.3	12.432
<i>VII</i>	<i>Hilo incluido</i>	129	68.8	13.787

Capítulo 6

CÁLCULO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los principales parámetro de análisis son la deformación aplicada sobre las probetas, las cargas resultantes de esas deformaciones y el tiempo que demoró cada ensayo. Los resultados de los ensayos que se verán en este capítulo se enfocan principalmente en estas dos primeras variables, ya que se busca determinar cuánto afecta en la resistencia el tipo de perforación y si existe alguna diferencia considerable en la deformación de las probetas. El tiempo no se considera una variable relevante ya que los ensayos del mismo tipo poseen la misma velocidad de deformación, y por tanto tendrán una duración más bien constante.

Además, durante este capítulo se compararan las cargas de roturas experimentales con las resistencias nominales y con las cargas de rotura calculadas a partir de los certificados de calidad de los materiales utilizados de cada ensayo. Por otro lado, para los ensayos I, II, V y VI se medirán las deformaciones con el propósito de comparar las probetas perforadas mecánicamente y las perforadas térmicamente.

6.1. ENSAYO I: “RUPTURA DEL ÁREA NETA CON PERNO DE 5/8 [PULG]”

Como se mencionó en el Capítulo 5, el modo de falla dependerá de la geometría de la probeta. Si bien los cálculos realizados para este modo de falla consideran el área transversal a ambos lados de la perforación, la falla ocurrirá siempre por estricción en uno de los dos lados como se observa en el Anexo C. A continuación se presenta el gráfico de Carga vs Deformación para las tres probetas realizadas con cada tipo de perforación:

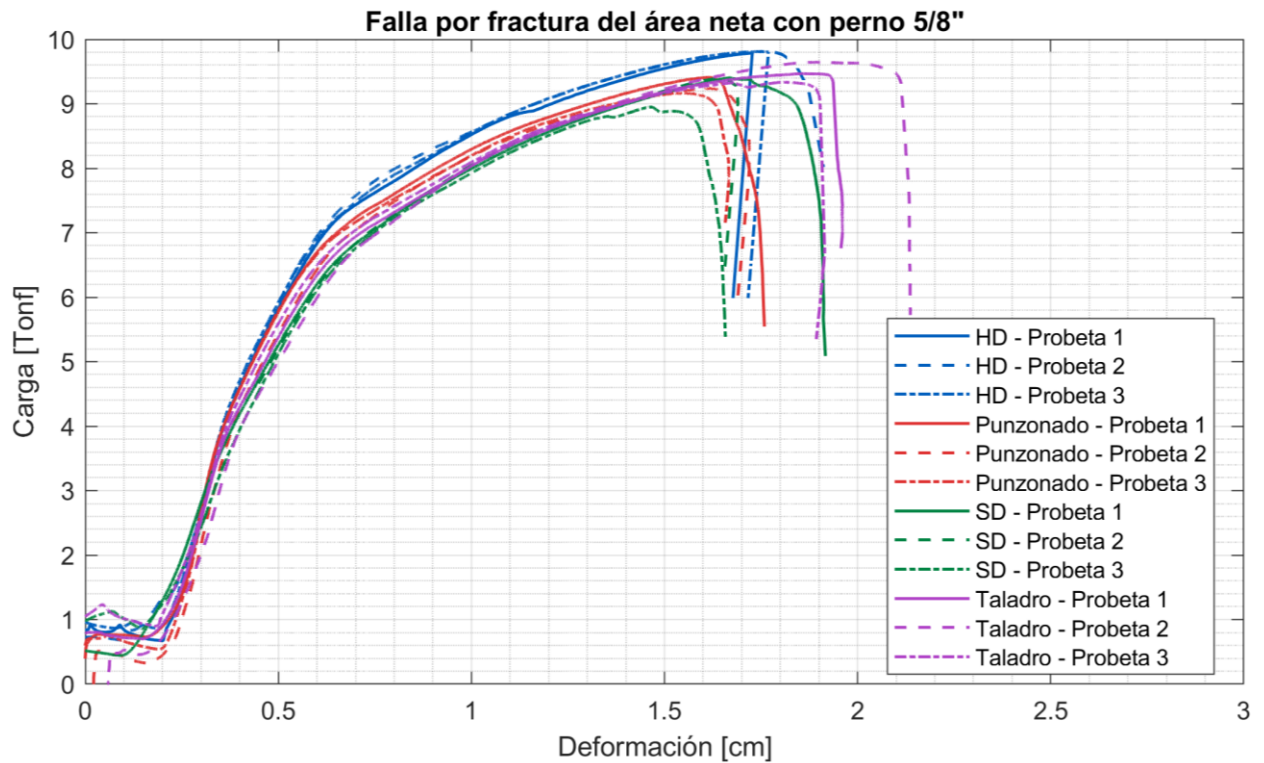


Figura 6-1 Gráfico de carga vs deformación de todas las probetas utilizadas en el Ensayo I

Se observa que en el caso de las perforaciones realizadas mecánicamente, es decir punzonado y taladrado, las curvas se comportan de manera homogénea. Ahora bien, los valores de cargas máximas en los 4 casos ocurren en un rango acotado, entre las 9,0 [tonf] y 9,6 [tonf].

En la Tabla 6-1 se muestran los valores de carga en la cual se produjo la rotura y el promedio de cada tipo de perforación.

Tabla 6-1 Cargas máximas según probetas del Ensayo I

Perforación	Carga máxima [tonf]			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Plasma HD	9.7891	9.8154	9.8126	9.8057
Plasma SD	9.4043	9.3945	8.9508	9.2499
Punzonado	9.4113	9.2453	9.1684	9.2750
Taladrado	9.4693	9.6454	9.3365	9.4837

A partir de estos datos y utilizando medidas de tendencia central se calculó la dispersión que presentan los datos de manera general. Para esto se utilizó el coeficiente de variación y se consideró como criterio que este valor no supere el 5%.

Tabla 6-2 Medidas de tendencia central y coeficiente de variación para Ensayo I

σ [tonf]	0.271
$\bar{x}$ [tonf]	9.453
$CV * 100$	2.87%

Esto significa que existe una dispersión poco considerable y que por tanto, los datos se comportan de forma homogénea.

En la Figura.6-2 se muestran los valores máximos de carga que se obtuvo en cada probeta, los que representan las cargas de rupturas. A modo de comparación se incorpora el promedio de las cargas máximas registradas, la resistencia nominal para el tipo de probeta específica y la resistencia certificada de la plancha utilizada en esta probeta. La resistencia nominal se calculó previamente y se encuentra en la Tabla 6-3.

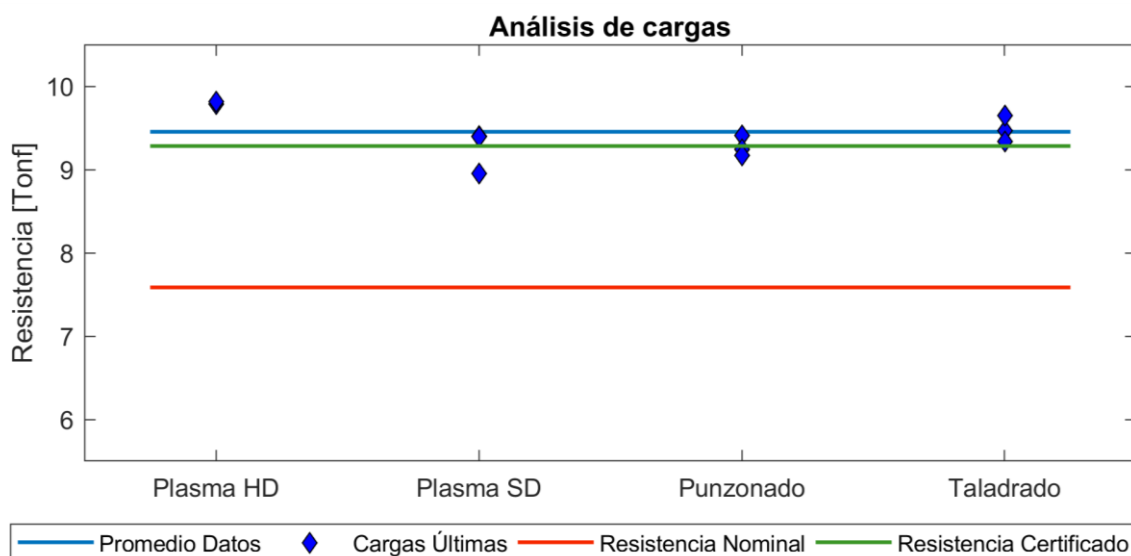


Figura 6-2 Gráfico de comparación de resistencias según método de perforación en Ensayo I

Tabla 6-3 Valores comparativos de resistencia de Ensayo I

Resistencia Promedio de datos [Tonf]	9.454
Resistencia nominal [Tonf]	7.585
Resistencia certificado [Tonf]	9.283

A partir de estos datos es posible determinar que para este modo de falla, las probetas presentan una sobrerresistencia promedio sobre la resistencia nominal equivalente al 24,7%. Además, el error entre la resistencia promedio y la calculada a partir de la certificación es de 1,9% lo que corrobora que la calidad del material es la indicada.

Por otro lado, para determinar y comparar la deformación de las probetas, se tomó como medida inicial la deformación en donde la carga es de 2 [Tonf], dado que las probetas no necesariamente empiezan a tomar carga desde el punto inicial pues las probetas poseen holgura en las perforaciones que permiten que el mecanismo se acomode antes de tomar carga. La deformación donde la carga es igual a 2 [tonf] es un punto en común en todas las probetas de este ensayo, ya que todas las curvas se encuentran en el rango elástico y por tanto están bajo las mismas condiciones. La deformación final, por otro lado, se encuentra en el punto de máxima carga que viene a ser la carga de rotura. La diferencia entre ambas deformaciones es la que se utiliza para realizar las comparaciones.

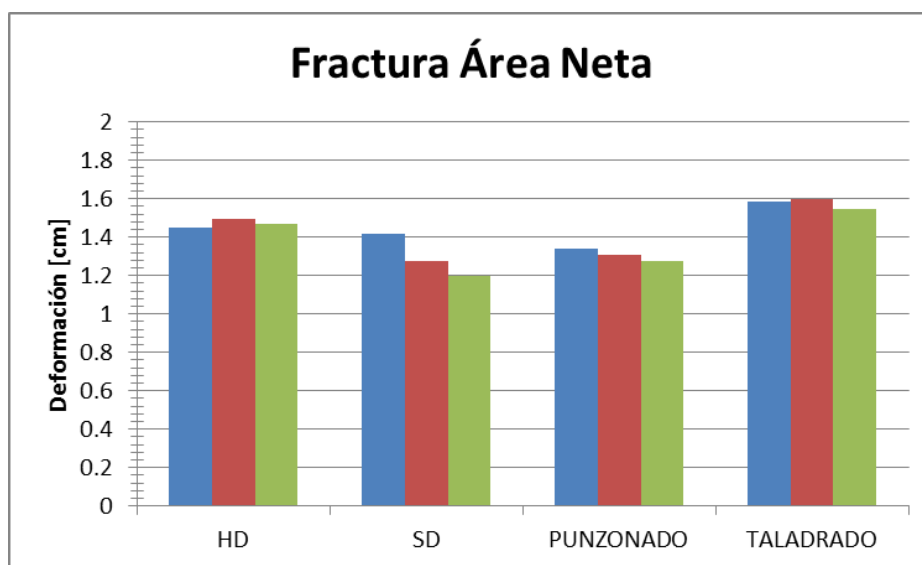


Figura 6-3 Gráfico de comparación de deformaciones Ensayo I

Se puede observar que las probetas perforadas con taladro tienen un comportamiento levemente más dúctil que el resto. En general se aprecia un comportamiento homogéneo, incluso en el caso del plasma de definición estándar que presenta más irregularidades en su geometría que el resto.

6.2. ENSAYO II: “APLASTAMIENTO CON PERNO DE 5/8 [PULG]”

El modo de falla de este ensayo ocurre por la concentración de esfuerzos donde el perno comprime el borde de la placa hasta que se produce el destaje. El Anexo C ilustra la falla inducida en laboratorio de todas las probetas. A continuación se presenta el gráfico de Carga vs Deformación para las tres probetas realizadas con cada tipo de perforación:

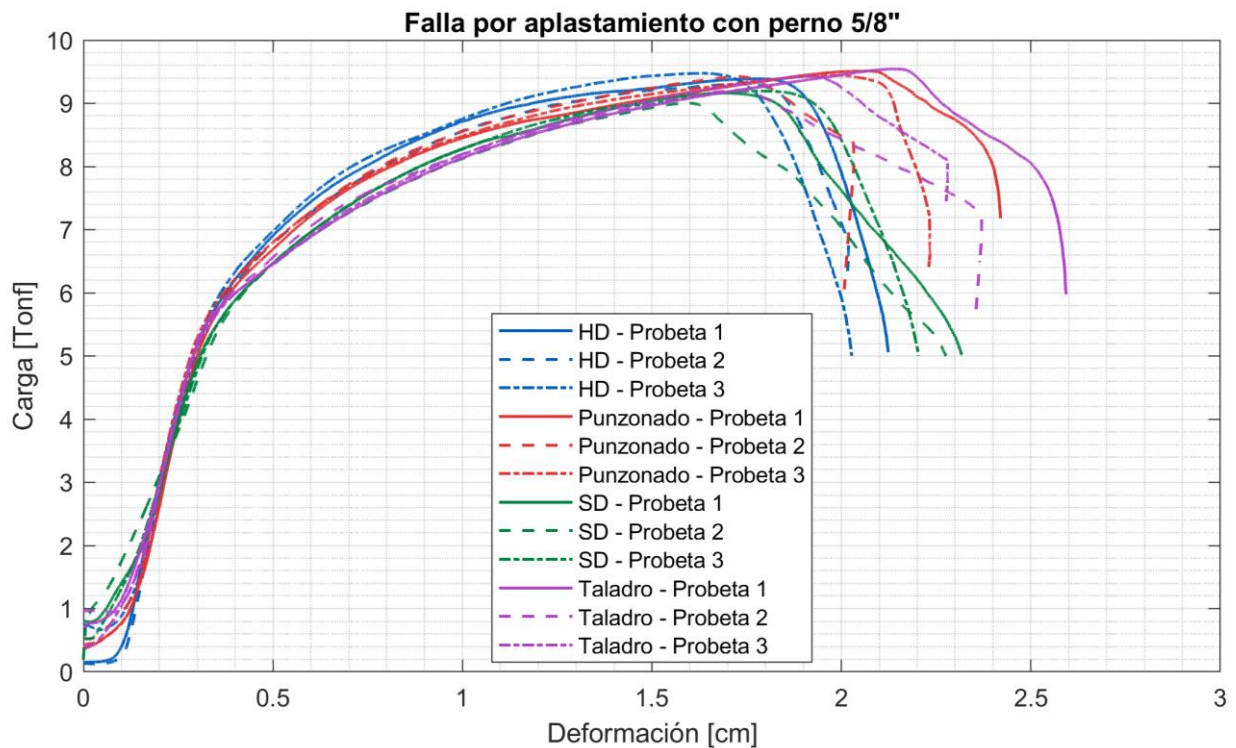


Figura 6-4 Gráfico de carga vs deformación de todas las probetas utilizadas en el Ensayo II

Las fallas en este ensayo ocurrieron todas de manera bastante más dúctil que el ensayo I, deformándose la probeta al menos 3 [mm] desde la carga máxima hasta el destaje. Se aprecia que para las distintas perforaciones, las cargas máximas ocurren en valores similares de carga. En la Tabla 6-4 se muestran los valores de carga a la cual se produjo la rotura y el promedio de cada tipo de perforación.

Tabla 6-4 Cargas máximas según probetas del Ensayo II

Perforación	Carga máxima [tonf]			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Plasma HD	9.389	9.305	9.476	9.390
Plasma SD	9.163	9.004	9.195	9.120
Punzonado	9.511	9.425	9.444	9.460
Taladrado	9.544	9.214	9.435	9.398

Utilizando estos datos y medidas de tendencia central se determina la homogeneidad que presentan los datos para este ensayo. Al igual que el ensayo anterior se utilizó el coeficiente de variación y se consideró como criterio que este valor no supere el 5%.

Tabla 6-5 Medidas de tendencia central y coeficiente de variación para Ensayo II

σ [tonf]	0.166
$\bar{x}$ [tonf]	9.342
$CV * 100$	1.77%

El coeficiente de variación en este caso es inferior a 5% e incluso menor al coeficiente de variación del ensayo anterior lo que significa que estos datos son aún más uniformes.

En la Figura 6-5 se muestran los valores máximos de carga que se obtuvo en cada probeta, los que representan las cargas de rupturas. A modo de comparación se incorpora el promedio de las cargas máximas registradas, la resistencia nominal para el tipo de probeta específica y la resistencia certificada de la plancha utilizada en esta probeta. La resistencia nominal se calculó previamente y se encuentra en la Tabla 3-5.

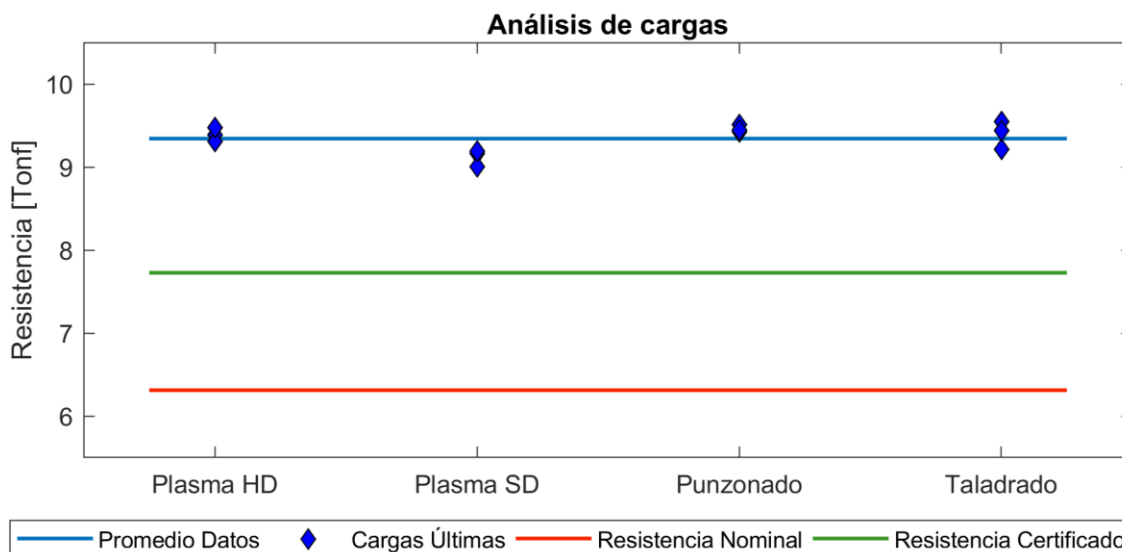


Figura 6-5 Gráfico de comparación de resistencias según método de perforación en Ensayo II

Tabla 6-6 Valores comparativos de resistencia de Ensayo II

Resistencia Promedio de datos [Tonf]	9.342
Resistencia nominal [Tonf]	6.312
Resistencia certificado [Tonf]	7.726

Al analizar estos datos se puede determinar que, para este modo de falla, las probetas presentan una sobrerresistencia promedio sobre la resistencia nominal equivalente al 48,0%. Además, el error entre la resistencia promedio y la calculada a partir de la certificación es de 20,9%. Esto se debe a que inicialmente la falla ocurre por aplastamiento mientras que el destaje del miembro se debe a la falla por corte, explicado en el estudio de S. Teixeira [27]. Esto significa que la resistencia promedio experimental es mayor que la resistencia calculada para la falla por aplastamiento. El efecto descrito se muestra en la Figura 6-6.

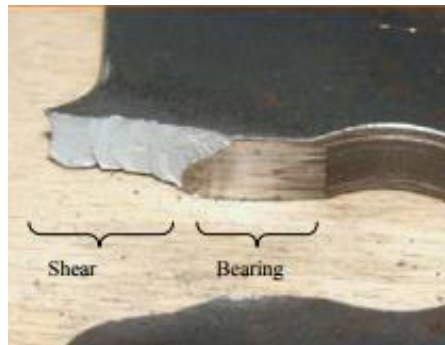


Figura 6-6 Falla inicial por aplastamiento y posterior falla por corte [27]

Luego, al obtener en este ensayo una resistencia similar al ensayo anterior, se utilizará el mismo criterio para determinar y comparar la deformación de las probetas, es decir, se toma como medida inicial la deformación en donde la carga indica 2 [Tonf] y como medida final la deformación en donde la carga es máxima.

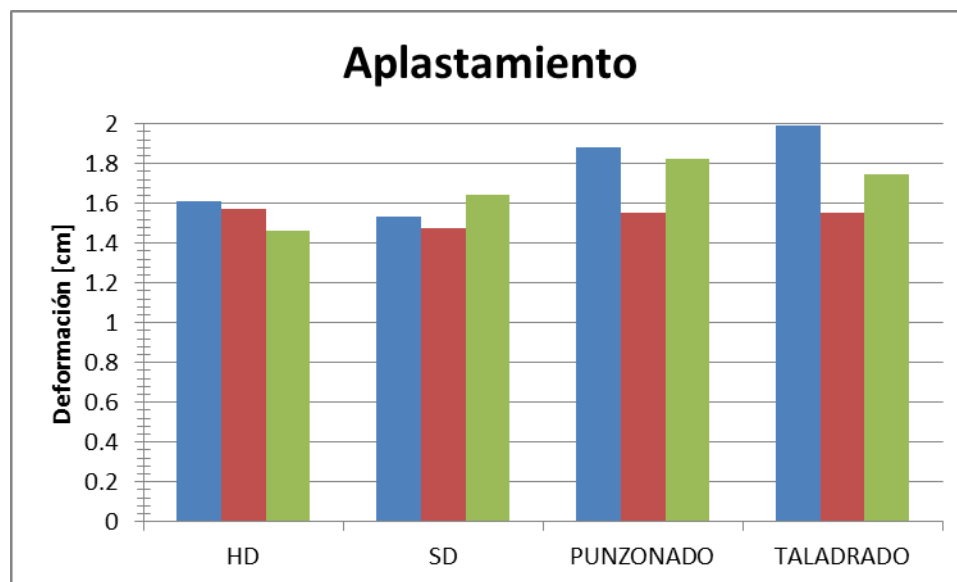


Figura 6-7 Gráfico de comparación de deformaciones Ensayo II

Se puede observar que las probetas perforadas con taladro nuevamente presentan una ductilidad levemente superior que el resto de las probetas. Si bien las probetas con perforaciones mecánicas presentan mayor ductilidad, se aprecia que en los cuatro casos, las menores deformaciones presentan valores similares.

6.3. ENSAYO III: "CORTE DEL PERNO HILO INCLUIDO CON PERNO DE 5/8 [PULG]"

Este ensayo tiene como objetivo determinar si tiene influencia el método de corte de la perforación de una conexión, en la falla del perno por cizalle con el hilo incluido en el plano de corte. A continuación se presenta el registro de carga vs deformación para las tres probetas realizadas con cada tipo de perforación hasta la falla del perno:

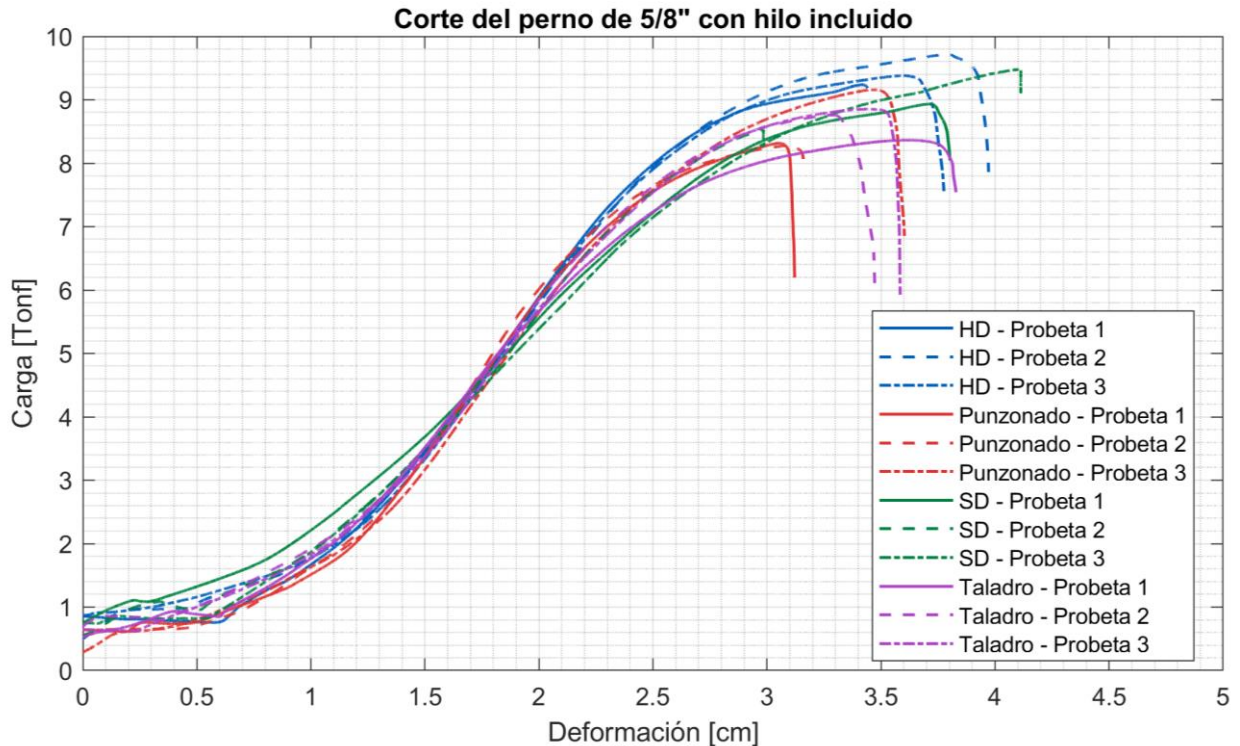


Figura 6-8 Gráfico de carga vs deformación de todas las probetas utilizadas en el Ensayo III

Durante este ensayo se observó que las fallas ocurrían de manera sumamente frágil donde, a diferencia de los ensayos anteriores, la falla de la probeta ocurría en el punto de máxima carga. Por otro lado, las curvas registradas presentan un comportamiento bastante uniforme, variando en la mayoría de los casos, solo en el último trayecto de la curva.

En la Tabla 6-7 se muestran los valores de carga a la cual se produjo la rotura y el promedio de cada tipo de perforación.

Tabla 6-7 Cargas máximas según probetas del Ensayo III

Perforación	Carga máxima [tonf]			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Plasma HD	9.2382	9.7152	9.3837	9.4457
Plasma SD	8.9352	8.5314	9.4818	8.9828
Punzonado	8.3154	8.277	9.1605	8.5843
Taladrado	8.3649	8.7603	8.8527	8.6593

Luego, se analiza la dispersión de los datos obtenidos utilizando el coeficiente de variación manteniendo el criterio donde este valor no supere el 5%.

Tabla 6-8 Medidas de tendencia central y coeficiente de variación para Ensayo III

σ [tonf]	0.482
$\bar{x}$ [tonf]	8.918
$CV * 100$	5.44%

El coeficiente de variación es levemente superior a 5% lo que implica que los datos presentan mayor heterogeneidad con respecto a los dos ensayos anteriores, sin embargo, este valor sigue siendo muy bajo lo que implica que no existe un efecto claro en la incidencia del tipo de perforación en la falla de este ensayo.

En la Figura 6-9 se muestran los valores máximos de carga que se obtuvo en cada probeta, los que representan las cargas de rupturas. A modo de comparación se incorpora el promedio de las cargas máximas registradas, la resistencia nominal para el tipo de probeta específica y la resistencia certificada del perno utilizado en esta probeta. La resistencia nominal se calculó previamente y se encuentra en la Tabla 6-9.

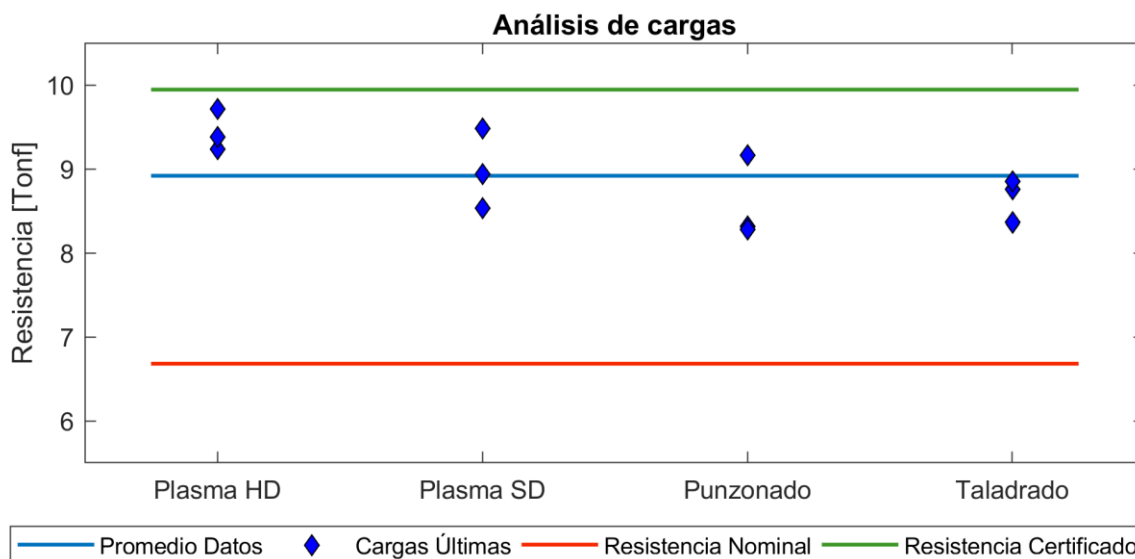


Figura 6-9 Gráfico de comparación de resistencias según método de perforación en Ensayo III

Tabla 6-9 Valores comparativos de resistencia de Ensayo III

Resistencia Promedio de datos [Tonf]	8.918
Resistencia nominal [Tonf]	6.680
Resistencia certificado [Tonf]	9.945

A partir de estos datos se observa que para este modo de falla, las probetas presentan en promedio una sobrerresistencia de aproximadamente de 33,5% sobre la resistencia nominal. Además, el error entre la resistencia promedio y la calculada a partir de la certificación es de 10.3%. Este error no despreciable de resistencias se debe a que la AICS360-10 incorpora una reducción de 20% en el esfuerzo de corte para el caso en que el hilo se encuentra incluido en el plano de corte, que debiese ser equivalente con la reducción de área de la sección del perno sin hilo a la sección con hilo. Mediante un pie de metro se determina el diámetro para ambos casos de un perno de 5/8".

Tabla 6-10 Diametro y área perno 5/8"

<i>Condicion del hilo</i>	<i>diametro [cm]</i>	<i>Área [cm²]</i>
<i>Incluido</i>	1.320	1.368
<i>Excluido</i>	1.587	1.979

El cuociente entre el área con hilo incluido y el área con hilo excluido del perno es igual a 0.691, lo que significa que la real reducción de área y por tanto de resistencia es de 30.9% que contrasta con el 20% de reducción de la AISC360-10. La diferencia entre estos valores es igual a 10.9% que es muy cercano al error de 10.3%, por lo que se evidencia que el error real entre la resistencia promedio y la calculada a partir de la certificación es mínima.

Por otro lado, se observa que la resistencia a corte de los pernos ensayados con probetas cortadas térmicamente fue en promedio superior a las ensayadas con punzonado y taladrado, poniendo en evidencia que el corte térmico con plasma no es perjudicial en el desempeño de los pernos.

Las deformaciones para las probetas de los ensayos en que se ocupa el mecanismo, no se analizaran debido a que la utilización de éste produce un mayor error porcentual en la medición.

6.4. ENSAYO IV: "CORTE DEL PERNO HILO EXCLUIDO CON PERNO DE 5/8 [PULG]"

Para cuarto ensayo el modo de falla corresponde a la fractura del perno por cizalle con el hilo excluido del plano de corte. A continuación se presenta el registro de carga vs deformación para las tres probetas realizadas con cada tipo de perforación hasta la falla del perno:

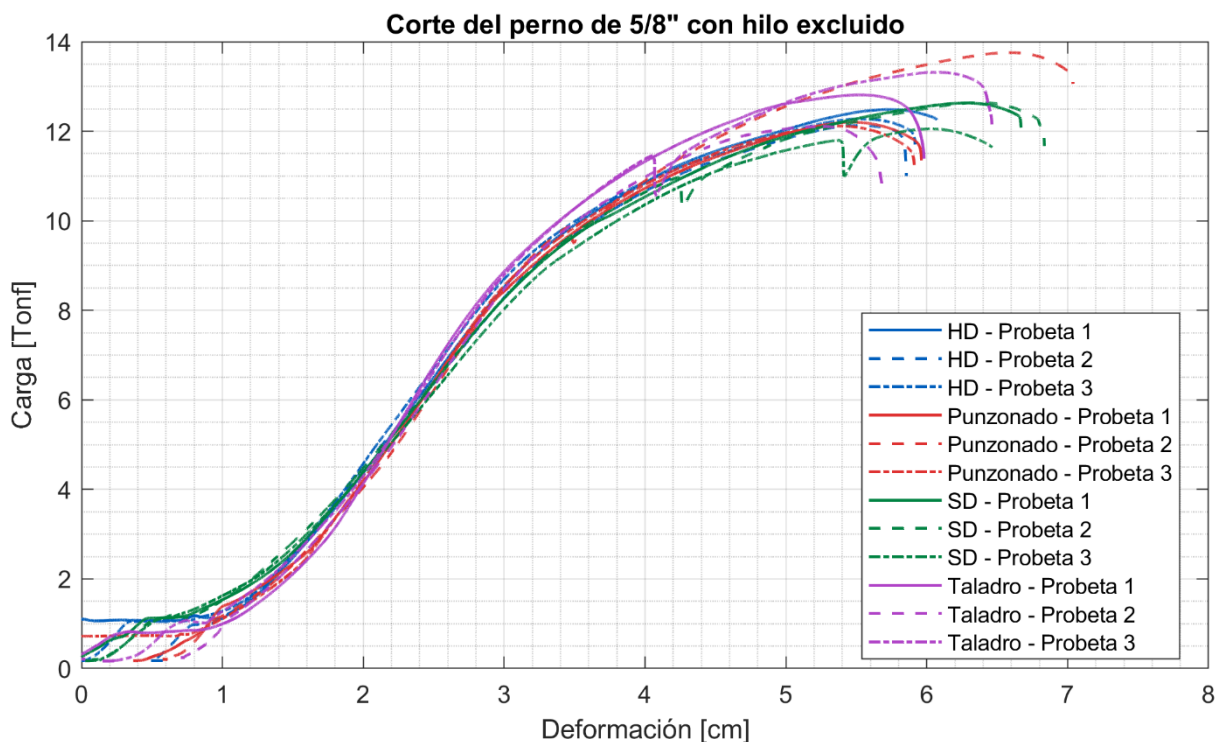


Figura 6-10 Gráfico de carga vs deformación de todas las probetas utilizadas en el Ensayo IV

Al igual que el ensayo III, se observó que las fallas ocurrían de manera sumamente frágil, y por tanto, de forma muy repentina. Por otro lado, las curvas registradas presentan un comportamiento similar, lo que supone resistencias homogéneas. En algunos casos, las curvas presentan saltos o breves disminuciones de carga que se debe a que mecanismo se acomoda producto de la fuerza torsional que generan estas probetas excéntricas. Cuando sucede esto, la carga se retoma rápidamente manteniendo la pendiente de la curva previa a la disminución de carga, lo que significa que no afecta en las mediciones registradas.

En la Tabla 6-11 se muestran los valores de carga a la cual se produjo la rotura y el promedio de cada tipo de perforación.

Tabla 6-11 Cargas máximas según probetas del Ensayo IV

Perforación	Carga máxima [tonf]			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Plasma HD	12.486	12.128	12.276	12.279
Plasma SD	12.633	12.643	12.054	12.443
Punzonado	12.204	13.756	12.117	12.693
Taladrado	12.811	12.105	13.317	12.745

Utilizando estos datos y medidas de tendencia central se determina la homogeneidad que presentan los datos para este ensayo. Al igual que el ensayo anterior se usó el coeficiente de variación y se consideró como criterio que este valor no supere el 5%.

Tabla 6-12 Medidas de tendencia central y coeficiente de variación para Ensayo IV

σ [tonf]	0.534
$\bar{x}$ [tonf]	12.545
$CV * 100$	4.26%

El coeficiente de variación para este ensayo es inferior a 5% por lo que todos los ensayos que utilizaron pernos de 5/8" poseen un comportamiento uniforme a pesar de que las perforaciones de la conexión se realizaron con distintos métodos

En la Figura 6-11 se muestran los valores máximos de carga que se obtuvo en cada probeta, los que representan las cargas de rupturas. A modo de comparación se incorpora el promedio de las cargas máximas registradas, la resistencia nominal para el tipo de probeta específica y la resistencia certificada del perno utilizado en esta probeta. La resistencia nominal se calculó previamente y se encuentra en la Tabla 6-13.

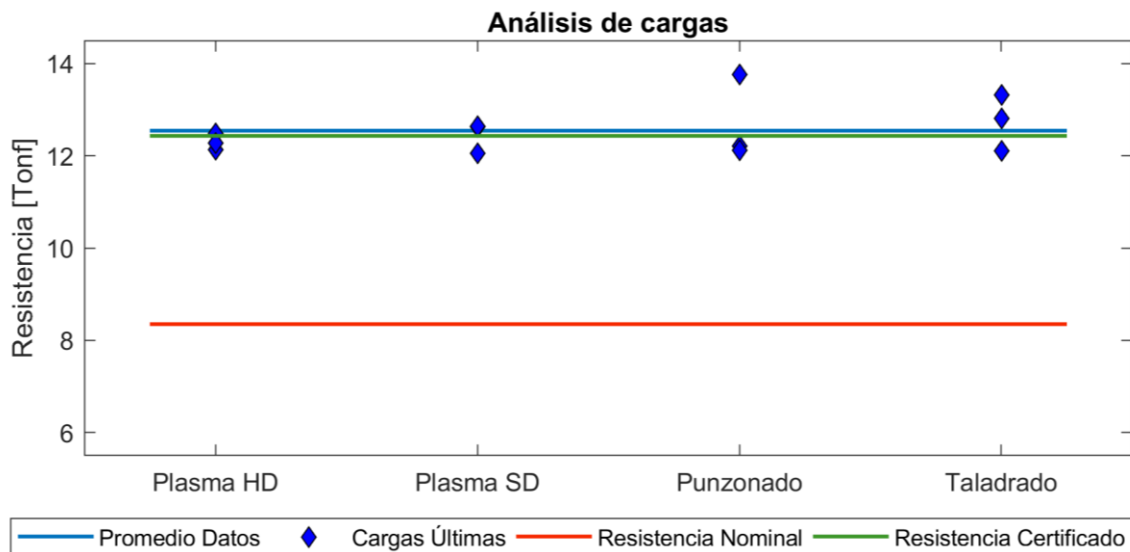


Figura 6-11 Gráfico de comparación de resistencias según método de perforación en Ensayo IV

Tabla 6-13 Valores comparativos de resistencia de Ensayo IV

Resistencia Promedio de datos [Tonf]	12.545
Resistencia nominal [Tonf]	8.350
Resistencia certificado [Tonf]	12.432

A partir estos datos es posible determinar que para este modo de falla, las probetas presentan en promedio una resistencia superior a la nominal cercana al 50.2%. Además, el error entre la resistencia promedio y la calculada a partir de la certificación es de 0,9%.

6.5. ENSAYO V: “RUPTURA DEL ÁREA NETA CON PERNO DE 3/4 [PULG]”

El modo de falla de este ensayo es por fractura de área de neta al igual que el ensayo I pero con la diferencia de que el perno utilizado es de 3/4” y por lo tanto, su perforación tiene mayor diámetro. A continuación se presenta el gráfico de carga vs deformación para las tres probetas realizadas con cada tipo de perforación:

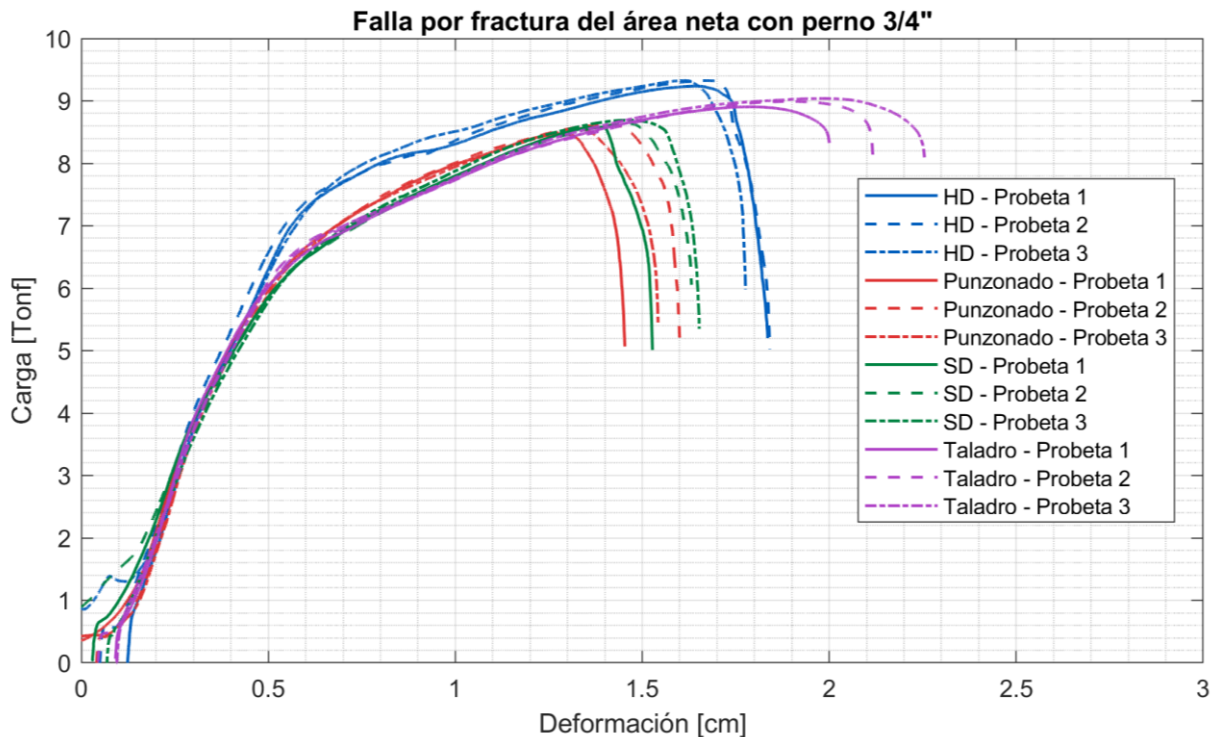


Figura 6-12 Gráfico de carga vs deformación de todas las probetas utilizadas en el Ensayo V

Se observa que entre la carga máxima y el punto de falla de las probetas existe una disminución de carga que ocurre en un pequeño intervalo de deformación por lo que el modo de falla puede clasificarse como frágil tal como se esperaba. Por otro lado, las curvas mantienen el mismo patrón entre sí, ocurriendo las cargas máximas en rangos y valores similares de carga. La Tabla 6-14 muestra los valores de carga a la cual se produjo la rotura y el promedio para cada tipo de perforación.

Tabla 6-14 Cargas máximas según probetas del Ensayo V

Perforación	Carga máxima [tonf]			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Plasma HD	9.237	9.326	9.327	9.297
Plasma SD	8.579	8.637	8.692	8.636
Punzonado	8.473	8.613	8.561	8.549
Taladrado	8.905	8.993	9.040	8.979

Luego, se analiza la dispersión de los datos obtenidos utilizando el coeficiente de variación manteniendo el criterio donde este valor no supere el 5%.

Tabla 6-15 Medidas de tendencia central y coeficiente de variación para Ensayo V

σ [tonf]	0.314
$\bar{x}$ [tonf]	8.865
$CV * 100$	3.54%

La homogeneidad de datos se mantiene tal como ha ocurrido en los ensayos previos dado que el coeficiente de variación sigue siendo menor a 5%.

En la Figura 6-13 se muestran los valores máximos de carga que se obtuvo en cada probeta, los que representan las cargas de rupturas. El promedio de las cargas máximas calculado se incorpora para compararlo con la resistencia nominal y la resistencia certificada de la plancha utilizada en esta probeta. La resistencia nominal se calculó previamente mientras que la resistencia certificada en el Capítulo 5.

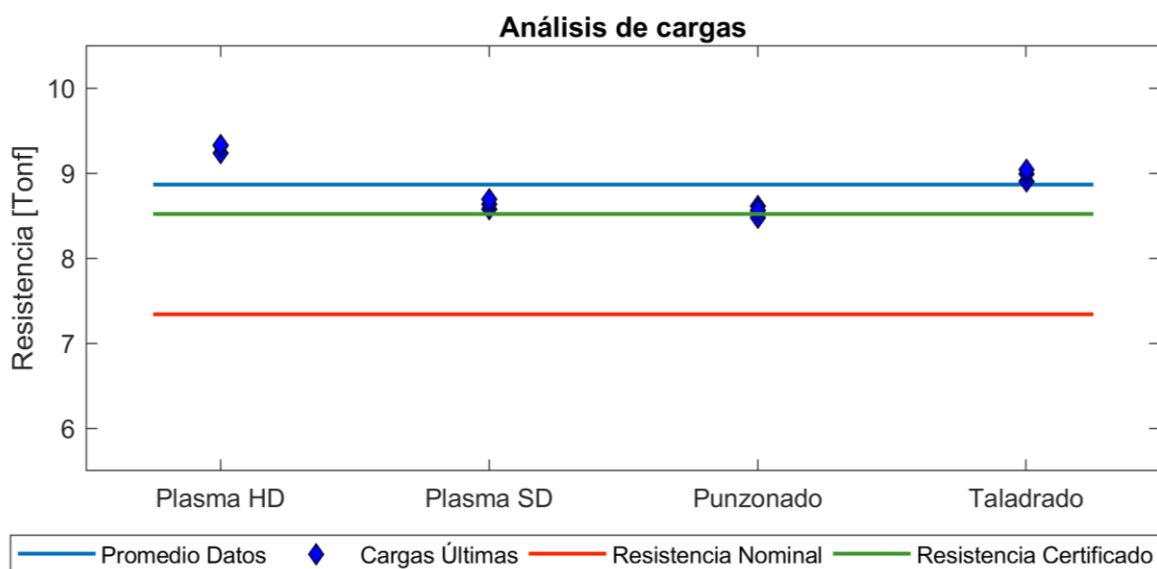


Figura 6-13 Gráfico de comparación de resistencias según método de perforación en Ensayo V

Tabla 6-16 Valores comparativos de resistencia de Ensayo V

Resistencia Promedio de datos [Tonf]	8.865
Resistencia nominal [Tonf]	7.340
Resistencia certificado [Tonf]	8.519

A partir de estos datos es posible determinar que para este modo de falla, las probetas presentan en promedio una resistencia superior a la nominal cercana al 20.8%. Además, la resistencia del promedio de las cargas máximas experimentales se aproxima bastante a la calculada por certificación, presentando una variación del 4.1%.

Al obtener en este ensayo una resistencia similar a los ensayos I y II, se utilizará el mismo criterio para determinar y comparar la deformación de las probetas, es decir, se toma como medida inicial la deformación en donde la carga es igual a 2 [Tonf] y como medida final la deformación en donde la carga es máxima.

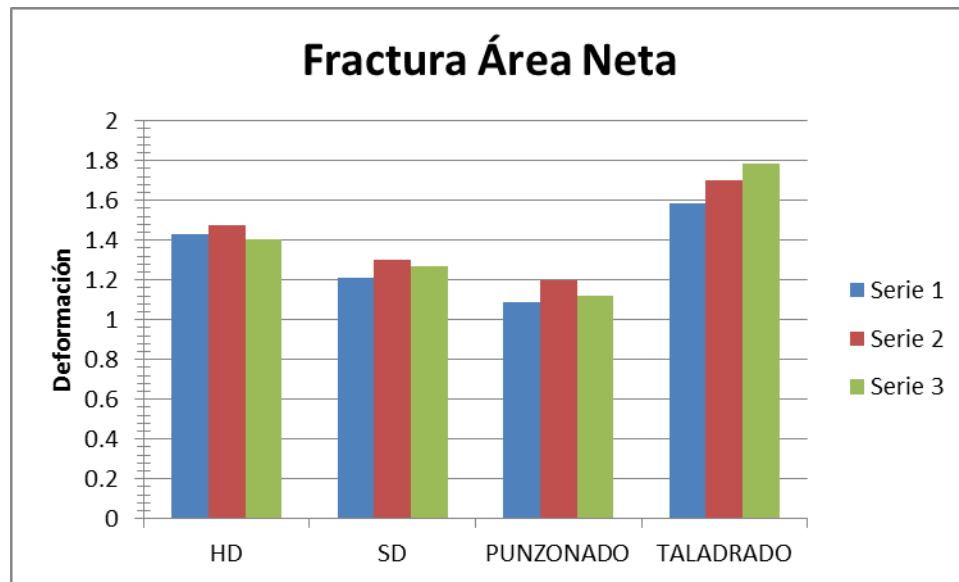


Figura 6-14 Gráfico de comparación de deformaciones [cm] Ensayo V

Se puede observar que las probetas perforadas con taladro nuevamente presentan mayor ductilidad que el resto de las probetas. El comportamiento de este ensayo presenta el mismo patrón que el del Ensayo I, donde la deformación la posee la probeta perforada con taladro seguida por plasma de alta definición, plasmas de definición estándar y finalmente punzonado.

6.6. ENSAYO VI: “APLASTAMIENTO CON PERNO DE 3/4 [PULG]”

En este sexto ensayo el modo de falla es por aplastamiento utilizando un perno de 3/4". A continuación se presenta el gráfico de carga vs deformación para las tres probetas realizadas con cada tipo de perforación:

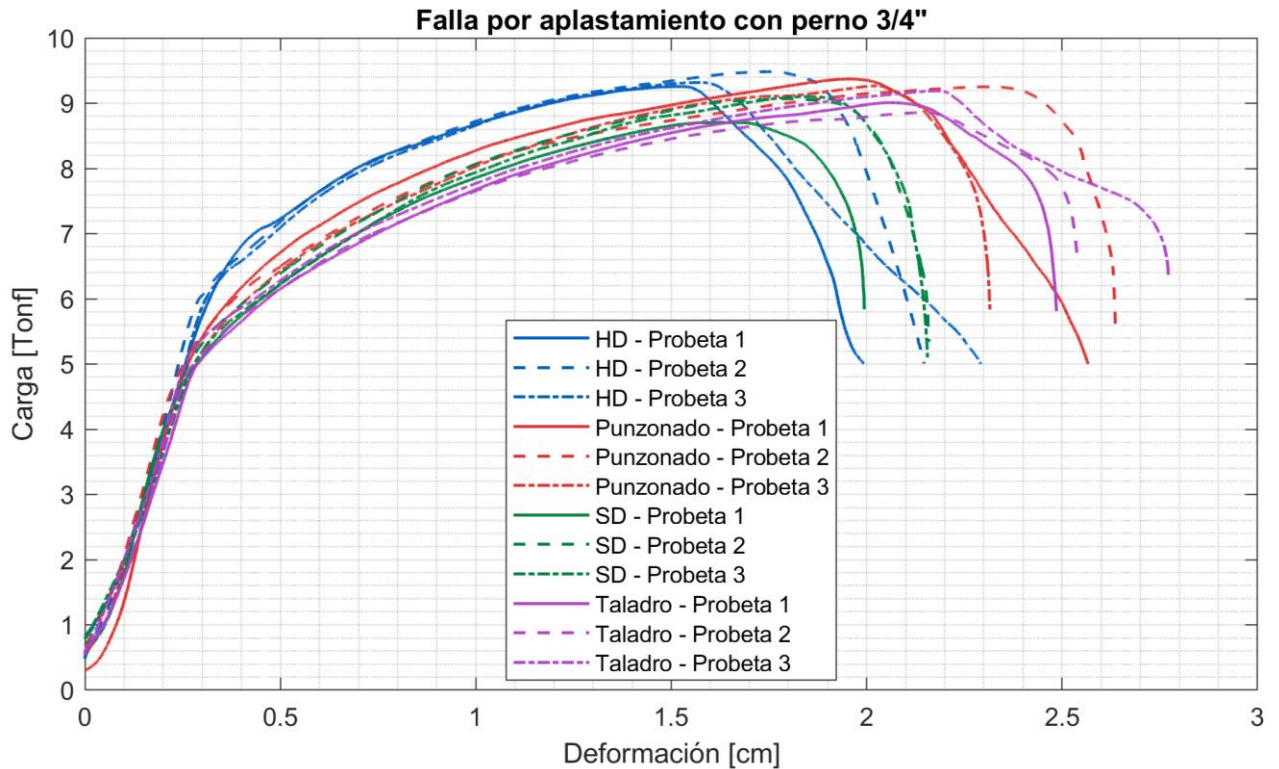


Figura 6-15 Gráfico de carga vs deformación de todas las probetas utilizadas en el Ensayo VI

Las fallas ocurridas en este ensayo muestran un comportamiento dúctil donde sus probetas no presentaban fallas repentinas. Se aprecia que para los distintos tipos de perforaciones, las cargas máximas ocurren en valores similares de carga al igual que los ensayos anteriores. En la Tabla 6-17 se muestran los valores de carga a la cual se produjo la rotura y el promedio de cada tipo de perforación.

Tabla 6-17 Cargas máximas según probetas del Ensayo VI

Perforación	Carga máxima [tonf]			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Plasma HD	9.257	9.485	9.318	9.353
Plasma SD	8.707	9.069	9.104	8.960
Punzonado	9.372	9.252	9.268	9.297
Taladrado	9.009	8.858	9.189	9.019

Utilizando estos datos y medidas de tendencia central se determina la homogeneidad que presentan los datos para este ensayo. Al igual que el ensayo anterior se usó el coeficiente de variación y se consideró como criterio que este valor no supere el 5%.

Tabla 6-18 Medidas de tendencia central y coeficiente de variación para Ensayo VI

σ [tonf]	0.267
$\bar{x}$ [tonf]	9.157
$CV * 100$	2.41%

El coeficiente de variación para este ensayo es menor al valor límite por lo que posee un comportamiento homogéneo.

En la Figura 6-16 se muestran los valores máximos de carga que se obtuvo en cada probeta, los que representan las cargas de rupturas. A modo de comparación se incorpora el promedio de las cargas máximas registradas, la resistencia nominal para el tipo de probeta específica y la resistencia certificada de la plancha utilizada en esta probeta. La resistencia nominal se calculó previamente en el Capítulo 5.

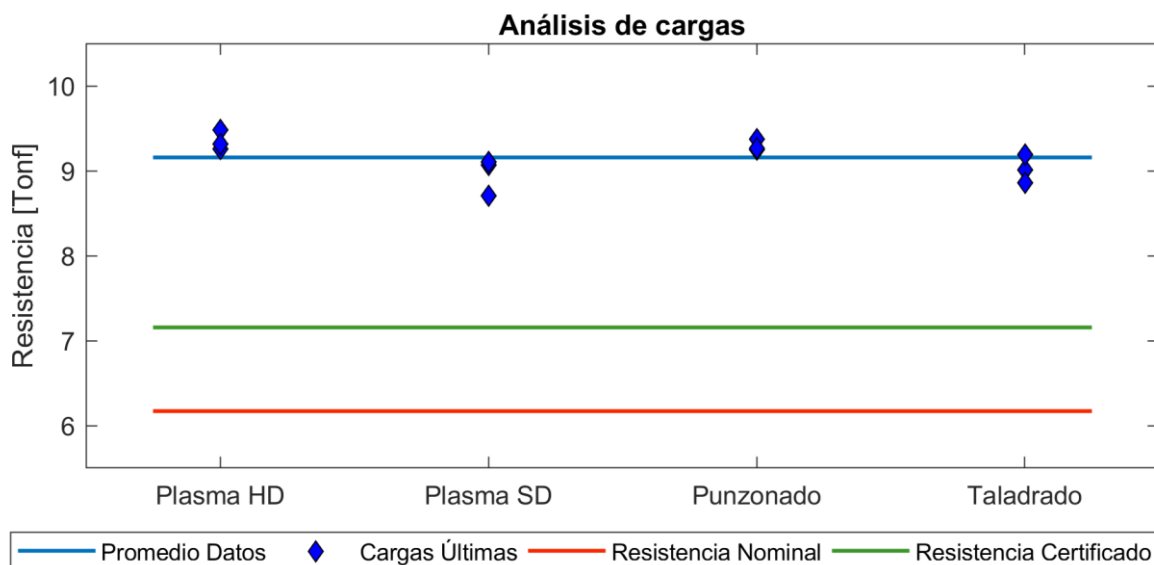


Figura 6-16 Gráfico de comparación de resistencias según método de perforación en Ensayo VI

Tabla 6-19 Valores comparativos de resistencia de Ensayo VI

Resistencia Promedio de datos [Tonf]	9.157
Resistencia nominal [Tonf]	6.166
Resistencia certificado [Tonf]	7.156

A partir de estos datos se observa que para este modo de falla, las probetas presentan una sobrerresistencia promedio sobre la resistencia nominal aproximadamente de 48.5%. Además, el error entre la resistencia promedio y la calculada a partir de la certificación es de 27.9%. El efecto que produce esta gran variación porcentual se detalla en el ensayo II, ya que ambos ensayos presentan el mismo comportamiento.

La Figura 6-17 muestra la deformación de cada probeta agrupada según el tipo de perforación las que fueron calculadas utilizando el mismo criterio que los ensayos anteriores.

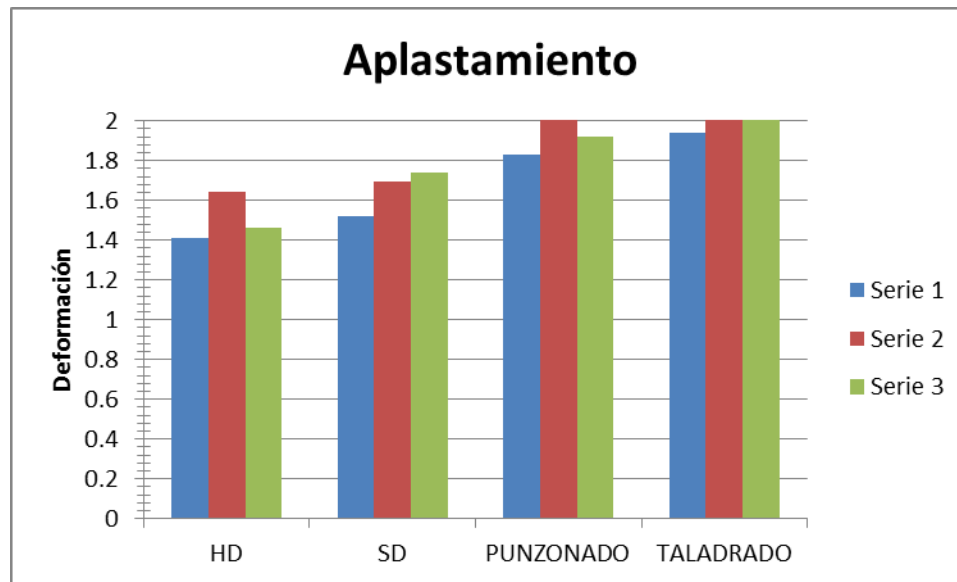


Figura 6-17 Gráfico de comparación de deformaciones Ensayo VI

El comportamiento para este ensayo se asemeja a lo ocurrido en con el ensayo II donde las probetas con perforaciones realizadas con plasma poseen menor deformación. Además, las probetas perforadas con taladro nuevamente presentan mayor ductilidad que el resto de las probetas.

6.7. ENSAYO VII: “CORTE DEL PERNO HILO INCLUIDO CON PERNO DE $\frac{3}{4}$ [PULG]”

El séptimo y último ensayo corresponde a la fractura del perno por cizalle con el hilo incluido del plano de corte utilizando un perno de $\frac{3}{4}$ ". A continuación se presenta el gráfico de carga vs deformación para las tres probetas realizadas con cada tipo de perforación hasta la falla del perno:

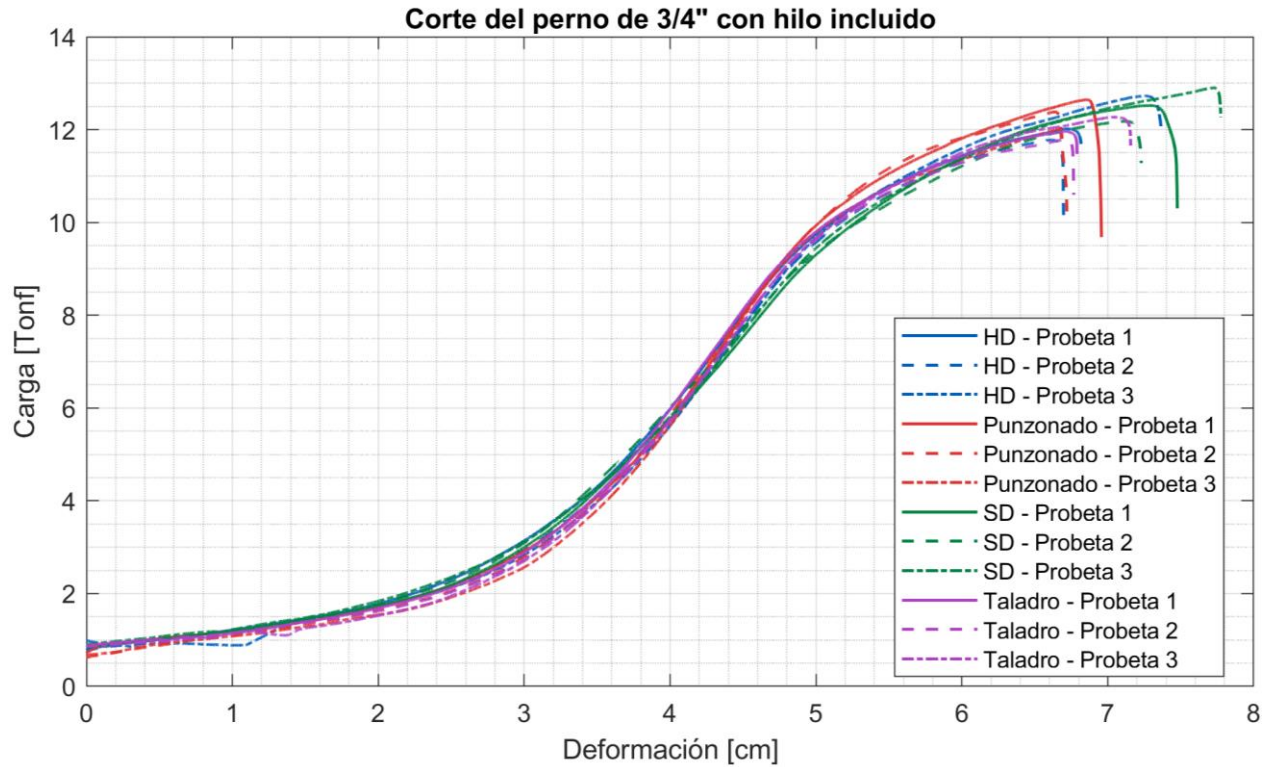


Figura 6-18 Gráfico de carga vs deformación de todas las probetas utilizadas en el Ensayo III

En este ensayo se observó el mismo comportamiento que los ensayos III y IV en donde las falla por corte de los pernos ocurrían de manera muy frágil. Además, las curvas registradas tienen un comportamiento bastante uniforme, variando solo la carga máxima con que fallan.

En la Tabla 6-20 se muestran los valores de carga a la cual se produjo la rotura y el promedio para cada tipo de perforación.

Tabla 6-20 Cargas máximas según probetas del Ensayo VII

Perforación	Carga máxima [tonf]			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Plasma HD	12.014	11.777	12.726	12.172
Plasma SD	12.521	12.178	12.902	12.534
Punzonado	12.643	12.381	12.013	12.346
Taladrado	11.961	11.780	12.269	12.003

Utilizando estos datos y medidas de tendencia central se determina la homogeneidad que presentan los datos para este ensayo. El criterio utilizado es el mismo que en todos los ensayos anteriores.

Tabla 6-21 Medidas de tendencia central y coeficiente de variación para Ensayo VII

σ [tonf]	0.374
$\bar{x}$ [tonf]	12.264
$CV * 100$	3.05%

Esto significa que existe una variación de 3% entre el conjunto de datos lo que suficientemente pequeña para considerar que la muestra es homogénea.

En la Figura 6-19 se muestran los valores máximos de carga que se obtuvo en cada probeta, los que representan las cargas de rupturas. A modo de comparación se incorpora el promedio de las cargas máximas registradas, la resistencia nominal para el tipo de probeta específica y la resistencia certificada del perno utilizado en esta probeta.

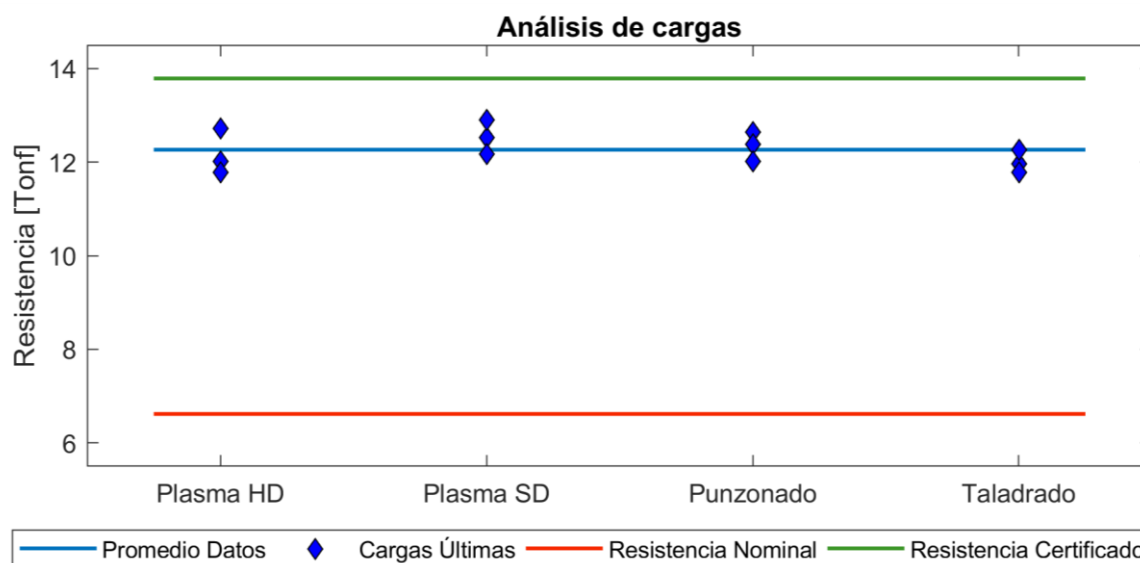


Figura 6-19 Gráfico de comparación de resistencias según método de perforación en Ensayo VII

Tabla 6-22 Valores comparativos de resistencia de Ensayo VII

Resistencia Promedio de datos [Tonf]	12.264
Resistencia nominal [Tonf]	9.619
Resistencia certificado [Tonf]	13.787

A partir de estos datos se observa que para este modo de falla, las probetas presentan en promedio una sobrerresistencia aproximadamente de 27.5% sobre la resistencia nominal. Además, el error entre la resistencia promedio y la calculada a partir de la certificación es de 11.0%. Al igual que en el ensayo III, este error no despreciable de resistencias se debe a que la AISC360-10 incorpora una reducción de 20% en el esfuerzo de corte para el caso en que el hilo se encuentra incluido en el plano de corte, que debiese ser equivalente con la reducción de área de la sección del perno sin hilo a la sección con hilo. Mediante un pie de metro se determina el diámetro para ambos casos para un perno de 3/4".

Tabla 6-23 Sección transversal pernos de 3/4"

<i>Condición del hilo</i>	<i>diámetro [cm]</i>	<i>Área [cm²]</i>
<i>Incluido</i>	1.590	1.986
<i>Excluido</i>	1.905	2.850

El cociente entre el área con hilo incluido y el área con hilo excluido del perno es igual a 0.697, lo que significa que la real reducción de área y por tanto de resistencia es de 30.3% que contrasta con el 20% de reducción de la AISC360-10. La diferencia entre estos valores es igual a 10.3% que es prácticamente igual al error de 11.0%.

Las deformaciones para las probetas de los ensayos en que ocupa el mecanismo, no se analizarán debido a que la utilización de éste produce un mayor error en la medición.

6.8. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Con el propósito de comparar y contrastar los datos obtenidos en los siete ensayos, la Tabla 6-24 muestra de forma resumida los antecedentes y resultados que fueron presentados en este capítulo:

Tabla 6-24 Resumen de resultados de los siete ensayos

Ensayo	Diámetro del perno [pulg]	Espesor Placa [mm]	Geometría: distancia desde el centro del agujero al borde		Tipo de Falla	Resistencia [Tonf]			Error [%]	CV [%]
			Paralelo a la fuerza [mm]	Perpendicular a la fuerza [mm]		Promedio de dato	Nominal	Admisible	Respecto a la nominal	
I	5/8	6	40.50	24.50	Ruptura área neta	9.453	7.585	3.7925	24.6	2.87
II	5/8	6	30.50	35.50	Aplastamiento	9.342	6.312	3.156	48.0	1.77
III	5/8	10	40.50	35.50	Corte del Perno HI	8.918	6.68	3.34	33.5	5.44
IV	5/8	10	40.50	35.50	Corte del Perno HE	12.545	8.35	4.175	50.2	4.26
V	3/4	6	41.50	25.50	Ruptura área neta	8.865	7.34	3.67	20.8	3.54
VI	3/4	6	31.50	36.50	Aplastamiento	9.157	6.166	3.083	48.5	2.41
VII	3/4	12	45.50	35.50	Corte del Perno HI	12.264	9.619	4.8095	27.5	3.05

A partir de estos datos como también de los gráficos obtenidos en cada ensayo, es posible señalar que:

- En los ensayos I y V donde se indujo la ruptura del área neta utilizando pernos de 5/8" y 3/4" respectivamente, se observó que las probetas con perforaciones realizadas con plasma de alta definición, son las que mayor carga resistieron en promedio, seguida por las perforadas con taladro.

Ahora bien, el coeficiente de variación considerando todas las cargas máximas es de 2.87% y 3.54% respectivamente, por lo que el conjunto de probetas presentan un comportamiento más bien homogéneo para cada ensayo, independiente del método de perforación.

En promedio, las resistencias obtenidas experimentalmente presentan una sobrerresistencia mayor al 20% respecto a la resistencia nominal, lo que significa que el diseño se realiza con gran holgura ya que este valor no incluye factores de reducción. Además, el error respecto a la resistencia calculada a partir del certificado de calidad es menor al 5% en ambos ensayos, lo que corrobora que la calidad del material es la indicada.

En general, las probetas de los ensayos I y V, presentan un comportamiento levemente más dúctil cuando son perforadas con taladro, seguido por las probetas realizadas con plasma de alta definición.

- Para los ensayos II y VI donde se indujo la falla por aplastamiento utilizando pernos de 5/8" y 3/4" respectivamente, el coeficiente de variación obtenido de las cargas máximas es de 1.77% y 2.41% respectivamente, presentando gran similitud entre las resistencias de las probetas con distintos métodos de perforado. De estos datos se desprende que los métodos térmicos utilizados alcanzan prácticamente el mismo desempeño que el punzonado o el taladrado.

Las probetas de ambos ensayos presentan una sobrerresistencia aproximada de 48% respecto a la resistencia nominal, un error de 20.9% para el ensayo en que se utilizó el perno de 5/8" y 27.9% para el ensayo con pernos de 3/4" respecto a la resistencia calculada a partir del certificado de calidad. Estos errores tan grandes se deben a que inicialmente la falla ocurre por aplastamiento produciendo la deformación de la placa, mientras que el destaje del miembro se debe a la falla por corte.

La falla por aplastamiento se comporta de manera bastante menos frágil que en el resto de los ensayos, produciéndose el destaje de la probeta en forma paulatina.

- Con relación al ensayo IV donde se indujo la falla por corte del perno de 5/8" con el hilo excluido, el coeficiente de variación obtenido de las cargas máximas es de 4.26%, demostrando homogeneidad en el conjunto de datos. Además, el promedio de las resistencias experimentales supera en 50.3% a la resistencia nominal. Por otra parte, el error respecto a la resistencia de la certificación es tan solo de 0.9% lo que significa que el grupo de pernos ensayados se comportó en la práctica de la misma manera que el grupo de pernos certificados.
- En los ensayos en que ocurre la falla del perno con el hilo incluido en el plano de corte, se observa similitud en la resistencia de las probetas, independiente del método de perforación. Esto se ve reflejado en el coeficiente de variación de las resistencia que es de 5.44% y 3.05% para los ensayos III y VII respectivamente.

La sobrerresistencia que presentaron los ensayos III y VII es de 33.5% y 27.5% respectivamente, siendo los porcentajes de menor sobrerresistencia en los todos

ensayos. Dado lo anterior, se presenta evidencia de que la normativa podría estar subdimensionando la resistencia a corte de pernos con el hilo incluido en el plano corte comparado con la resistencia a corte de pernos con el hilo excluido del plano corte, pues la sobrerresistencia respecto a la resistencia nominal es aproximadamente 30% y 50% respectivamente.

Por otro lado, el error entre la resistencia promedio y la calculada a partir de la certificación en los ensayos III y VII es de 10.3% y 11.0% para cada ensayo. Si bien estos errores no son muy grandes, no se condicen con el coeficiente de variación que presenta cada ensayo, ni tampoco con los resultados del ensayo en que se indujo la falla por corte del perno de 5/8" con el hilo excluido que presenta un error del 0.9%. La RCSC menciona que el estudio realizado por Frank y Yura, 1981, concluye que la reducción de resistencia a corte de un perno con hilo incluido y excluido es proporcional al cuociente entre sus área transversales que es aproximadamente 0.8. Pero los cuocientes entre las áreas reales de los pernos de 5/8" y 3/4" son aproximadamente 0.7. Esta diferencia de 10% podría representar el error calculado en ambos ensayos.

- De forma general se puede decir que no existe evidencia que demuestre que el comportamiento de conexiones perforadas con plasmas presentan un desempeño desfavorable a las realizadas de forma mecánica.

6.9. RECOMENDACIONES

A lo largo de este estudio surgieron situaciones en las que se debe tener especial cuidado y precaución, de manera que no existan inconvenientes en la realización de los ensayos y que los resultados sean lo más cercano a la realidad.

Antes de cada ensayo se debe verificar que las dimensiones de las placas sean las que se señalan. Si una placa no cumple con las dimensiones o la posición de la perforación, se deberá rechazar no sólo esa placa, sino que el conjunto con que se realizará un ensayo en específico, ya que como se mencionó anteriormente, todas deben provenir de una misma plancha.

Se debe utilizar el juego de mordazas adecuado dependiendo del espesor que se desea sujetar, ya sea el mecanismo o directamente las probetas.

Previo al montaje de las probetas en el aparato experimental, se debe mantener alineadas las placas al apretarlas con las mordazas, para que estas trabajen paralelamente a la fuerza aplicada.

Cada vez que se coloque un pasador, éste debe asegurarse con chavetas “R” en cada extremo, para que el pasador no se salga de la conexión.

Previo a cada ensayo, se recomienda verificar los datos de entrada del software y utilizar al menos una probeta de prueba para comprobar que el ensayo se realizará de acuerdo a lo esperado. Dado lo anterior, se debe considerar dentro de la fabricación, placas adicionales de prueba.

Al utilizar la máquina MTS, considerar una holgura suficiente de forma de no trabajar al límite de la capacidad de aparato experimental debido a que podría sufrir desperfectos que imposibilitarían su utilización posterior.

Por último, cada vez que se realicen ensayos que utilizan un acero en específico, es muy importante solicitar los certificados de calidad, ya que estos muestran las características reales del material que servirán para el análisis posterior de los resultados.

Capítulo 7

CONCLUSIONES FINALES

Durante el desarrollo de este trabajo se llevaron a cabo siete tipos de ensayos, en los cuales se indujo diferentes modos de falla. Para esto fue necesario variar la geometría y espesor de las probetas pero manteniendo las propiedades de los materiales. Para placas se utilizó acero A36 y para pernos acero A325. En los cuatro primeros ensayos, se ocupó pernos de diámetro 5/8" mientras que en los tres últimos se utilizó pernos de 3/4". Los modos de falla de los ensayos fueron la fractura de área neta, aplastamiento y la falla por corte del perno con el hilo incluido en el plano y con el hilo excluido de plano de corte.

Para los ensayos en que se indujo la falla por fractura del área neta independiente del perno utilizado, el coeficiente de variación no superó el 3.6%, lo que significa que el conjunto de probetas presentó un comportamiento homogéneo, independiente del método de perforación.

Por otro lado, los ensayos en que se indujo la falla por aplastamiento, independiente del perno utilizado, el coeficiente de variación no superó el 2.5%, por lo que también es posible concluir que el conjunto de probetas se comportó de manera bastante homogénea, independiente del método de perforación utilizado.

Los coeficientes de variación más grande se dieron en los ensayos en que se indujo la falla por corte del perno, específicamente, utilizando el perno de 5/8" con hilo incluido en el plano de corte. Esto puede producirse debido a que no existe completa certeza de que efectivamente todos los pernos utilizados en cada ensayo provenga de una misma colada y que por lo tanto posean resistencias similares. Esto se contrasta con los otros ensayos en que falla la placa puesto que si fueron cortadas de una misma plancha.

Considerando los siete tipos de ensayos, el tipo de falla que presenta una mayor sobrerresistencia es la falla por corte del perno. Esto se debe a que es una falla sumamente frágil y la forma de evitar que suceda es darle mayor holgura respecto a su resistencia nominal. Por otra parte, el tipo de falla que presenta una menor sobrerresistencia es la fractura del área neta, que ocurre de forma bastante más dúctil y con menor violencia.

En general, las probetas con perforaciones realizadas con plasma de definición estándar pueden presentar imperfecciones e irregularidades en la geometría que podrían resultar en una disminución de su resistencia.

Si bien los resultados de todos los ensayos demuestran que existe poca variación entre los distintos métodos, se observó que de manera particular las probetas realizadas con plasma de alta definición y taladrado presentaron resistencias experimentales promedios más altas.

En cuanto a deformaciones es posible señalar que si bien no se utilizó un método exacto para realizar la mediciones, las entregadas por la máquina MTS son una aproximación bastante cercana donde se pudo observar que las probetas en que se realizó el agujero con taladro para los ensayos en que la falla inducida fue fractura del área neta y aplastamiento, presentaron mayor ductilidad que el resto. Utilizando los otros métodos de perforación, las deformaciones observadas no presentan mayor variación entre si.

La microestructura generada por los diferentes métodos de perforación no parece influir en la resistencia de las probetas al utilizar cargas estáticas.

Adicionalmente, el mecanismo de amplificación de fuerza es de gran utilidad para casos en que el aparato experimental no tenga la capacidad de carga requerida, pero presenta la desventaja de que se dificulta la medición de las deformaciones reales, y que por su deformación elástica acumula gran cantidad de energía, que cuando se libera el espécimen, la probeta fallará de forma muy violenta.

En conclusión, dada la poca variación de la resistencia experimental entre los cuatro métodos de perforado registrados en cada ensayo, se presentó evidencia que la utilización de plasma de alta definición en perforaciones de conexiones posee un desempeño similar a las perforaciones con taladro y punzonado pues no se observó diferencia significativa en la resistencia al utilizar los distintos métodos de perforado.

Finalmente, cabe mencionar que parte de los ensayos y resultados obtenidos en este trabajo de título fueron acogidos por el comité encargado de la actualización de la NCh428 – “Estructuras de acero - Ejecución de construcciones de acero – Parte 1: Perfiles laminados, soldados y tubos”.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de normalizacion (1957) INN. "Ejecución de Estructuras de Acero" NCh428.of57. Santiago de Chile.
- [2] Sergio Cicero, Antonio Martín-Meizoso, Andrzej Klimpel, Javier Aldazabal (2015) "Fatigue Performance of Thermally Cut Bolt Holes in Structural Steel S460M", ResearchGate, Noviembre 2015.
- [3] Tiberio García, Sergio Cicero (2016) "Definition and validation of Eurocode 3 FAT classes for structural steels containing oxy-fuel, plasma and laser cut holes" , ResearchGate, International Journal of Fatigue, Junio 2016.
- [4] Instituto Nacional de normalizacion (2017) INN. "Ejecución de Estructuras de Acero - Parte 1: Perfiles laminados, soldados y tubos" NCh428.of2017. Santiago de Chile, Septiembre 2017.
- [5] <<Grandes Estructuras de Acero para Industrias, Gigantes de Metal>> [En línea] industria<http://biblioteca.cchc.cl/datafiles/23648-2.pdf>
- [6] Standard Specification for Carbon Structural Steel (2014), ASTM A36/A36M-14.
- [7] Standard Specification for Structural Bolts (2014), ASTM A325-14.
- [8] The American Society of Mechanical Engineers (2003), " Unified Inch Screw Threads, UN and UNR Thread Form" ANSI/ASME B1.1.
- [9] AMERICAN Institute of Steel Construction AISC (2010), "Specification for structural steel buildings", AISC360-10, EEUU.
- [10] <<Diferentes tipos de brocas>> [En línea] <http://juancarlos-cnc.blogspot.com/2012/06/diferentes-tipos-debrocas.html>
- [11] <<Procesos de corte: Punzonado>> [En línea] <https://procesosdecorte.weebly.com/punzonado.html>
- [12] << Comparación de tecnologías de corte térmico mecanizado >> [En línea] <http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/comparacion-de-tecnologias-de-corte-termico-mecanizado>
- [13] <<Proceso de oxicorte>> [En línea] <http://www.gestiondecompras.com/es/productos/conformado-de-chapa/oxicorte>
- [14] <<Corte por Laser>> [En línea] <http://www.rofin.es/es/aplicaciones-laser/corte-laser/>
- [15] <<Tipos de plasma>> [En línea] <https://www.hypertherm.com/es/learn/cutting-education/plasma-technology/types-of-plasma/?region=SART>

- [16] Instituto Nacional de normalizacion (2009) INN. "Diseño Sísmico de Edificios" NCh433.Of96Mod2009. Santiago de Chile.
- [17] Research Council on Structural Connections (RCSC) (2014), "Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts", Chicago, Illinois, Agosto 2014.
- [18] The American Society of Mechanical Engineers (2009), "Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)" ASME B46.1.
- [19] << Modos de falla de unión apertada >> [En línea]
http://www.learneasy.info/MDME/MEMmods/MEM30006A/Bolted_Joints/Bolted_Joints.html
- [20] BSI (British Standards Institution). (2002). "Thermal cutting: Classification of thermal cuts. Geometrical product specification and quality tolerances." BS EN ISO 9013, London
- [21] James J. Wallaert, John W. Fisher (1964), "Shear strength of high-strength bolts", Fritz Laboratory Reports, Preserve Lehigh. Julio 1964.
- [22] <<Catálogo Sack, 2015>> [En línea]
http://www.sack.cl/files/Catalogo_Sack_2015.pdf
- [23] AMERICAN Institute of Steel Construction AISC, "Design examples Version 13.1", EEUU, 2011.
- [24] << MTS Model 407 Controller – Introduction and Trouble Shooting Information>> (2011) [En línea]
https://wiki.cecs.pdx.edu/pub/IstarWeb/407Controller/MTS_Model_407_Controller_Overview.pdf
- [25] Instituto Nacional de normalizacion (1972) INN. "Productos metalicos - Ensayo a Tracción" NCh200.of72. Santiago de Chile.
- [26] K. H. Frank, J. A. Yura (1981), "An experimental study of bolted shear connections", Springfield, VA, Diciembre 1981.
- [27] Sofia Teixeira de Freitas (2005), " Experimental research project on bolted connections in bearing for high strength steel", ResearchGate, Junio 2005.
- [28] Rogers, C., Hancock, G (2000)., "Failure Modes of Bolted-Sheet-Steel Connections Loaded in Shear", Journal of Structural Engineering, Marzo 2000.

ANEXOS

ANEXO A : CERTIFICADOS

A.1. CERTIFICADO DE CALIDAD DE PERNOS PARA ENSAYOS I Y II

TEST CERTIFICATE CONFORMING TO BS EN 10204: 1991 3.1B
Raw material supplied by SHANDONG JUNRNG SPECIAL STEEL WORKS CO., LTDA.

CLIENTE:	AMCS LTDA	ORDER N°:	210.718E
FECHA:	28-04-2017	LOT N°:	942004920
N° ORDEN:	M-5952	MATERIAL:	AISI 1035
N° FACTURA:		HEAT N°:	942004920
N° GUIA:	106637	FINISH:	BLACK
SPECIFICATION:	ASTM A-325 HEAVY HEX BOLTS	QTY:	28 PCS
MEDIDA:	5/8-11 X 1.3/4		

CHEMICAL ANALYSIS

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo
%	0.34	0.72	0.014	0.007	0.16	0.04	0.05	0.15	

MECHANICAL PROPERTIES

Test Item	Test Method	Standard	Results	Sampling	Pass
Core Hardness (HRC)	ASTM F606	25 - 34	30	3	OK
Tensile Strength (KSI)	ASTM F606	120	134	1	OK
Yield load (KSI)	ASTM F606	92	114	1	OK
Elongation (%)	ASTM F606	14	16	1	OK
Reduction of Area (%)	ASTM F606	35 (min)	38	1	OK

DIMENSIONS OF SPEC

Test Item	Spec.	Inspection Results	Sampling	Remark
Width across flats (mm)	26.19 - 26.97	26.8 - 26.7	32	OK
Head Height (mm)	9.6 - 10.24	9.9 - 10	32	OK
Major diameter (mm)	15.527 - 15.834	15.70 - 15.72	32	OK
Appearance				OK

We hereby certify that all the above results are original from our actual testing, and the products have proved to comply with the relevant standards.



Leonor Robles González
Com. Pizarro y Pizarro Ltda.
Asistente de Ventas

A.2. CERTIFICADO DE CALIDAD DE PERNOS PARA ENSAYO III

TEST CERTIFICATE CONFORMING TO BS EN 10204: 1991 3.1B
Raw material supplied by SHANDONG JUNRNG SPECIAL STEEL WORKS CO., LTDA.

CLIENTE:	AMCS LTDA	ORDER N°:	210.718E
FECHA:	28-04-2017	LOT N°:	942004920
N° ORDEN:	M-5952	MATERIAL:	AISI 1035
N° FACTURA:		HEAT N°:	942004920
N° GUIA:	106637	FINISH:	BLACK
SPECIFICATION:	ASTM A-325 HEAVY HEX BOLTS	QTY:	14 PCS
MEDIDA:	5/8-11 X 1.1/2		

CHEMICAL ANALYSIS

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo
%	0.34	0.72	0.014	0.007	0.16	0.04	0.05	0.15	

MECHANICAL PROPERTIES

Test Item	Test Method	Standard	Results	Sampling	Pass
Core Hardness (HRC)	ASTM F606	25 - 34	30	3	OK
Tensile Strength (KSI)	ASTM F606	120	134	1	OK
Yield load (KSI)	ASTM F606	92	114	1	OK
Elongation (%)	ASTM F606	14	16	1	OK
Reduction of Area (%)	ASTM F606	35 (min)	38	1	OK

DIMENSIONS OF SPEC

Test Item	Spec.	Inspection Results	Sampling	Remark
Width across flats (mm)	26.19 - 26.97	26.8 - 26.7	32	OK
Head Height (mm)	9.6 - 10.24	9.9 - 10	32	OK
Major diameter (mm)	15.527 - 15.834	15.70 - 15.72	32	OK
Appearance				OK

We hereby certify that all the above results are original from our actual testing, and the products have proved to comply with the relevant standards.



Leonor Robles González
 Com. Pizarro y Pizarro Ltda.
 Asistente de Ventas

A.3. CERTIFICADO DE CALIDAD DE PERNOS PARA ENSAYO IV

TEST CERTIFICATE CONFORMING TO BS EN 10204: 1991 3.1B
Raw material supplied by SHANDONG JUNRNG SPECIAL STEEL WORKS CO., LTDA.

CLIENTE:	AMCS LTDA	ORDER N°:	210.718E
FECHA:	28-04-2017	LOT N°:	942004920
N° ORDEN:	M-5952	MATERIAL:	AISI 1035
N° FACTURA:		HEAT N°:	942004920
N° GUIA:	106637	FINISH:	BLACK
SPECIFICATION:	ASTMA-325 HEAVY HEX BOLTS	QTY:	14 PCS
MEDIDA:	5/8-11 X 2		

CHEMICAL ANALYSIS

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo
%	0.34	0.72	0.014	0.007	0.16	0.04	0.05	0.15	

MECHANICAL PROPERTIES

Test Item	Test Method	Standard	Results	Sampling	Pass
Core Hardness (HRC)	ASTM F606	25 - 34	30	3	OK
Tensile Strength (KSI)	ASTM F606	120	134	1	OK
Yield load (KSI)	ASTM F606	92	114	1	OK
Elongation (%)	ASTM F606	14	16	1	OK
Reduction of Area (%)	ASTM F606	35 (min)	38	1	OK

DIMENSIONS OF SPEC

Test Item	Spec.	Inspection Results	Sampling	Remark
Width across flats (mm)	26.19 - 26.97	26.8 - 26.7	32	OK
Head Height (mm)	9.6 - 10.24	9.9 - 10	32	OK
Major diameter (mm)	15.527 - 15.834	15.70 - 15.72	32	OK
Appearance				OK

We hereby certify that all the above results are original from our actual testing, and the products have proved to comply with the relevant standards.



Leonor Robles González
 Com. Pizarro y Pizarro Ltda.
 Asistente de Ventas

A.4. CERTIFICADO DE CALIDAD DE PERNOS PARA ENSAYO VII



Certificado de Calidad.

Emitido el:
miércoles, 20 de diciembre de 2017

Según: Nota de Venta: 3321907 O. de Compra: M-6319 rev0
Razón Social del Cliente: AMCS LTDA. RUT 76033018

Se certifica, según datos entregados por el fabricante, las características mecánicas y químicas del material detallado a continuación:

Item	Código	Descripción	Material	Medida	Recubrimiento
1	001002_C_048113	P. Hexagonal	A-325	3/4-10 X 1.3/4	Negro
<u>Dureza</u>		<u>Tracción</u>	<u>Límite Elástico</u>		
27-29	HRC	125-129 Ksi.	94-96	Ksi.	
<u>%C</u>	<u>%Si</u>	<u>%Mn</u>	<u>%P</u>	<u>%B</u>	<u>%S</u>
0,360	0,170	0,710	0,015	-:-	0,013
<u>%Ni</u>	<u>%Cr</u>	<u>%Mo</u>	<u>%Cu</u>	<u>%N</u>	
-:-	-:-	-:-	-:-	-:-	

OBSERVACION OC 80606

Este documento fué emitido y validado por el Departamento de Compra: 


PATRICIO ESPINOZA M.
Product Manager
Pernos y Fijaciones

XINYU IRON & STEEL CO., LTD.

97



五矿营口中板有限责任公司
WuKong Yingkou Medium Plate Co., Ltd

产品质量证明书

INSPECTION CERTIFICATE

辽宁省营口市老边区金街

Yejin street, Laobian

district, Yingkou, Liaoning, P.R. China

115005 YINGKOU, CHINA

TEL: 0417-3256081

邮编: 115005



FAX: 0417-3256057

供货单位(SUPPLIER)	YINGKOU MIDDLE PLATE CO., LTD	产品名称(PRODUCT)	热轧钢板 Prime newly produced hot rolled Steel Plates	证书编号(CERTIFICATE NO.)	00700150020170220013
采购单位(PURCHASER)	XIN AND C HUI IMPORT AND EXPORT CO., LTD	交货状态 (DELIVERY CONDITION)	热轧 (HR)	签发日期(DATE OF ISSUE)	2017-03-13
合同号(CONTRACT NO.)	YKC1305170102289-B-01	技术要求 (SPECIFICATION)	ASTM A36/A36M	制钢(DESIGNATION)	
炉号(HEAT NO.)	17201824A	炉号(HEAT NO.)	17201824A	炉号(HEAT NO.)	17201824A

牌 号 GRADE	批 号 BATCH NO.	炉 号 HEAT NO.	规格尺寸 (mm) DIMENSION			件数 PIECES	重量 (ton) WEIGHT	拉伸试验TENSILE TEST				冲击试验 IMPACT TEST	拉伸试验 LT			TEST		
			T	W	L			屈服强度 (N/mm2)	抗拉强度 (N/mm2)	伸长率 (%)	断面收缩 (%)		尺寸 SIZE (mm2)	温度 TEMP (℃)	1		2	3
STM A36	201702250272	17201824A	8	2440	12000	3	4.137		320	465	24.5							
STM A36	201702280231	17101824A	6	2440	12000	3	4.137		300	455	23.5							
STM A36	201702280233	17101824A	6	2340	12000	6	16.274		320	465	24.5							
STM A36	201702280227	17101823A	8	2440	12000	27	37.253		305	440	26.5							
合 计 (TOTAL)							39	53.781										

批号 BATCH NO.	化学成分 CHEMICAL COMPOSITION (%)														
	C	Si	Mn	P	S	Als	Al	Cr	Ni	Co	Mo	V	TE	Sh	CEV
201702250272	0.20	0.17	0.38	0.017	0.021	0.003	0.004	0.308	0.006	0.005	0.001	0.003	0.003	0.004	0.330
201702280231	0.20	0.17	0.37	0.015	0.019	0.003	0.004	0.304	0.007	0.005	0.001	0.002	0.003	0.004	0.327
201702280233	0.20	0.17	0.37	0.015	0.019	0.003	0.004	0.304	0.007	0.005	0.001	0.002	0.003	0.004	0.327
201702280227	0.20	0.16	0.40	0.015	0.020	0.003	0.004	0.327	0.008	0.005	0.001	0.003	0.003	0.004	0.337

备注 (NOTES):	ACCORDING TO EN10204 3.1: A1+A11 ;			
	本产品已按照标准要求进行了试验和检验, 其结果符合要求, 特此证明。 WE HEREBY CERTIFY THAT MATERIAL DESCRIBED HAS MANUFACTURED AND TESTED WITH SATISFACTORY RESULTS IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE ABOVE MATERIAL SPECIFICATION.			
	签字人 OPERATOR	李阳 LI Yang	冶金技术处处长 DIRECTOR OF METALLURGICAL DEPARTMENT	从浩 Cong Hao

ANEXO B : CÁLCULOS PROBETAS

B.1. ENSAYO I: RUPTURA DEL ÁREA NETA CON PERNO DE 5/8 [PULG]

Propiedades

Placa

$F_y := 36\text{ksi}$	resistencia fluencia
$F_u := 58\text{ksi}$	resistencia última acero que conecta
$t := 6\text{mm}$	espesor de plancha que conecta

Perno

$d := \frac{5}{8}\text{in}$	diametro perno
-----------------------------	----------------

$$\Omega := 2$$

Falla Perno

Resistencia corte perno rotura
(teórica): hilo incluido

$$R_{vt} := \left(\frac{\frac{5}{8}\text{in}}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot 83\text{ksi} = 11.55\text{-tonnef}$$

Available Shear Strenght
hilo excluido (tabla 7-1)

$$r_{nv} := 9.2\text{kip} \cdot \Omega = 8.346\text{-tonnef}$$

Tabla J3.2

$$R_{nv} := \left(\frac{\frac{5}{8}\text{in}}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot 48\text{ksi} = 6.68\text{-tonnef}$$

Aplastamiento

$L_c := 3\text{cm}$	distancia desde el borde de la perforación al otro perno o borde libre
---------------------	--

$$R_{n\text{bearing}} := \min(1.2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u, 2.4d \cdot t \cdot F_u) = 8.808\text{-tonnef}$$

$$\frac{R_{n\text{bearing}}}{\Omega} = 4.404\text{-tonnef}$$

Ruptura tension en el area neta**D5.1 a**

$$b := 15.5\text{mm}$$

$$b_e := \begin{cases} (2t + 16\text{mm}) & \text{if } 2t + 16\text{mm} < b \\ b & \text{otherwise} \end{cases} = 15.5\text{-mm}$$

$$P_{nt} := F_u \cdot 2 \cdot t \cdot b_e = 7.585\text{-tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nt}}{\Omega} = 3.792\text{-tonnef}$$

Ruptura corte en el area efectiva**D5.1 b**

Distancia más pequeña
de la perforacion al borde

$$a := 30\text{mm} + 0\text{in}$$

$$A_{sf} := 2 \cdot t \cdot \left(a + \frac{d}{2} \right) = 4.552\text{-cm}^2$$

$$P_{nv} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{sf} = 11.139\text{-tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nv}}{\Omega} = 5.569\text{-tonnef}$$

Consideraciones geométricas

Ancho efectivo

$$b_e = 15.5\text{-mm}$$

$$a := 30\text{mm}$$

>

$$1.33b_e = 20.615\text{-mm}$$

$$w := 47\text{mm}$$

>

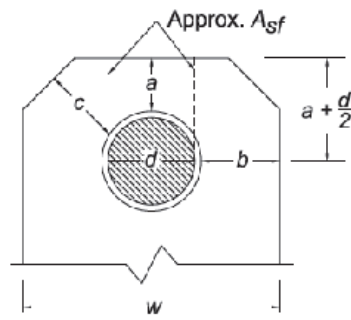
$$2 \cdot b_e + d = 46.875\text{-mm}$$

$$c := 40\text{mm}$$

>

$$a = 30\text{-mm}$$

$$a + \frac{d}{2} = 37.938\text{-mm}$$



Dimensional Requirements

$$1. a \geq 1.33 b_e$$

$$2. w \geq 2b_e + d$$

$$3. c \geq a$$

where

$$b_e = 2t + 0.63 \text{ in. (16 mm)} \leq b$$

Tipo_falla := $\left\{ \begin{array}{ll} \text{"Corte Perno"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq r_{nv} \\ \text{"Aplastamiento"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq Rn_{bearing} \\ \text{"Tracción área Neta"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq P_{nt} \\ \text{"Corte área efectiva"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq P_{nv} \end{array} \right. = \text{"Tracción área Neta"}$

B.2. ENSAYO II: APLASTAMIENTO CON PERNO DE 5/8 [PULG]

Propiedades

Placa

$F_y := 36\text{ksi}$	resistencia fluencia
$F_u := 58\text{ksi}$	resistencia última acero que conecta
$t := 6\text{mm}$	espesor de plancha que conecta

Perno

$d := \frac{5}{8}\text{in}$	diametro perno
-----------------------------	----------------

$$\Omega := 2$$

Falla Perno

Resistencia corte perno rotura (teórica): hilo incluido	$R_{vt} := \left(\frac{\frac{5}{8}\text{in}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 83\text{ksi} = 11.55\text{-tonnef}$
--	--

Available Shear Strenght hilo excluido (tabla 7-1)	$r_{nv} := 7.36\text{kip} \cdot \Omega = 6.677\text{-tonnef}$
---	---

Tabla J3.2	$R_{nv} := \left(\frac{\frac{5}{8}\text{in}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 48\text{ksi} = 6.68\text{-tonnef}$
------------	---

Aplastamiento

$L_c := 2.15\text{cm}$	distancia desde el borde de la perforación al otro perno o borde libre
------------------------	--

$$R_{n\text{bearing}} := \min(1.2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u, 2.4 \cdot d \cdot t \cdot F_u) = 6.312\text{-tonnef}$$

$$\frac{R_{n\text{bearing}}}{\Omega} = 3.156\text{-tonnef}$$

Ruptura tension en el area neta

D5.1 a

$$b := 25\text{mm}$$

$$b_e := \begin{cases} (2t + 16\text{mm}) & \text{if } 2t + 16\text{mm} < b \\ b & \text{otherwise} \end{cases} = 25\text{mm}$$

$$P_{nt} := F_u \cdot 2 \cdot t \cdot b_e = 12.233\text{-tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nt}}{\Omega} = 6.117\text{-tonnef}$$

Ruptura corte en el area efectiva

D5.1 b

Distancia más pequeña
de la perforacion al borde

$$a := 20\text{mm} + 0\text{in}$$

$$A_{sf} := 2 \cdot t \cdot \left(a + \frac{d}{2} \right) = 3.352\text{-cm}^2$$

$$P_{nv} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{sf} = 8.203\text{-tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nv}}{\Omega} = 4.101\text{-tonnef}$$

Consideraciones geométricas

Ancho efectivo		$b_e = 25\text{-mm}$
$a := 35\text{mm}$	>	$1.33b_e = 33.25\text{-mm}$
$w := 90\text{mm}$	>	$2 \cdot b_e + d = 65.875\text{-mm}$
$c := 40\text{mm}$	>	$a = 35\text{-mm}$

$$\text{Tipo_falla} := \begin{cases} \text{"Corte Perno"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq r_{nv} \\ \text{"Aplastamiento"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq Rn_{bearing} \\ \text{"Tracción área Neta"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq P_{nt} \\ \text{"Corte área efectiva"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq P_{nv} \end{cases} = \text{"Aplastamiento"}$$

B.3. ENSAYO III: CORTE DEL PERNO HILO INCLUIDO CON PERNO DE 5/8 [PULG] Y IV: CORTE DEL PERNO HILO EXCLUIDO CON PERNO DE 5/8 [PULG]

Propiedades

Placa

$F_y := 36\text{ksi}$	resistencia fluencia
$F_u := 58\text{ksi}$	resistencia última acero que conecta
$t := 10\text{mm}$	espesor de plancha que conecta

Perno

$d := \frac{5}{8}\text{in}$	diametro perno
-----------------------------	----------------

$$\Omega := 2$$

Falla Perno

Resistencia corte perno rotura
(teórica): hilo incluido

$$R_{vt} := \left(\frac{\frac{5}{8}\text{in}}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot 83\text{ksi} = 11.55 \cdot \text{tonnef}$$

Available Shear Strenght
hilo excluido (tabla 7-1)

$$r_{nv} := 7.36\text{kip} \cdot \Omega = 6.677 \cdot \text{tonnef}$$

Tabla J3.2

$$R_{nv} := \left(\frac{\frac{5}{8}\text{in}}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot 60\text{ksi} = 8.35 \cdot \text{tonnef}$$

Tabla J3.2

$$R_{nv} := \left(\frac{\frac{5}{8}\text{in}}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot 48\text{ksi} = 6.68 \cdot \text{tonnef}$$

Aplastamiento

$L_c := 2.5\text{cm}$	distancia desde el borde de la perforación al otro perno o borde libre
-----------------------	--

$$R_{nt\text{bearing}} := \min(1.2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u, 2.4d \cdot t \cdot F_u) = 12.233 \cdot \text{tonnef}$$

$$\frac{R_{nt\text{bearing}}}{\Omega} = 6.117 \cdot \text{tonnef}$$

Ruptura tension en el area neta**D5.1 a**

$$b := 25\text{mm}$$

$$b_e := \begin{cases} (2t + 16\text{mm}) & \text{if } 2t + 16\text{mm} < b \\ b & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{nt} := F_u \cdot 2 \cdot t \cdot b_e = 20.389 \cdot \text{tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nt}}{\Omega} = 10.195 \cdot \text{tonnef}$$

Ruptura corte en el area efectiva**D5.1 b**

Distancia más pequeña
de la perforacion al borde

$$a := 25\text{mm} + 0\text{in}$$

$$A_{sf} := 2 \cdot t \cdot \left(a + \frac{d}{2} \right) = 6.588 \cdot \text{cm}^2$$

$$P_{nv} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{sf} = 16.118 \cdot \text{tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nv}}{\Omega} = 8.059 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Tipo_falla} := \begin{cases} \text{"Corte Perno"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq r_{nv} \\ \text{"Aplastamiento"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq Rn_{bearing} \\ \text{"Tracción área Neta"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq P_{nt} \\ \text{"Corte área efectiva"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq P_{nv} \end{cases} = \text{"Corte Perno"}$$

B.4. ENSAYO V: RUPTURA DEL ÁREA NETA CON PERNO DE 3/4 [PULG]

Propiedades

Placa

$F_y := 36\text{ksi}$	resistencia fluencia
$F_u := 58\text{ksi}$	resistencia última acero que conecta
$t := 6\text{mm}$	espesor de plancha que conecta

Perno

$d := \frac{3}{4}\text{in}$	diametro perno
-----------------------------	----------------

$$\Omega := 2$$

Falla Perno

Resistencia corte perno rotura
(teórica): hilo incluido

$$R_{vt} := \left(\frac{\frac{3}{4}\text{in}}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot 83\text{ksi} = 16.632\text{-tonnef}$$

Available Shear Strenght
hilo excluido (tabla 7-1)

$$r_{nv} := 13.3\text{kip} \cdot \Omega = 12.066\text{-tonnef}$$

Tabla J3.2

$$R_{nv} := \left(\frac{\frac{3}{4}\text{in}}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot 60\text{ksi} = 12.023\text{-tonnef}$$

Aplastamiento

$L_c := 30\text{mm}$ distancia desde el borde de la perforación al otro perno o borde libre

$$R_{n\text{bearing}} := \min(1.2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u, 2.4d \cdot t \cdot F_u) = 8.808\text{-tonnef}$$

$$\frac{R_{n\text{bearing}}}{\Omega} = 4.404\text{-tonnef}$$

Ruptura tension en el area neta**D5.1 a**

$$b := 15\text{mm}$$

$$b_e := \begin{cases} (2t + 16\text{mm}) & \text{if } 2t + 16\text{mm} < b \\ b & \text{otherwise} \end{cases} = 15\text{mm}$$

$$P_{nt} := F_u \cdot 2 \cdot t \cdot b_e = 7.34 \cdot \text{tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nt}}{\Omega} = 3.67 \cdot \text{tonnef}$$

Ruptura corte en el area efectiva**D5.1 b**

Distancia más pequeña
de la perforacion al borde

$$a := 31.5\text{mm} + 0\text{in}$$

$$A_{sf} := 2 \cdot t \cdot \left(a + \frac{d}{2} \right) = 4.923 \cdot \text{cm}^2$$

$$P_{nv} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{sf} = 12.045 \cdot \text{tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nv}}{\Omega} = 6.023 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Tipo_falla} := \begin{cases} \text{"Corte Perno"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq r_{nv} \\ \text{"Aplastamiento"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq Rn_{bearing} \\ \text{"Tracción área Neta"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq P_{nt} \\ \text{"Corte área efectiva"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq P_{nv} \end{cases} = \text{"Tracción área Neta"}$$

B.5. ENSAYO VI: APLASTAMIENTO CON PERNO DE 3/4 [PULG]

Propiedades

Placa

$F_y := 36\text{ksi}$	resistencia fluencia
$F_u := 58\text{ksi}$	resistencia última acero que conecta
$t := 6\text{mm}$	espesor de plancha que conecta

Perno

$d := \frac{3}{4}\text{in}$	diametro perno
-----------------------------	----------------

$$\Omega := 2$$

Falla Perno

Resistencia corte perno rotura (teórica): hilo incluido	$R_{vt} := \left(\frac{\frac{3}{4}\text{in}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 83\text{ksi} = 16.632\text{-tonnef}$
--	---

Available Shear Strenght hilo excluido (tabla 7-1)	$r_{nv} := 13.3\text{kip} \cdot \Omega = 12.066\text{-tonnef}$
---	--

Tabla J3.2	$R_{nv} := \left(\frac{\frac{3}{4}\text{in}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 60\text{ksi} = 12.023\text{-tonnef}$
------------	---

Aplastamiento

$L_c := 21\text{mm}$	distancia desde el borde de la perforación al otro perno o borde libre
----------------------	--

$$R_{n_{\text{bearing}}} := \min(1.2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u, 2.4d \cdot t \cdot F_u) = 6.166\text{-tonnef}$$

$$\frac{R_{n_{\text{bearing}}}}{\Omega} = 3.083\text{-tonnef}$$

Ruptura tension en el area neta**D5.1 a**

$$b := 25\text{mm}$$

$$b_e := \begin{cases} (2t + 16\text{mm}) & \text{if } 2t + 16\text{mm} < b \\ b & \text{otherwise} \end{cases} = 25\text{mm}$$

$$P_{nt} := F_u \cdot 2 \cdot t \cdot b_e = 12.233 \cdot \text{tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nt}}{\Omega} = 6.117 \cdot \text{tonnef}$$

Ruptura corte en el area efectiva**D5.1 b**

Distancia más pequeña
de la perforacion al borde

$$a := 21.5\text{mm} + 0\text{in}$$

$$A_{sf} := 2 \cdot t \cdot \left(a + \frac{d}{2} \right) = 3.723 \cdot \text{cm}^2$$

$$P_{nv} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{sf} = 9.109 \cdot \text{tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nv}}{\Omega} = 4.554 \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Tipo_falla} := \begin{cases} \text{"Corte Perno"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, R_{ntbearing}) \geq r_{nv} \\ \text{"Aplastamiento"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, R_{ntbearing}) \geq R_{ntbearing} \\ \text{"Tracción área Neta"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, R_{ntbearing}) \geq P_{nt} \\ \text{"Corte área efectiva"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, R_{ntbearing}) \geq P_{nv} \end{cases} = \text{"Aplastamiento"}$$

B.6. ENSAYO VII: CORTE DEL PERNO HILO INCLUIDO CON PERNO DE $\frac{3}{4}$ [PULG]

Propiedades

Placa

$F_y := 36\text{ksi}$	resistencia fluencia
$F_u := 58\text{ksi}$	resistencia última acero que conecta
$t := 12\text{mm}$	espesor de plancha que conecta

Perno

$d := \frac{3}{4}\text{in}$	diametro perno
-----------------------------	----------------

$$\Omega := 2$$

Falla Perno

Resistencia corte perno rotura (teórica): hilo incluido

$$R_{vt} := \left(\frac{\frac{3}{4}\text{in}}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot 83\text{ksi} = 16.632\text{-tonnef}$$

Available Shear Strenght
hilo excluido (tabla 7-1)

$$r_{nv} := 13.3\text{kip} \cdot \Omega = 12.066\text{-tonnef}$$

Tabla J3.2

$$R_{nv} := \left(\frac{\frac{3}{4}\text{in}}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot 48\text{ksi} = 9.619\text{-tonnef}$$

$L_c := 35\text{mm}$ distancia desde el borde de la perforación al otro perno o borde libre

$$R_{n\text{bearing}} := \min(1.2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u, 2.4d \cdot t \cdot F_u) = 20.552\text{-tonnef}$$

$$\frac{R_{n\text{bearing}}}{\Omega} = 10.276\text{-tonnef}$$

Ruptura tension en el area neta**D5.1 a**

$$b := 25\text{mm}$$

$$b_e := \begin{cases} (2t + 16\text{mm}) & \text{if } 2t + 16\text{mm} < b \\ b & \text{otherwise} \end{cases} = 25\text{mm}$$

$$P_{nt} := F_u \cdot 2 \cdot t \cdot b_e = 24.467\text{-tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nt}}{\Omega} = 12.233\text{-tonnef}$$

Ruptura corte en el area efectiva**D5.1 b**

Distancia más pequeña
de la perforacion al borde

$$a := 31.5\text{mm} + 0\text{in}$$

$$A_{sf} := 2 \cdot t \cdot \left(a + \frac{d}{2} \right) = 9.846\text{-cm}^2$$

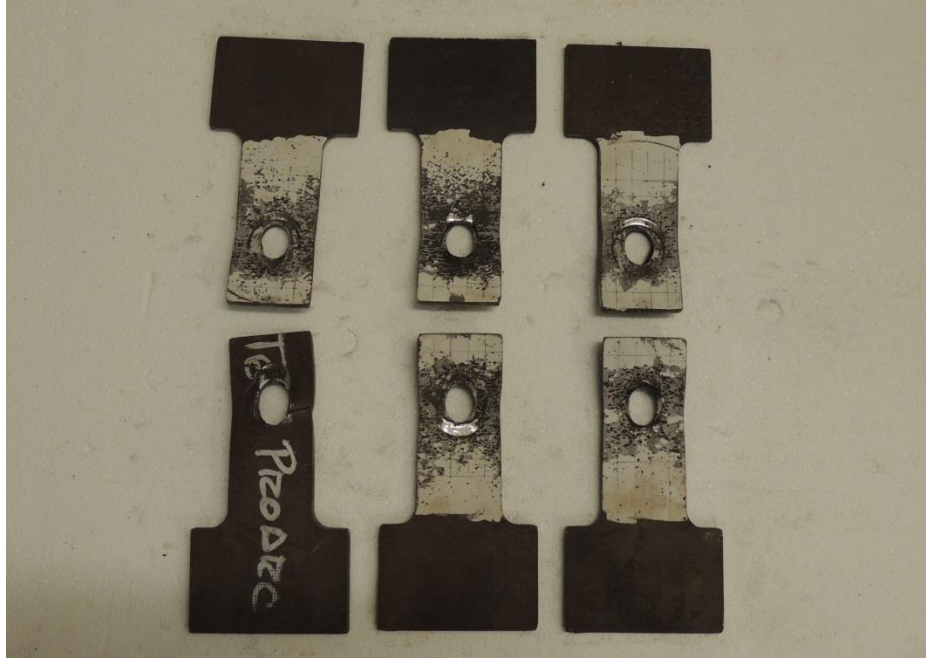
$$P_{nv} := 0.6 \cdot F_u \cdot A_{sf} = 24.09\text{-tonnef}$$

$$P_{adm} := \frac{P_{nv}}{\Omega} = 12.045\text{-tonnef}$$

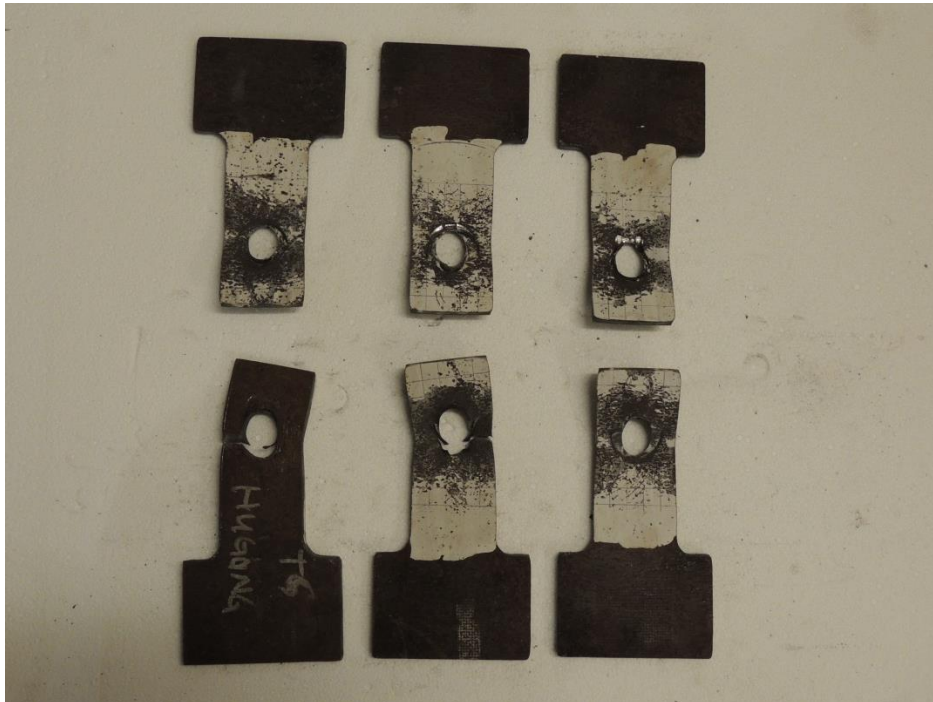
$$\text{Tipo_falla} := \begin{cases} \text{"Corte Perno"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq r_{nv} \\ \text{"Aplastamiento"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq Rn_{bearing} \\ \text{"Tracción área Neta"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq P_{nt} \\ \text{"Corte área efectiva"} & \text{if } \min(r_{nv}, P_{nt}, P_{nv}, Rn_{bearing}) \geq P_{nv} \end{cases} = \text{"Corte Perno"}$$

ANEXO C : REGISTRO FOTOGRÁFICO

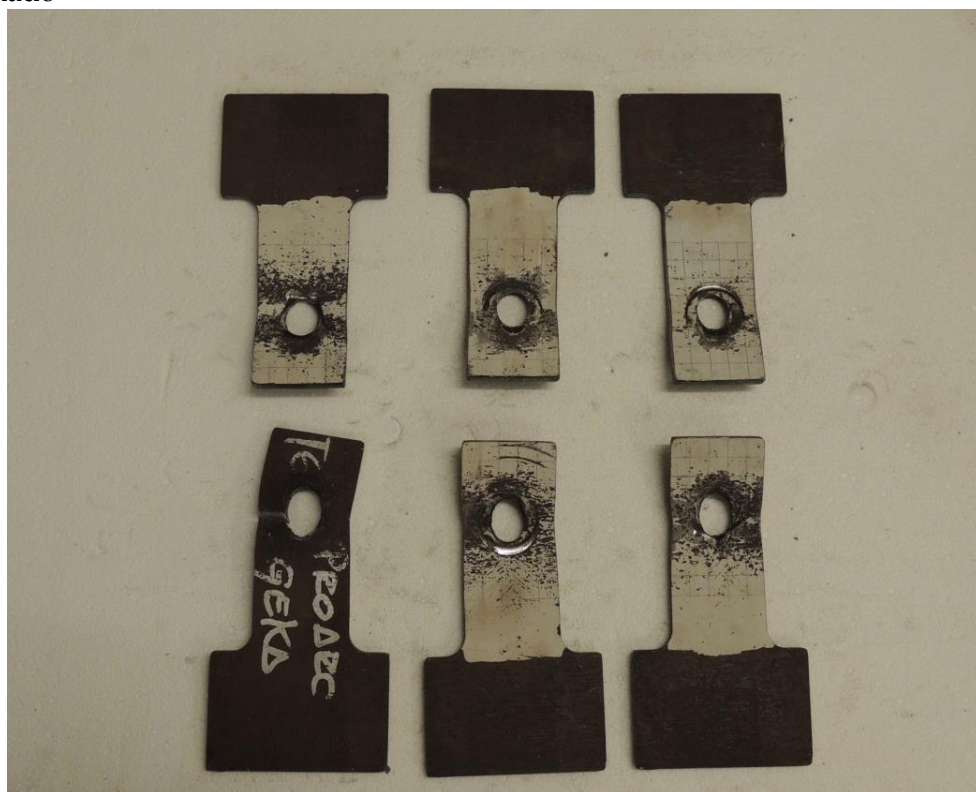
C.1. ENSAYO I: RUPTURA DEL ÁREA NETA CON PERNO DE 5/8 [PULG] Plasma de alta definición



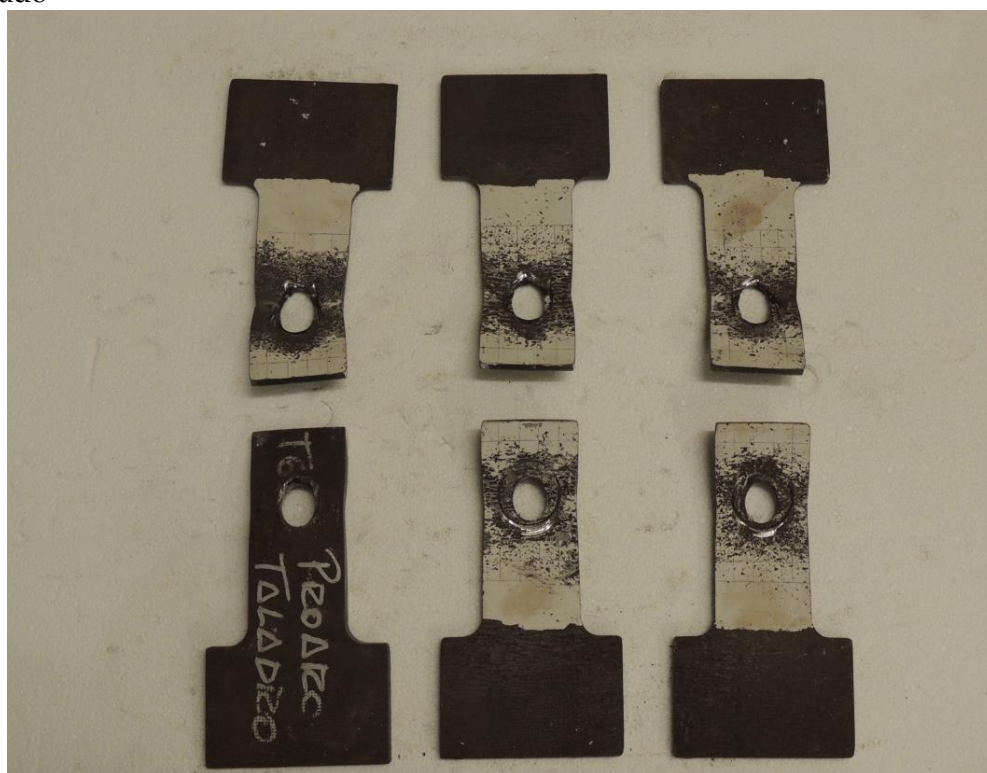
Plasma definición estándar



Punzonado

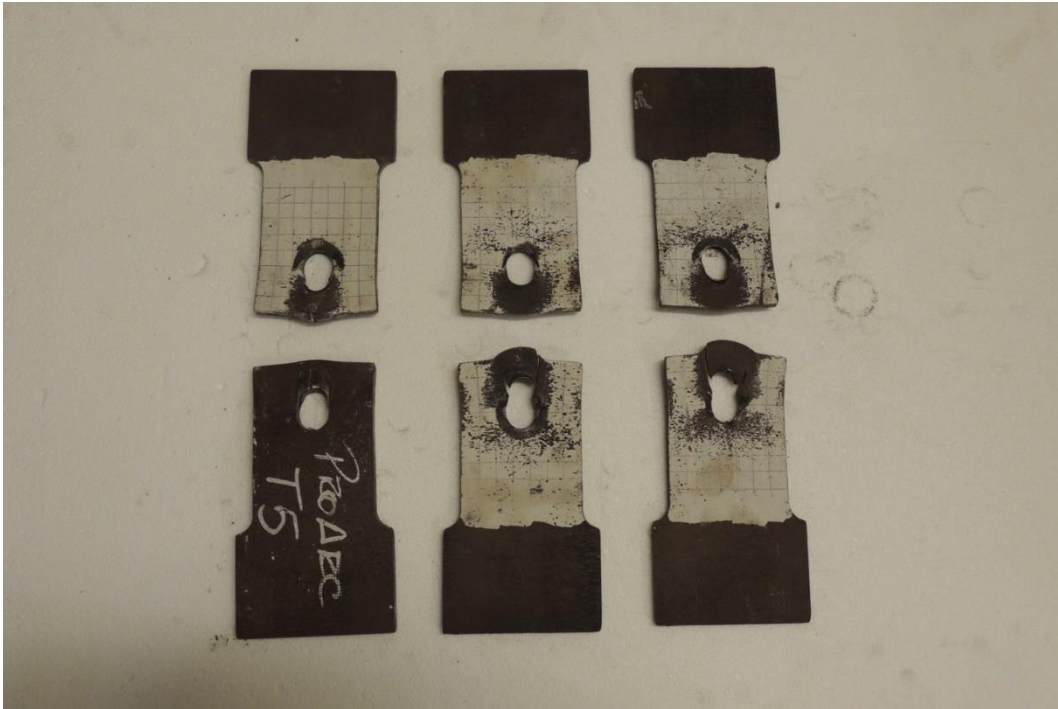


Taladrado

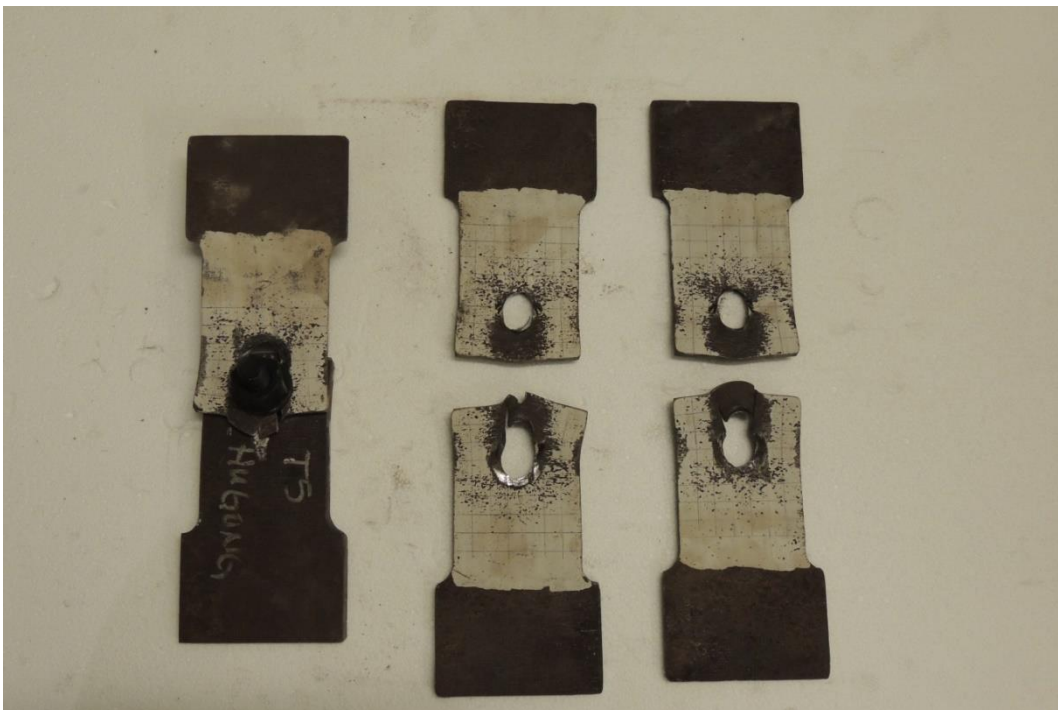


C.2. ENSAYO II: APLASTAMIENTO CON PERNO DE 5/8 [PULG]

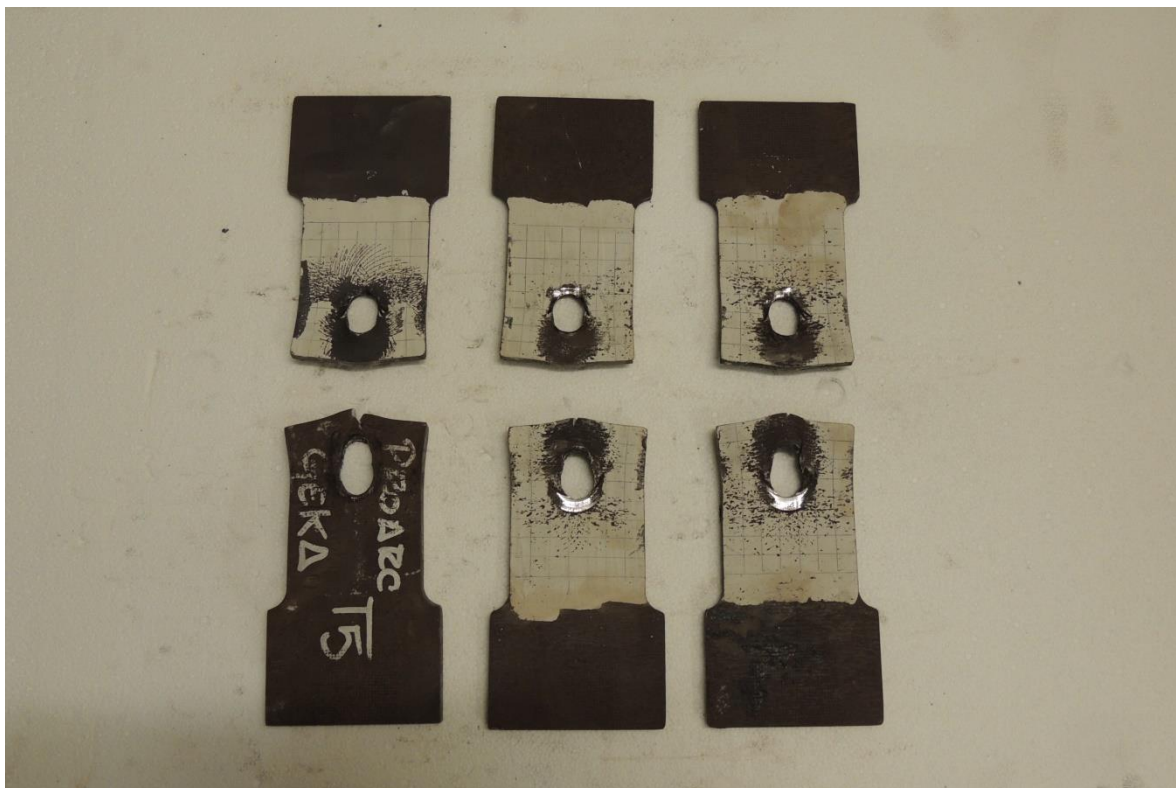
Plasma de alta definición



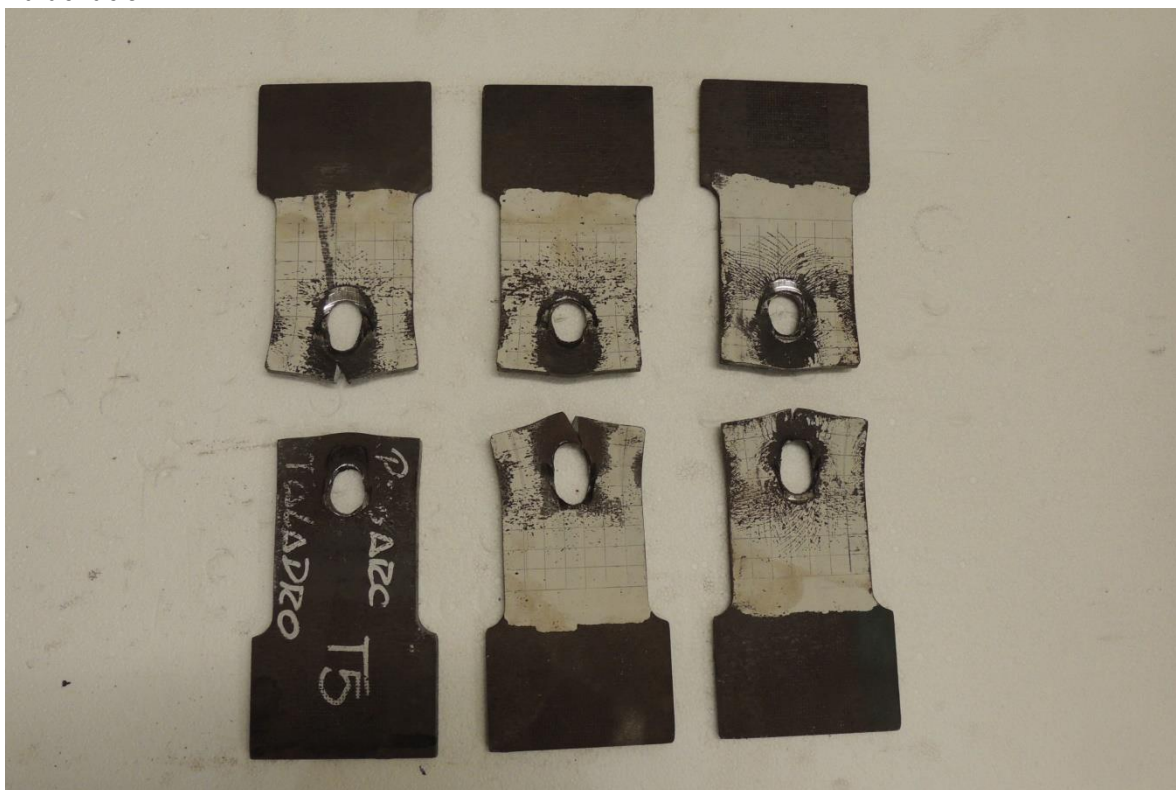
Plasma definición estándar



Punzonado

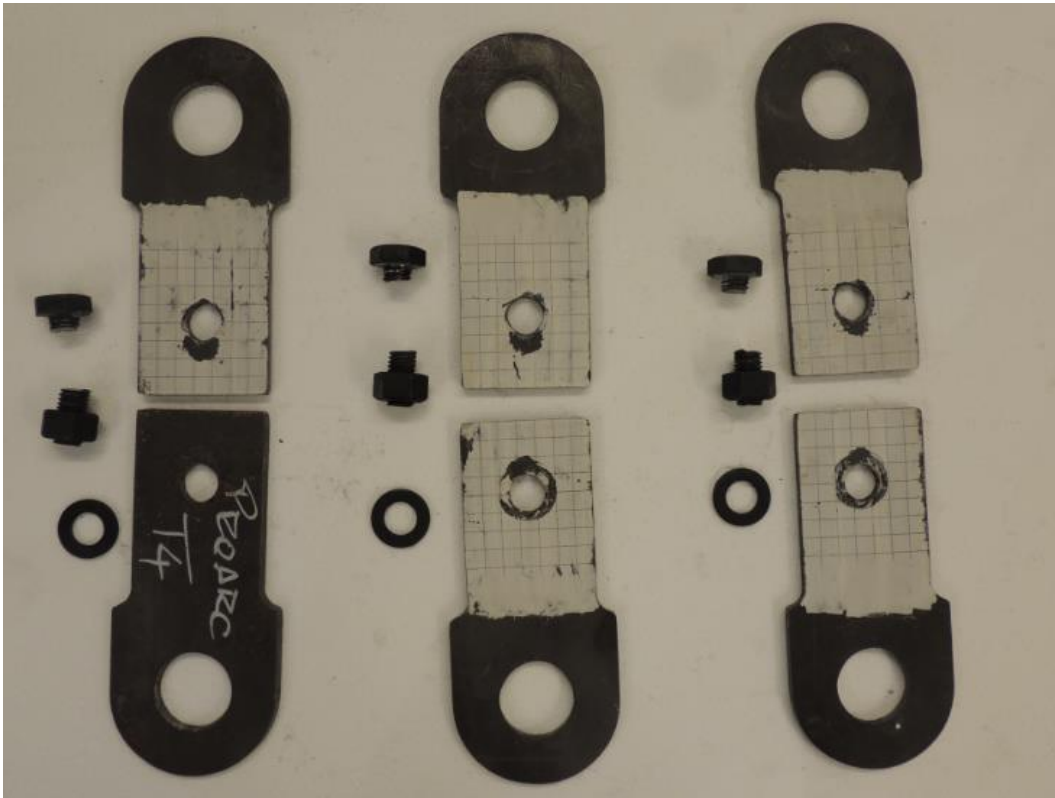


Taladrado

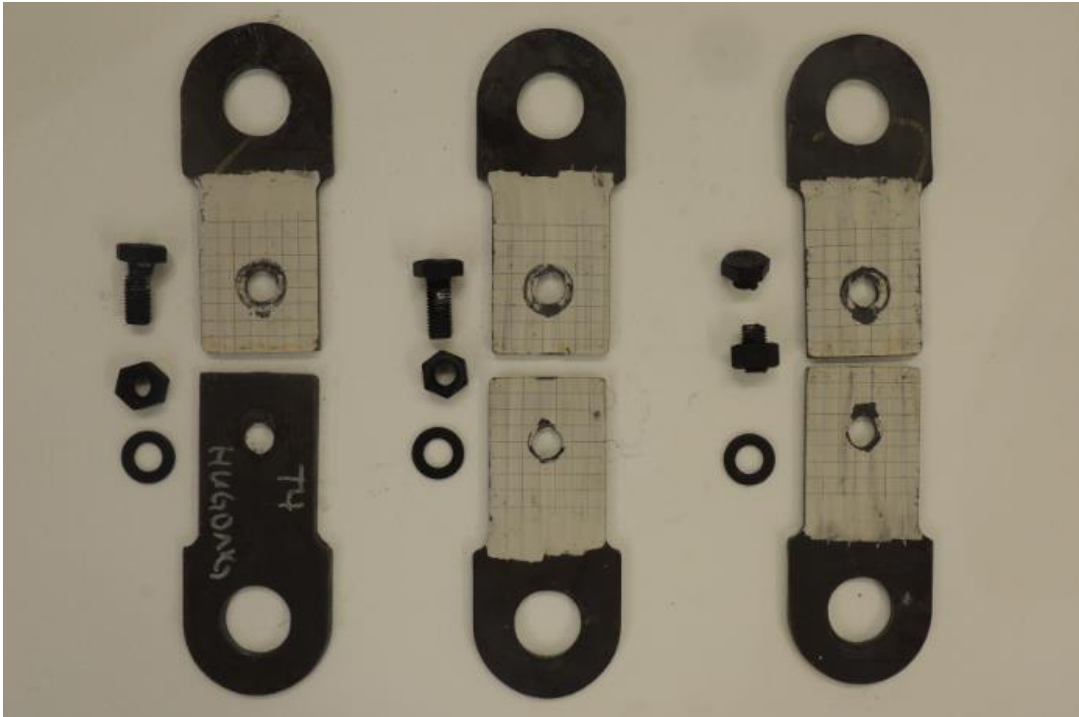


C.3. ENSAYO III: CORTE DEL PERNO HILO INCLUIDO CON PERNO DE 5/8 [PULG]

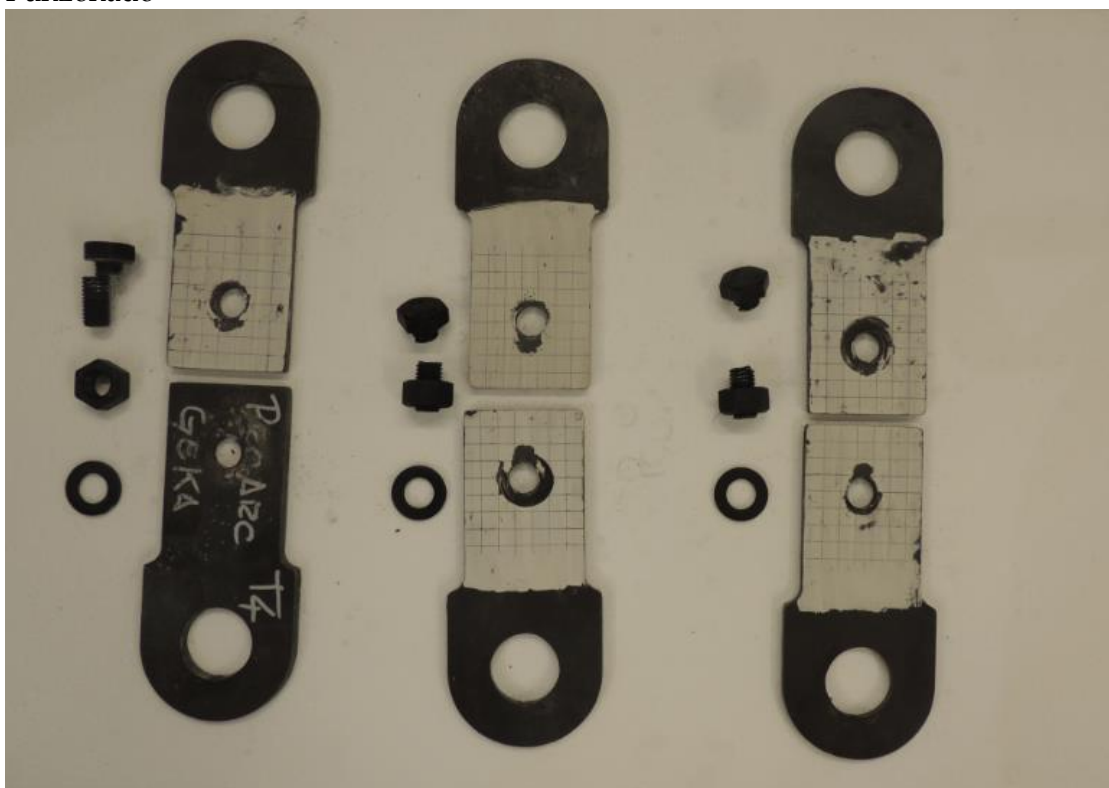
Plasma de alta definición



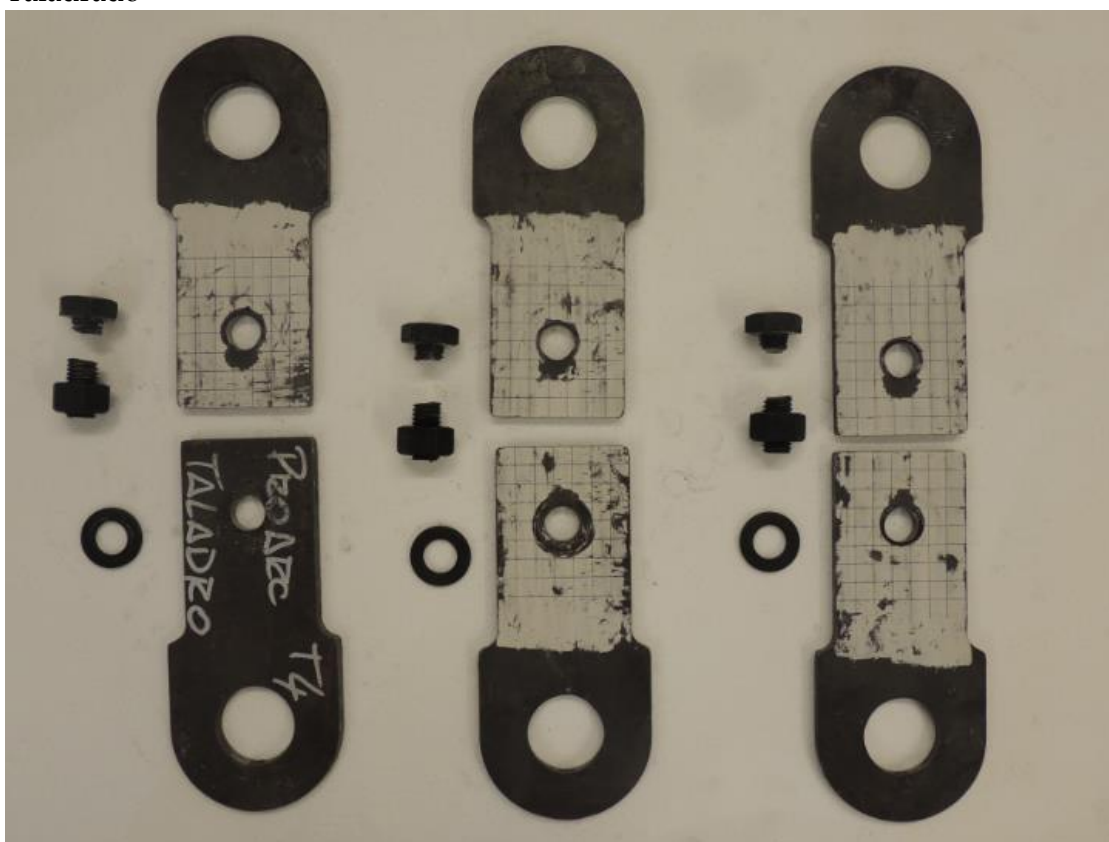
Plasma definición estándar



Punzonado

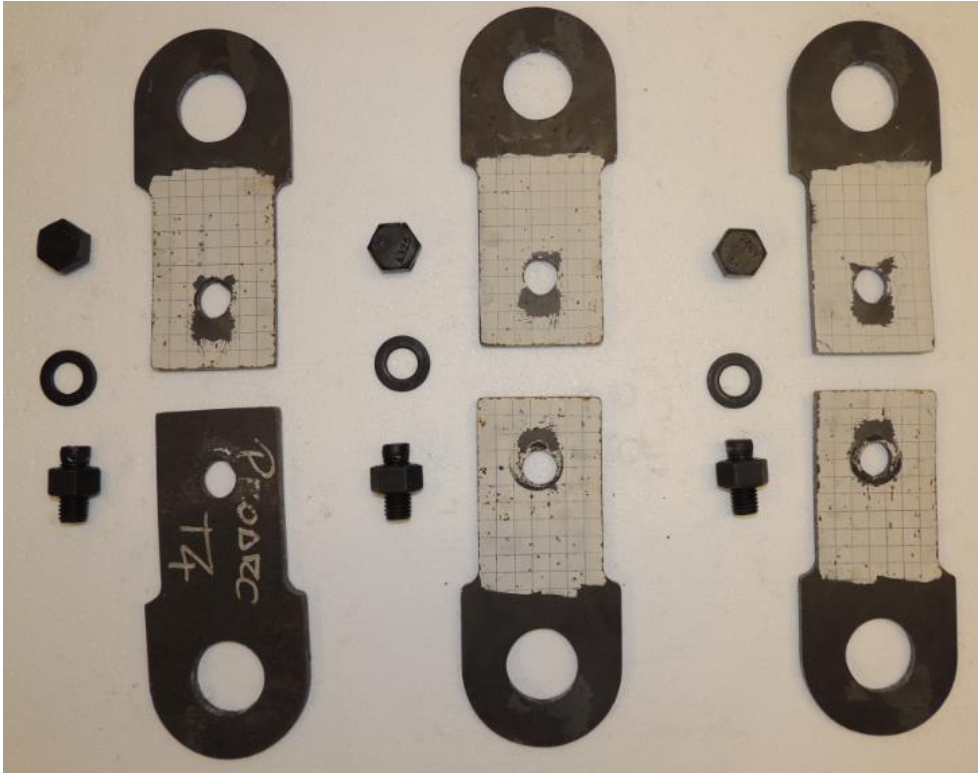


Taladrado

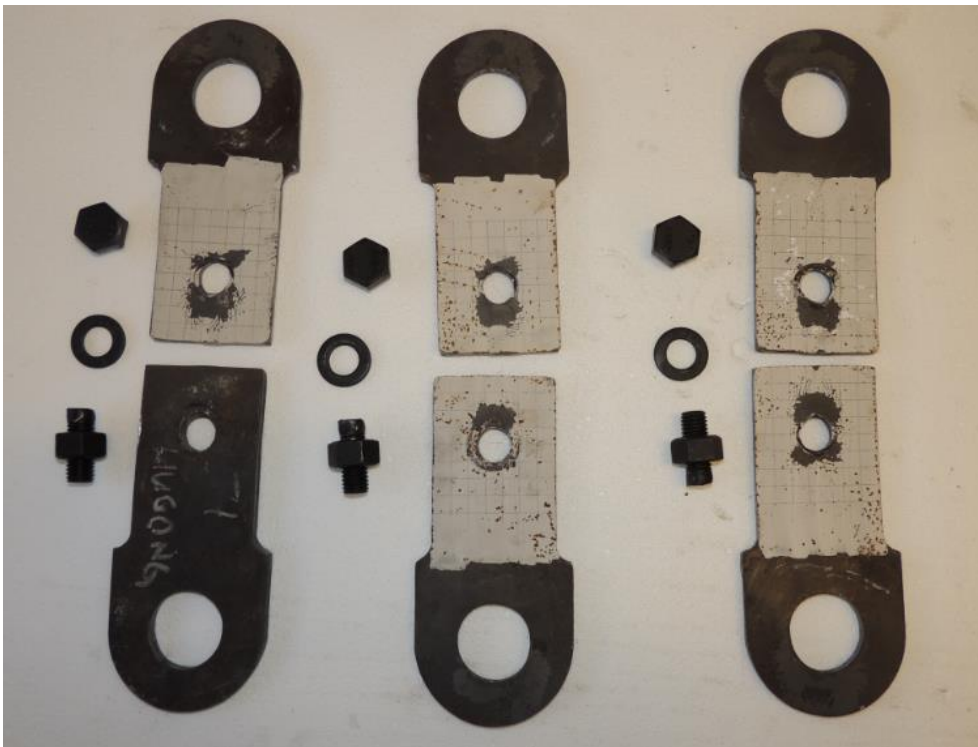


C.4. ENSAYO IV: CORTE DEL PERNO HILO EXCLUIDO CON PERNO DE 5/8 [PULG]

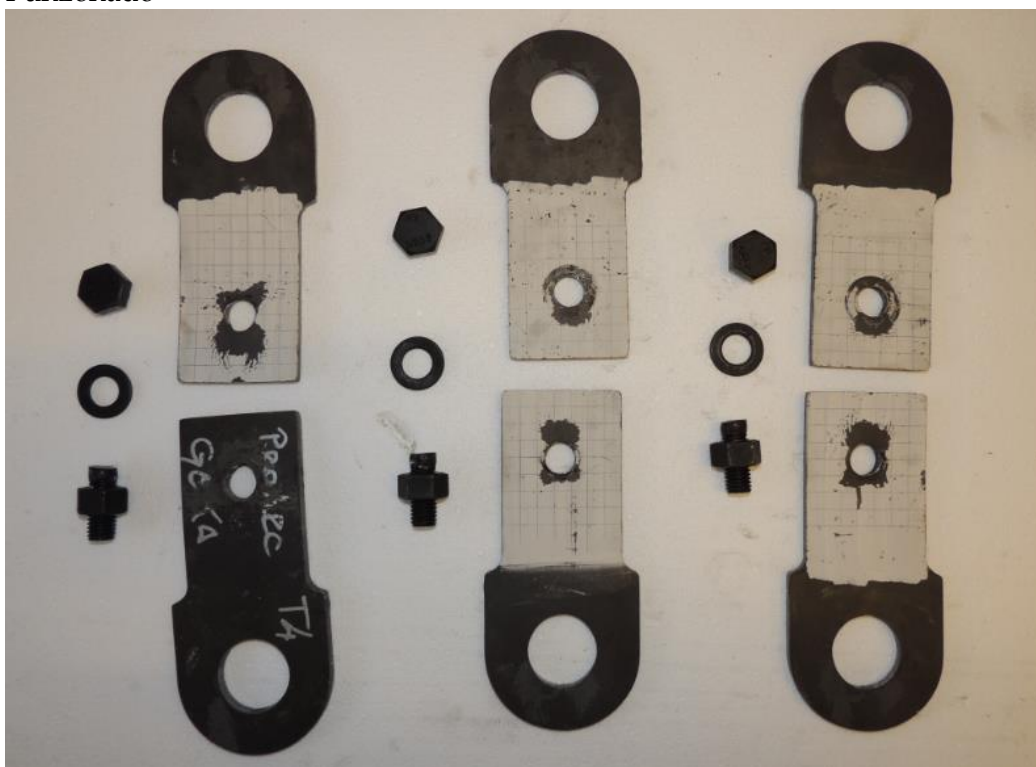
Plasma de alta definición



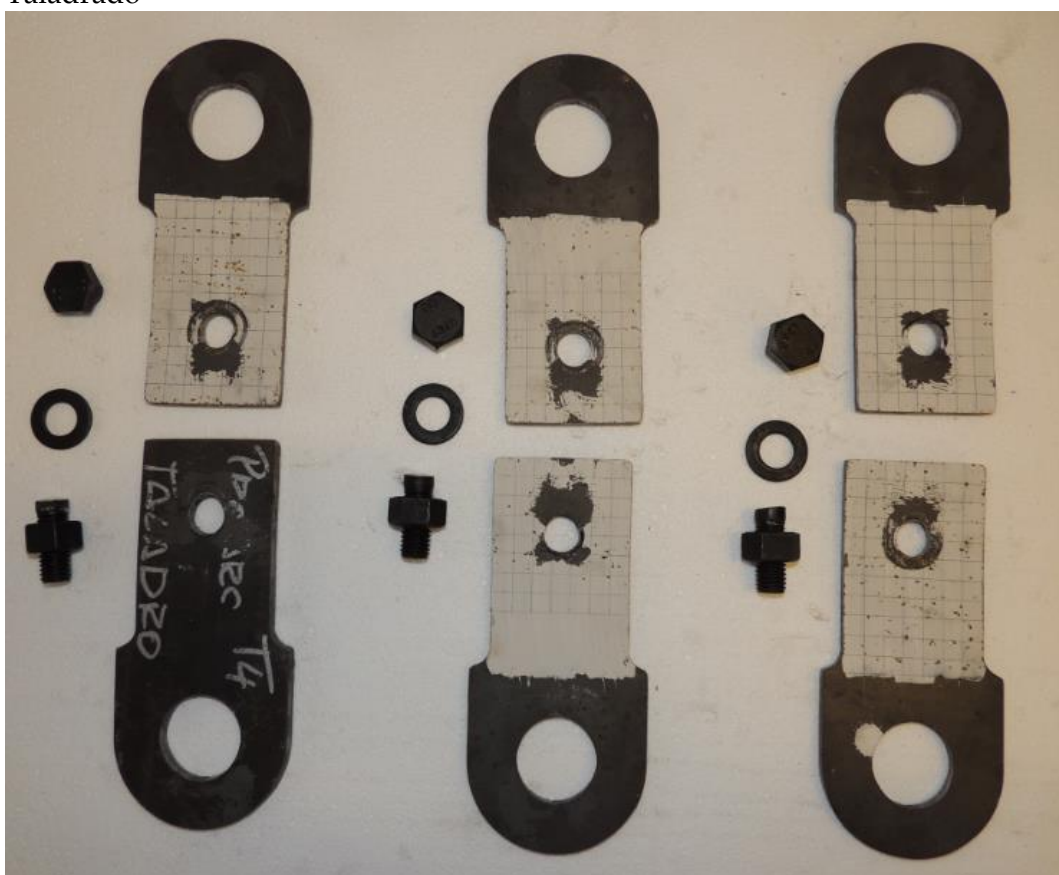
Plasma definición estándar



Punzonado

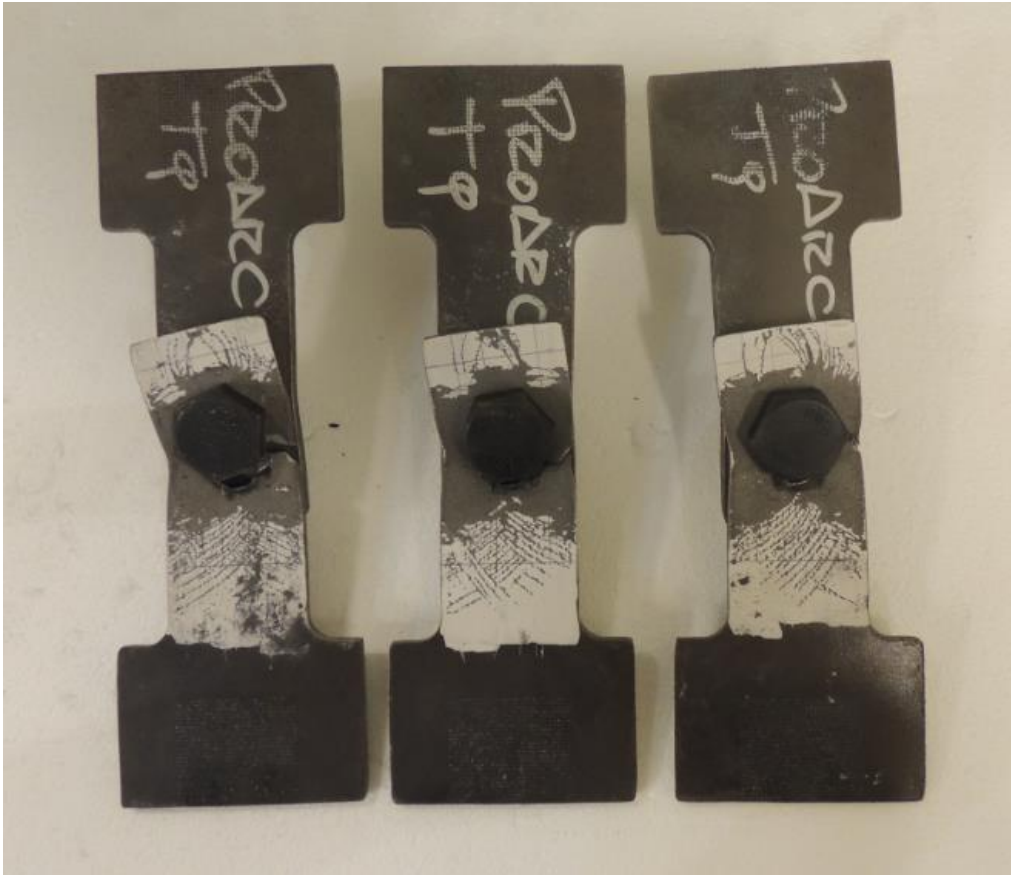


Taladrado

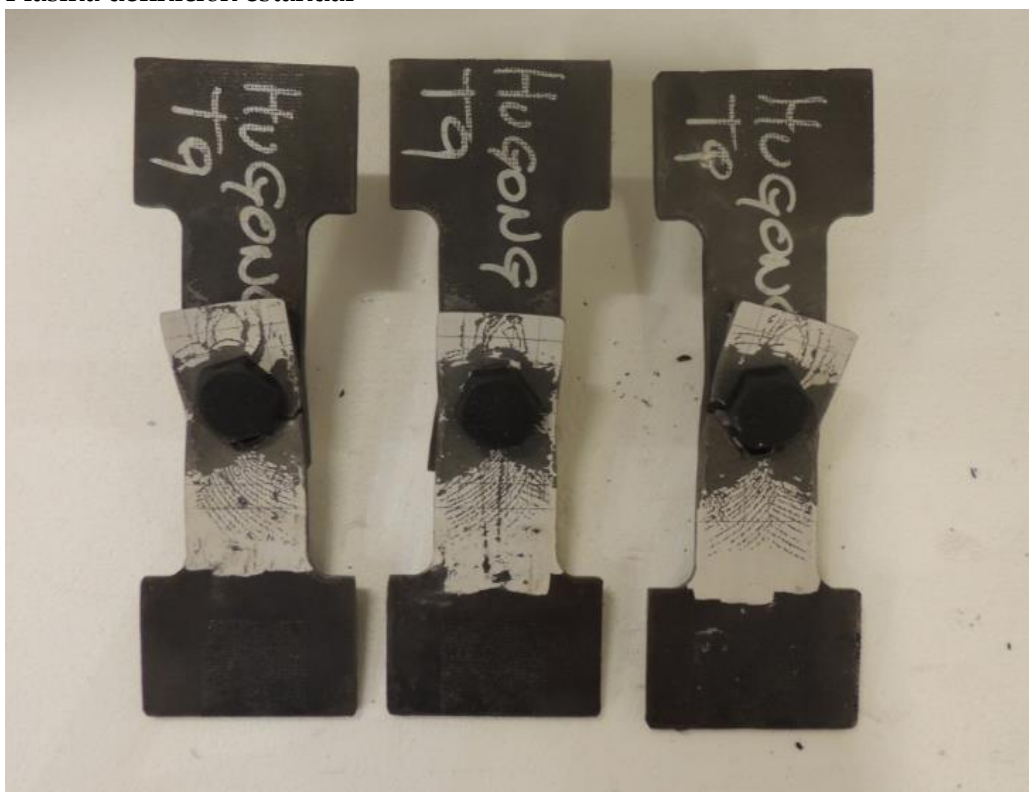


C.5. ENSAYO V: RUPTURA DEL ÁREA NETA CON PERNO DE 3/4 [PULG]

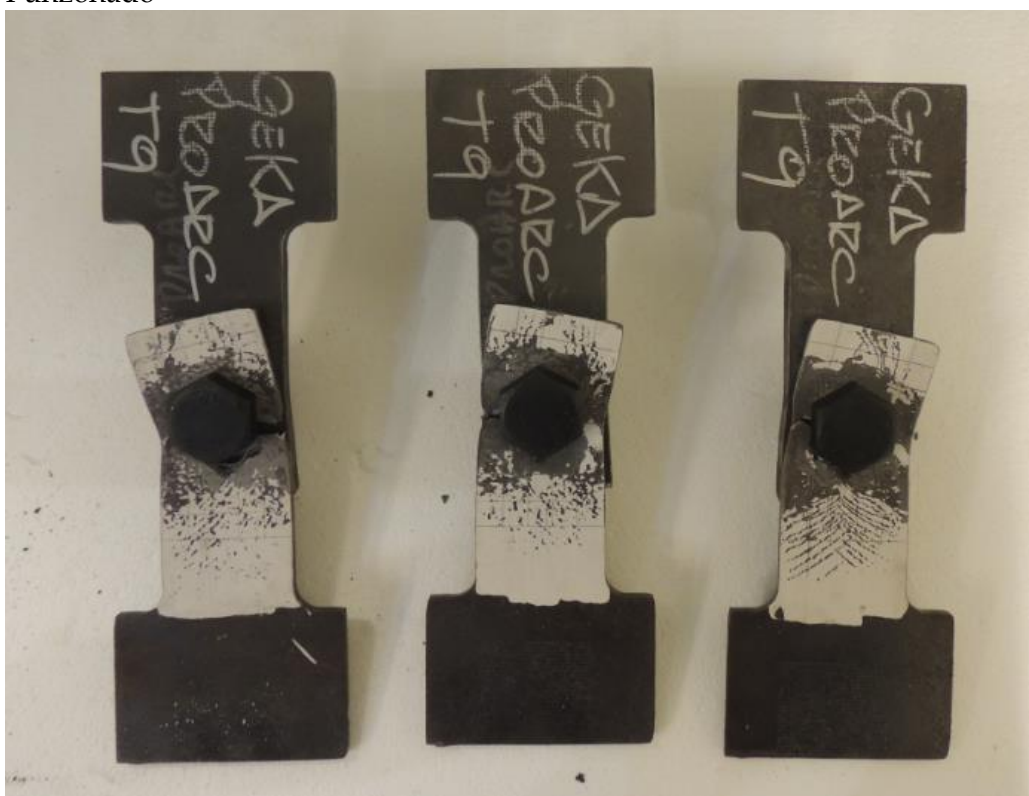
Plasma de alta definición



Plasma definición estándar



Punzonado



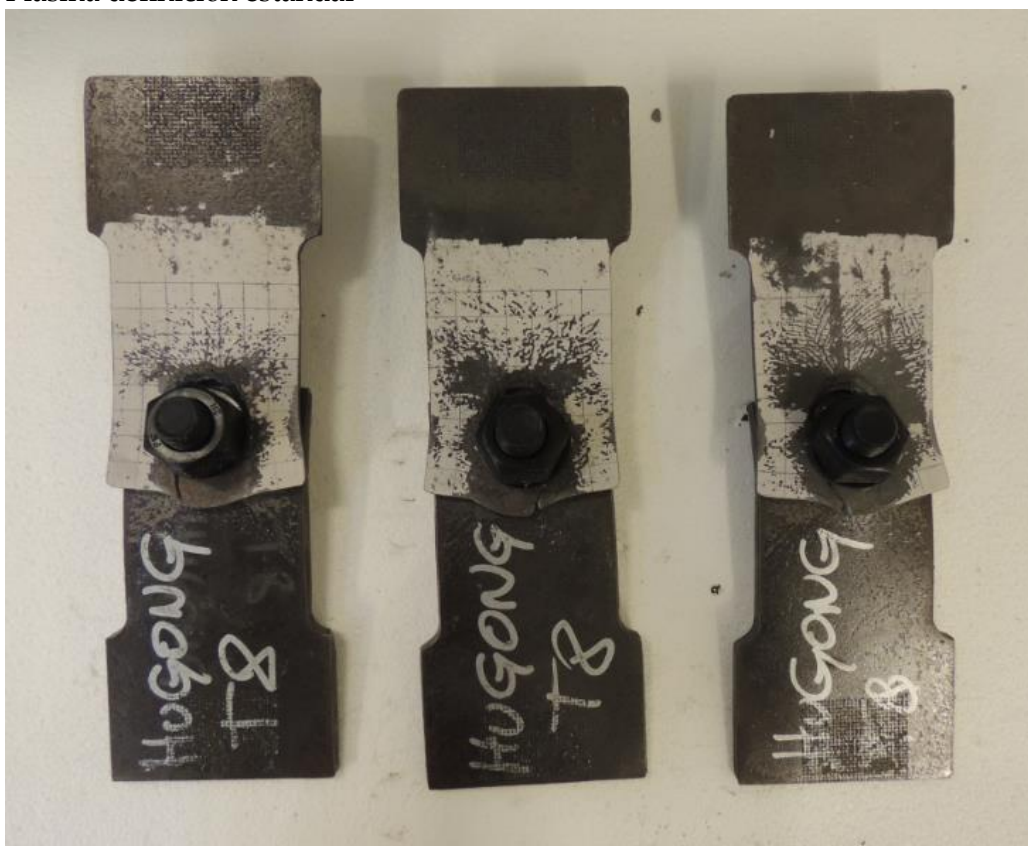
Taladrado



C.6. ENSAYO VI: APLASTAMIENTO CON PERNO DE 3/4 [PULG]
Plasma de alta definición



Plasma definición estándar



Punzonado

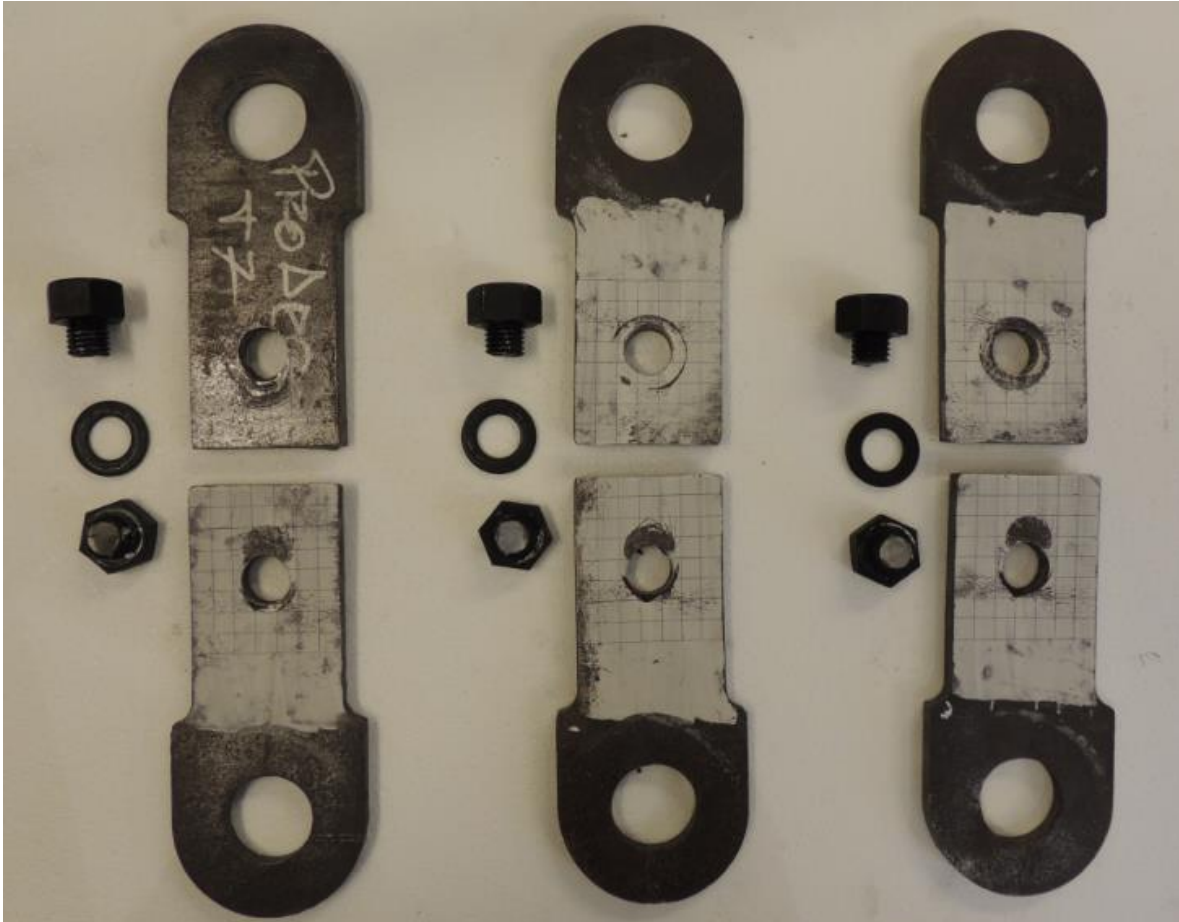


Taladrado

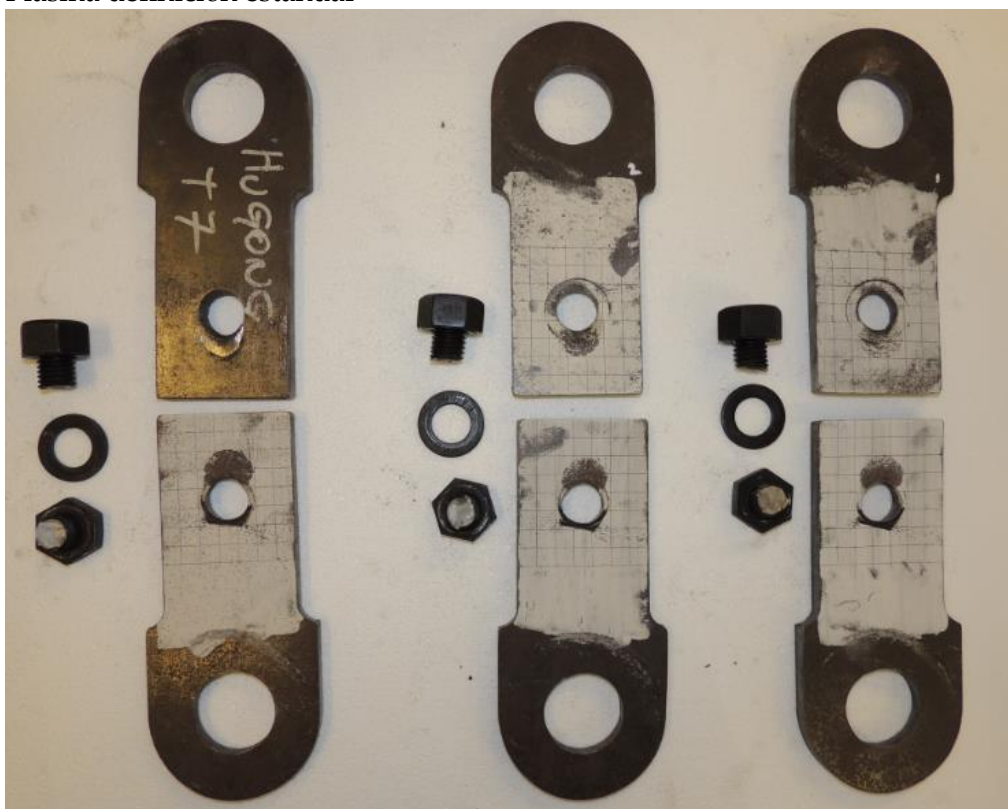


C.7. ENSAYO VII: CORTE DEL PERNO HILO INCLUIDO CON PERNO DE $\frac{3}{4}$ [PULG]

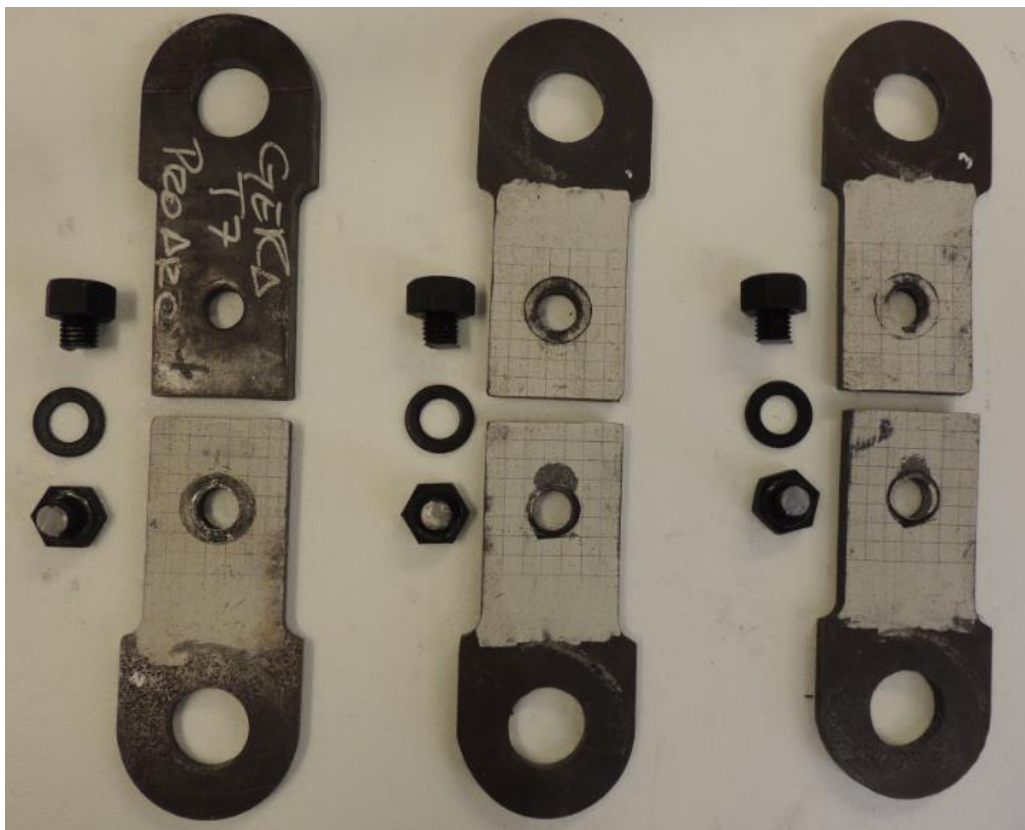
Plasma de alta definición



Plasma definición estándar



Punzonado



Taladrado

