



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

“UNIONES DE FERROCEMENTO: DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE EN PIEZAS DE FERROCEMENTO UNIDAS CON PERNOS Y CLAVOS HILTI”

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN OBRAS CIVILES

PROFESOR GUÍA:
SR. HERNÁN ARNÉS VALENCIA
INGENIERO CIVIL

**ARIEL ALEJANDRO FUENTES SCHMAUCK
VALDIVIA – CHILE**

2004

“A mis padres, ya que
con su sacrificio han
hecho esto posible.”

ÍNDICE

RESUMEN

SUMMARY

Pág. Nº

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 1

1.1.- Introducción.....	1
1.2.- Presentación del Problema.....	2
1.3.- Objetivos.....	3
1.3.1.- Objetivos Generales.....	3
1.3.2.- Objetivos Específicos.....	3
1.4.- Metodología de Trabajo.....	4

CAPITULO II: PROCESO DE ANALISIS Y DISEÑO DE PROBETAS PARA UNIONES FERROCEMENTO..... 5

2.1.- Introducción.....	5
2.2.- Uniones.....	5
2.2.1.- Generalidades.....	6
2.2.2.- Sección transversal critica y tensiones de cizalle.....	7
2.2.3.- Dirección de la carga respecto al sentido de la pieza.....	9
2.2.4.- Espaciamientos.....	9
2.2.5.- Acción en grupo de los elementos de unión.....	9
2.3.- Dimensiones de la probeta.....	10
2.3.1.- Uniones con Clavos.....	11
2.3.2.- Uniones con pernos.....	12
2.4.- Calculo de una viga compuesta con uniones de pernos y/o Clavos Hilti.....	14
2.5.- Suposiciones para el Diseño de Elementos de Ferrocemento a Flexión.....	16

CAPITULO III: FABRICACIÓN DE PROBETAS DE FERROCEMENTO.18

3.1.- fabricación del moldaje.....	18
3.2.- Fabricación de la armadura.....	20
3.3.- Vaciado del mortero.....	22
3.4.- Desmolde.....	24
3.5.- Armado de las probetas.....	25

CAPITULO IV: ENSAYO RELIZADO A PROBETAS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL CORTE DE LA UNIÓN..... 26

4.1.- Introducción.....	26
4.2.- Generalidades del ensayo de resistencia al corte.....	26
4.2.1.- Definición del ensayo.....	26
4.2.2.- Motivos del ensayo.....	27
4.3.- Equipo y materiales a usar.....	28
4.4.- Análisis de resultados.....	30
4.4.1.- Determinación de las rectas de diseño.....	40
4.4.1.1.- Recta resultante para Clavos Hilti.....	40
4.4.1.2.- Recta resultante para Pernos.....	45
4.4.2.- Determinación de las curvas de diseño del flujo cortante en función de la separación de los conectores.....	50
4.4.2.1.- Curva resultante para Clavos Hilti.....	50
4.4.2.2.- Curva resultante para pernos.....	51
4.5.- Comportamiento del ferrocemento en el ensayo.....	53
4.5.1.- Fallas en las uniones con Clavos Hilti.....	53
4.5.2.- Fallas en las uniones con Pernos.....	53
4.5.3.- Deformación de las probetas.....	54
4.5.4.- Influencias de la excentricidad.....	55
4.5.5.- Comportamiento de las probetas.....	55

CAPITULO VI: CONCLUSIONES..... 57

ANEXO 1

ANEXO 2

ANEXO 3

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RESUMEN:

En este trabajo de titulación se ha propuesto introducir al rubro de la construcción un nuevo tipo de uniones para el ferrocemento: Pernos y Clavos Hilti, conectores que no son muy ocupados para este tipo de estructuras, por lo cual en este trabajo se entregan todas las herramientas para diseñar y ejecutar.

Mediante el presente trabajo se determina y analiza la resistencia al corte en uniones de ferrocemento con pernos y clavos Hilti, además con los resultados de los ensayos realizados en este trabajo de titulación, obtener un método sencillo y práctico para calcular el número de conectores que se requieren para una carga determinada, como también obtener el cortante de cada tipo de unión en función de la separación de los conectores. Incluyendo en todos estos valores un factor de seguridad 3, para darle una mayor confiabilidad al diseño.

SUMMARY:

In this work of qualifications it has proposed to introduce to the title of the construction a new type of unions for the ferrocemento: Bolts and Nails Hilti, conectors that are not much occupied for this type of structures, for which in this work all the hardware submits to design and to execute.

By means of the present work he decides and analyzes the resistance to the court in pieces of ferrocemento joined with bolts and nails Hilti, besides with the results of the essays realized in this work of qualifications, to obtain a simple and practical method to calculate the number of conectors that are needed for a certain load, as also obtaining the butcher of every type of union according to the separation of the conectors. Including in all these values a safety factor 3, to give him a major reliability to the design.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.- INTRODUCCIÓN.

Hoy en día, contar con un material que permita satisfacer requerimientos de resistencia y que además sea económico es altamente ventajoso. Es el caso del ferrocemento, el cual consiste en una capa delgada de mortero (cemento y arena), la que va reforzada con una armadura discreta (malla ACMA) y una armadura difusa (malla hexagonal), las cuales están distribuidas uniformemente a través de la sección transversal.

El ferrocemento difiere del hormigón armado en forma convencional sobre todo por la disposición en que se distribuyen y colocan los elementos que constituyen la armadura del elemento. Este, generalmente se presenta como una delgada capa de hormigón (mortero), flexible, que presenta un número de mallas de alambre de acero de pequeño diámetro distribuidas uniformemente a través de la sección transversal y longitudinal del elemento. Se utiliza un mortero muy rico en cemento lográndose un comportamiento notable en diferentes aspectos mecánicos, que en el transcurso de esta tesis se irán apreciando.

La idea básica de este material es que el mortero pueda experimentar mayores deformaciones en las cercanías del refuerzo sin fisurarse, y que la magnitud de las deformaciones dependa de la subdivisión y distribución del refuerzo a través de la masa del mortero.

Las aplicaciones de este material son muy diversas siendo algunas de ellas las siguientes: embarcaciones navales, construcción de viviendas sociales, reforzamiento de pozos excavados, fabricación de estanques, etc. (Olvera, 2003).

Mediante el presente trabajo se pretende determinar y analizar la resistencia al corte de uniones de ferrocemento con pernos y clavos Hilti, como también a partir de resultados experimentales, se pretende validar un método sencillo y práctico para calcular el número de conectores que se requieren para una carga determinada. Además de conocer las formas de fallas de las uniones y el comportamiento del material.

1.2.- PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA.

El ferrocemento es un material versátil en el sentido que se puede fabricar perfilaría liviana al igual que perfilaría múltiple, como ángulos, canales, omegas, etc. Es posible con estas perfilaría fabricar piezas estructurales mayores como cerchas, vigas I, vigas T, galpones, etc. para lo cual es necesario tener elementos de unión para estos perfiles.

Dado a conocer lo anteriormente expuesto, lo cual resume un poco la bibliografía existente en el medio sobre ferrocemento, nos podemos dar cuenta que no existe mucha información sobre resistencia al corte en piezas de este material con conectores, lo que nos hace investigar y analizar este problema. Para ello se pretende realizar un estudio, el cual constara de una parte teórica y a su vez una parte práctica.

La parte práctica se desarrolla ensayando varios tipos de uniones con clavos Hilti y pernos, estos se harán ensayando treinta y seis piezas de ferrocemento de 50*20*3 cm. que irán apernadas o clavadas en varias hileras, (desde una a seis), a dos perfiles del mismo material de 10*10*1.5 cm., en donde se cargara la pieza central y se registrara el comportamiento al corte de uniones de ferrocemento con pernos y clavos Hilti. De esta manera obtendremos el cortante máximo que soporta la unión cuando es sometido a carga, además de conocer el comportamiento de este material con estos tipos de uniones.

En la parte teórica se analizaran estos datos y se formulara una ecuación para determinar el número de conectores necesarios para una fuerza específica. Como también para determinar el cortante, y así poder calcular cualquier sollicitación que necesite de este dato. De esta manera la presente tesis puede servir como una guía para trabajar con este tipo de uniones.

1.3.- OBJETIVOS.

1.3.1- Objetivos Generales.

- Determinar la resistencia al corte de uniones de ferrocemento con Pernos y Clavos Hilti, mediante ensayos con probetas.
- Determinar cargas admisibles que permitan al ingeniero calculista diseñar con este tipo de unión.

1.3.2- Objetivos Específicos.

- Estudiar el Comportamiento del ferrocemento unido con Pernos.
- Estudiar el comportamiento del ferrocemento unido con Clavos Hilti.
- Con los resultados que se obtendrán de la parte práctica de este trabajo de titulación, obtener un método sencillo y práctico para calcular el número de conectores que se requieren para una carga determinada, como también obtener el cortante de cada tipo de unión.

1.4.- METODOLOGÍA DE TRABAJO.

- Recopilación de información sobre ferrocemento, uniones de hormigón uniones apernadas, uniones clavadas, etc.

- Análisis y selección de información relativa al tema en estudio.

- Construir uniones con distintos números de conectores que van de uno a seis.

- Realizar ensayos de laboratorios aplicando carga hasta el colapso, para determinar su resistencia.

- Realizar las observaciones pertinentes en los ensayos a los conectores y obtener conclusiones en cuanto a formas de fallas, relaciones carga – n° de conectores, como también la obtención del cortante en cada tipo de unión.

CAPÍTULO II: PROCESO DE ANALISIS Y DISEÑO DE PROBETAS PARA UNIONES DE FERROCEMENTO

2.1.- INTRODUCCIÓN.

En general una estructura cualquiera debe ser diseñada para que funcione sin que manifieste ningún síntoma que afecte el trabajo que realice al estar sometida a cargas de uso “normales”. Además, debe estar preparada para soportar un determinado nivel de carga no usual, pero que puede ser previsible, que pueda producir fallas o su imposibilidad de uso posterior.

En la actualidad, las normas, están preparadas para ofrecer al ingeniero calculista un cierto margen de seguridad, entre la estructura que se construirá, a partir de una serie de hipótesis planteadas inicialmente, y las condiciones de carga más desfavorables a las cuales podría someterse.

Generalmente los países que poseen normas de diseño, las basan en experiencias acumuladas ante un determinado fenómeno, ya sea, a través de ensayos, o del estudio analítico y estadístico de ese fenómeno, de esta forma lo haremos para el presente trabajo, ya que no hay normas ni información en las cuales basarnos, tendremos que hacer una experiencia práctica que detallaremos mas adelante.

Como nuestro trabajo tiene que ver con la resistencia al corte en uniones de ferrocemento con Pernos y Clavos Hilti. A continuación hablaremos sobre las uniones y sus componentes.

2.2.- UNIONES

La idea de calcular la resistencia al corte en uniones de ferrocemento para obtener el cortante, nos sirve para aplicarlo a un sin numero de casos, por ejemplo, un caso muy práctico es el de una viga compuesta por un alma y las alas que irían unidas al alma con, en nuestro caso, Clavos Hilti o Pernos.

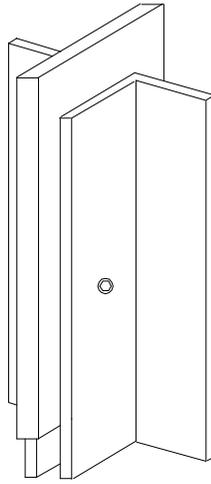


Figura 2.1 *Probeta para uniones*

La distribución de los esfuerzos internos de una viga constituida por varios elementos longitudinales dependerá de los elementos de unión o por lo menos estará restringido por estos, por eso es necesario conocer el cortante que resisten estos tipos de uniones, y de que forma fallaran.

2.2.1.- Generalidades

Un elemento mecánico de unión es aquel que, al quedar sometido por las fuerzas de cizalle, admiten corrimientos relativos entre las piezas conectadas y cuyas magnitudes dependen de la fuerza solicitante. Estos corrimientos se originan como consecuencia de las deformaciones por aplastamiento del material unido en la zona de contacto con el elemento de unión y, adicionalmente, en el caso de elementos de unión de forma cilíndrica (clavos, pernos, etc.), por las deformaciones de flexión que ellos experimentan.

2.2.2.- Sección transversal crítica y tensiones de cizalle

La sección transversal crítica de una pieza de hormigón que contiene una unión es aquella sección transversal, normal al eje longitudinal de la pieza, que presenta las tensiones de trabajo máximas, calculadas esta con la sección transversal neta. La sección transversal neta es igual a la sección bruta de la pieza menos las áreas de perforaciones.

Vamos a suponer que nuestras probetas tienen el mismo modulo de elasticidad que otros ensayos que se han realizado en el L.E.M.C.O., con hormigón y armadura de las mismas características, el valor del modulo de elasticidad va entre 150.000 a 200.000 Kg/cm², por consiguiente volveremos a suponer ahora que el ferrocemento se comporta como la madera que tiene el mismo modulo de elasticidad, por ejemplo, la luma que en estado seco tiene un modulo de elasticidad de 210.000 Kg/cm² y en estado verde de 160.000 Kg/cm². Por lo tanto si hiciéramos esta suposición, en uniones solicitadas por fuerza de corte y materializadas con pernos se debe verificar las tensiones de cizalle, f_{cz} , inducidas por las fuerzas de corte Q y evaluadas con las relaciones que siguen, no excedan los valores indicados:

- a) en uniones alejadas del extremos de la pieza en 5 o más veces la altura (h) de la misma, con:

$$f_{cz} = \frac{1.5 * Q}{b * h_e}$$

Verificar: $f_{cz} = f_{cz, dis}$

b) en uniones separadas del extremo de la pieza en menos de 5 veces la altura de la misma, con:

$$f_{cz} = \frac{1.5 * Q}{b * h_e} * \frac{h}{h_e}$$

Verificar: $f_{cz} = f_{cz, dis}$

En el caso de conectores, "h_e" corresponde a la altura de la pieza menos la distancia desde el borde descargado hasta el centro del perno más cercano.

Adicionalmente se debe verificar la sección transversal bruta de acuerdo a la relación:

$$f_{cz} = \frac{1.5 * Q}{b * h} = f_{cz, dis}$$

Donde:

Q = esfuerzo de corte en el extremo del elemento.

b = ancho de la pieza.

h = altura de la pieza.

h_e = distancia medida desde el borde descargado hasta el borde del conector más cercano.

2.2.3.- Dirección de la carga respecto al sentido de la pieza

El ángulo formado por las direcciones de la carga y del sentido de la pieza, en una unión, es un factor que, para algunos tipos de elementos de unión, incide sobre la determinación de las cargas de diseño, obteniéndose valores mayores en la dirección paralela al sentido de la pieza. El ángulo de inclinación (θ) es el comprendido por la dirección de la fuerza con que el medio de unión actúa sobre la pieza y el sentido de esa pieza. La que puede suponerse coincidente con su eje axial.

2.2.4.-Espaciamientos

Se entiende por espaciamiento a la distancia que debe existir entre centros de elementos de unión para cada uno de ellos desarrolle su resistencia total. En este sentido el espaciamiento en el ferrocemento no es de tanta importancia debido a que no le perjudica el hecho de que estén muy cerca o muy lejos, debido a que el ferrocemento es un material homogéneo e isótropico, lo realmente importante es el aporte que realizan como medios de unión, la relación resistencia versus pernos (o clavos).

2.2.5.-Acción en grupo de los elementos de unión

Una hilera de elementos de unión consiste en dos o más elementos del mismo tipo y tamaño alineados en la dirección de la carga, solicitados en cizalle simple y/o múltiple.

Las últimas investigaciones han indicado que una carga transferida por una hilera de elementos de unión, no queda repartida en forma equitativa entre los medios de unión, los conectores extremos tienden a recargarse con una mayor proporción de la sollicitación, que aquellos intermedios. De esta forma la eficiencia de una conexión se reduce a medida que se incrementa el número de elementos de unión. La distribución de la carga solicitante queda determinada por la rigidez relativa entre la pieza central y las piezas laterales.

2.3.- DIMENSIONES DE LAS PROBETAS

Las probetas que diseñaremos serán semejantes a elementos de ferrocemento de dimensiones reales pero con la diferencia de que las piezas de las probetas solo serán de 50cm. de longitud, ya que solo nos interesa saber el comportamiento de la unión.

Las armaduras fueron diseñadas tratando de semejar a la de estructuras de mayores dimensiones, ya que la idea es probar la resistencia al corte en la unión, así simulamos una unión normal, para esto fabricamos las 108 piezas que cuentan con fierro de 6 mm., malla acma c-139 y malla hexagonal de $\frac{3}{4}$ " de abertura.

La piezas central ira desfasada 10cm. de las laterales, esto es para que al momento de ensayarlas, las carguemos desde la pieza central y así la unión trabaje a corte.

A continuación se muestra la forma y las dimensiones de la probeta.

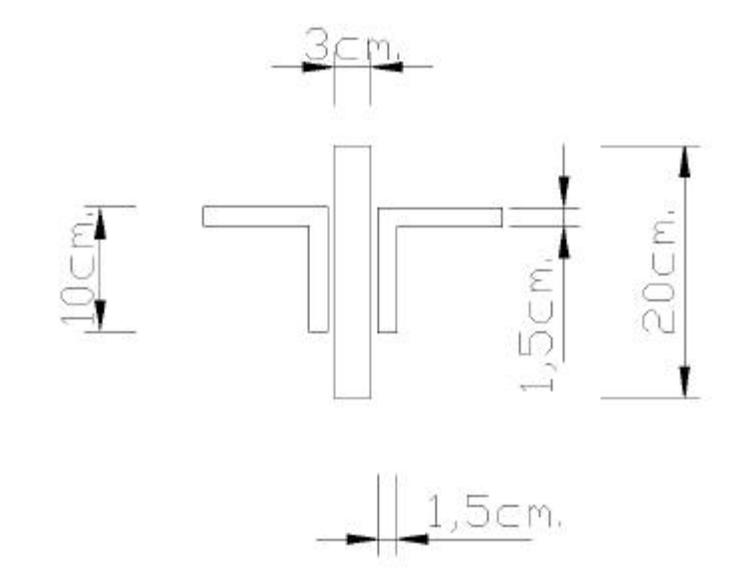


Figura 2.2 Forma y dimensiones de la probeta

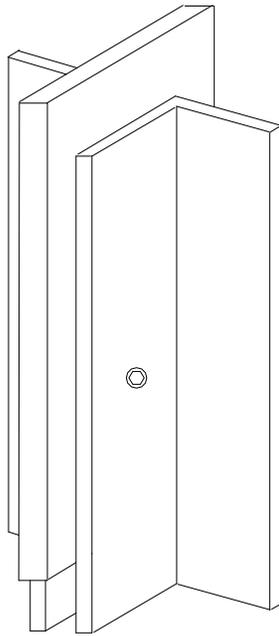


Figura 2.3 *Probeta para uniones*

2.3.1.- Uniones con Clavos

En las uniones con clavos Hilti, la unión será de cizalle simple ya que los clavos hormigoneras que colocaremos serán de 1 ½” y unirá una pieza externa (de 1.5 cm. De espesor) con la pieza central (3cm. De espesor), para esto arrendaremos una pistola para clavos Hilti para la colocación de esto en el hormigón, estos irán por ambos lados para así afirmar ambas piezas exteriores con la central. Se harán tres probetas con un clavo, tres con dos clavos, y así sucesivamente hasta seis clavos, se ensayarán en una prensa con carga axial para así hacer trabajar las uniones a corte, y luego de un análisis determinaremos el cortante de la unión, la relación fuerza-nº de pernos, además de conocer el comportamiento del ferrocemento con este tipo de uniones.

A continuación en las siguientes fotos se muestran la pistola para clavos Hilti, los Clavos Hilti y los fulminantes para la pistola.



Fotografía 2.1 *Pistola Hilti DX36 M*



Fotografía 2.2 *Clavos Hilti 1/2"*



Fotografía 2.2 *Fulminantes*



Fotografía 2.3 *Probetas clavadas*

2.3.2.- Uniones con Pernos

A diferencia de la unión con Clavos Hilti, la unión con pernos será de cizalle doble ya que con los pernos abarcamos el ancho de las tres piezas de la probeta, (las dos externas mas la central) para esto usaremos un taladro para perforar las piezas y luego colocar los pernos. Al igual que para las uniones con Clavos Hilti haremos tres probetas de uno a seis pernos, las cuales posteriormente serán ensayadas al igual que las uniones con Clavos Hilti, para determinar el

cortante de la unión, la relación fuerza-nº de pernos, además de conocer el comportamiento del ferrocemento con este tipo de uniones.

La determinación del perno va a depender tanto de la calidad del perno a usar como del diámetro que este tenga. No obstante, depende además de si el perno buscado se encuentra en el mercado de la ciudad y país en que se esté.

Con el objeto de no realizar demasiadas perforaciones a lo largo de la probeta, que como consecuencia pueden afectar su resistencia y además significaría un mayor tiempo de montaje, se decide usar pernos de alta resistencia.

El factor de seguridad a usar será de $C_p = 0,4$, asegurando así que no será el medio de unión el que falle al momento de efectuar el ensayo, sino que la probeta.

Entonces, si se usa pernos de Acero de mediano o bajo carbono, T y R, se tiene las siguientes especificaciones mecánicas métricas para éstos:

CLASE DE PROPIEDAD	INTERVALOS DE TAMAÑO INCLUSIVE	RESISTENCIA MINIMA A LA TENSIÓN (MPa)	RESISTENCIA ULTIMA MINIMA A LA TENSIÓN (MPa)	RESISTENCIA DE FLUENCIA MINIMA A LA TENSIÓN (MPa)	MARCA DE LA CABEZA
4.6	M5 – M36	225	400	240	4.6
4.8	M1.6 – M16	310	420	340	4.8
5.8	M5 – M24	380	520	420	5.8
8.8	M16 – M36	600	830	660	8.8
9.8	M1.6 – M16	650	900	720	9.8

Tabla 2.1 Especificaciones mecánicas métricas para pernos

En el mercado sólo se encontró el 8.8 por lo que se trabaja con las siguientes propiedades mecánicas:

- La fluencia de estos pernos es de $F_y = 6600 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$
- Luego al multiplicar por C_p se trabaja con una resistencia al corte de $\tau_p = 2.640 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$
- Se prueba con un perno de diámetro 6 mm, entonces su sección es de $A_p = 0,283 \text{ (cm}^2\text{)}$
- Entonces lo que resiste cada perno es 746.44 (Kg).

Usaremos para estas probetas pernos de 3”*1/4” de grado 8.8 para asegurarnos que falle la unión y no el perno.

Fotografía 2.4 *Probetas con pernos*Fotografía 2.5 *Probetas con pernos*

2.4.- CALCULO DE UNA VIGA COMPUESTA CON UNIONES DE PERNOS Y/O CLAVOS HILTI.

Uno de los ejemplos más prácticos como decíamos anteriormente en donde podemos aplicar el cortante que calcularemos con la parte práctica son en vigas compuestas por un alma y las alas que irían unidas al alma con, en nuestro caso, Clavos Hilti y/o pernos. A continuación explicaremos los pasos a seguir para calcular el corte que resiste esta viga en función de las uniones, y así podremos dar cuenta si su resistencia esta restringida por la de las uniones o no.

Se sabe que el momento máximo de una viga simplemente apoyada con una carga distribuida sobre ella es:

$$M_{\text{máx}} = \frac{q * L^2}{8}$$

Dejando de lado las formulas para calcular la tensión de una viga, tales como:

$$\sigma_{yx} = \frac{M * y}{I_{yy}}$$

Nos centraremos solo en lo que respecta a nuestro tema, y eso es tensiones de corte. De un libro de mecánica de sólidos (Crandall, 1966) obtenemos la siguiente formula:

$$q_{yx} = \frac{V * Q}{I_{YY}}$$

En donde:

q_{yx} = Flujo cortante.

V = Fuerza cortante.

Q = Momento estático.

I_{yy} = inercia de la pieza.

El termino q_{yx} es sin duda la resultante de la tensión cortante τ_{yx} distribuida a través del ancho b de la viga. Nuestra deducción no nos da información acerca de la naturaleza de esta distribución, pero si hacemos la hipótesis de que la tensión cortante es uniforme a través de la viga, podemos estimar que τ_{yx} es:

$$\tau_{yx} = \frac{q_{yx}}{b} = \frac{V * Q}{b * I_{YY}}$$

De esta forma podremos limitar la fuerza cortante, ya que el resto de los datos los podemos obtener, el flujo cortante lo obtendremos de la experiencia práctica de este trabajo, el momento estático lo podemos calcular y la inercia va a depender de la forma y dimensiones de la viga.

Al cargar esta viga, la tensión de flexión desequilibrada que actúa sobre el área de la sección de las alas tiene que ser soportadas por el flujo cortante, flujo que averiguaremos con la experiencia práctica de la tesis, de esta manera se sabrá si la resistencia de la viga esta restringida por la unión o no.

Este calculo lo haremos posterior a la obtención del flujo cortante, que lo averiguaremos con la parte práctica de este trabajo.

2.5.- SUPOSICIONES PARA EL DISEÑO DE ELEMENTOS DE FERROCEMENTO A FLEXIÓN.

Para el diseño a flexión de la viga se tendrán en cuenta las siguientes suposiciones:

- Las secciones planas se mantienen planas hasta la rotura del elemento.
- Se considera al ferrocemento como un material homogéneo.
- No se contempla retracción ni creep en el mortero.
- Se considera una adherencia perfecta entre el hormigón y el acero, lo que implica que las deformaciones en el acero y el mortero en cualquier fibra tienen que ser iguales.
- Los esfuerzos internos permanecen en equilibrio.
- Es nula la contribución del mortero a tracción.
- La relación entre la distribución del esfuerzo por compresión en el mortero y su deformación será considerada satisfactoria por el uso de la distribución rectangular del esfuerzo de $0.85f'_c$ que se supondrá uniformemente distribuido en una zona de compresión equivalente a una distancia b_1c a partir de la fibra de deformación unitaria máxima en compresión. Donde “c” se considera desde la fibra de deformación unitaria máxima al eje neutro y se medirá en dirección perpendicular a dicho eje. Y el factor “ b_1 ” deberá tomarse como 0.85 para las resistencias del hormigón f'_c hasta 30 MPa. Para resistencias superiores a 30 MPa, b_1 disminuirá en forma lineal en 0.008 por cada MPa de aumento sobre 30 MPa, sin embargo, b_1 no debe ser menor de 0.65.
- Las deformaciones varían linealmente con la distancia desde la fibra neutra.
- La relación esfuerzo-deformación del mortero y el refuerzo son lineales para esfuerzos menores o iguales que el permitido para cargas de servicio.

- El diagrama esfuerzo-deformación del acero para el cálculo, debe escogerse del tipo de malla de acero que se disponga, especialmente para calcular los alargamientos que permiten comprobar el esfuerzo a que estarán sometidas las mallas. Como límites de fluencia se ocuparán los que aparecen en la siguiente tabla:

	Malla Cuadrada Soldada	Malla Hexagonal	Barra Longitudinal
f_y (kg/cm²)	5000	2000	2800

Tabla 2.2 *Características de los materiales*

CAPÍTULO III: FABRICACIÓN DE PROBETAS DE FERROCEMENTO

En este capítulo se describirán a grandes rasgos la fabricación de las probetas a ensayar. En este proceso se pueden diferenciar cuatro etapas importantes y la vez cronológicas para el resultado final de la viga. Estas etapas son: la fabricación del moldaje, fabricación de la armadura, el vaciado del mortero, y finalmente, el desmolde.

A continuación se describirán e ilustrarán mediante fotografías las cuatro partes antes mencionadas.

3.1.- FABRICACIÓN DEL MOLDAJE.

Previo a la fabricación del moldaje se ilustraron mediante un dibujo a escala las diferentes piezas componentes de los moldajes, con el fin de dimensionar y ubicar correctamente los materiales a utilizar. La disposición y dimensión de las diferentes piezas del moldaje se aprecia en la (Figura 4.1)

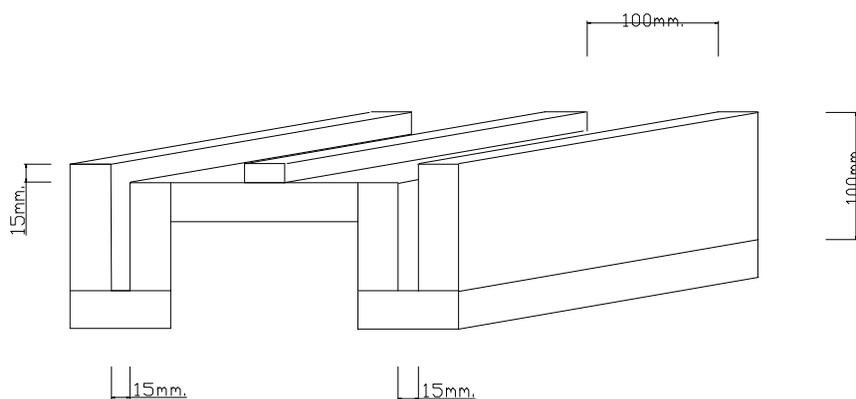


Figura 3.1 *Moldaje para perfiles*

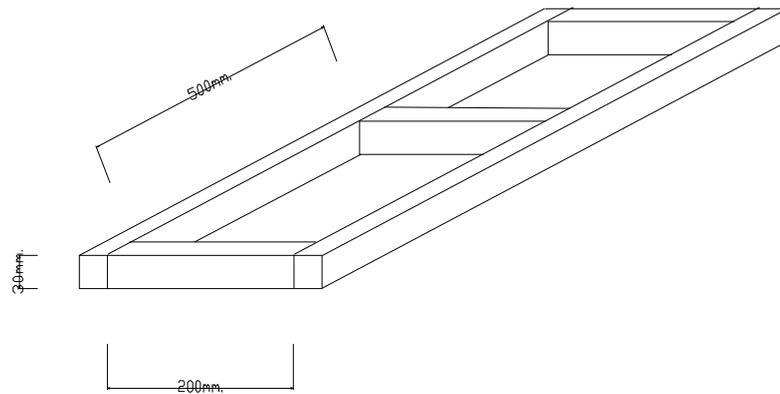


Figura 3.2 *Moldaje para pieza central*

Luego se procedió a dimensionar en las planchas los cortes a hacer. Una vez cortadas las piezas se unieron mediante tornillos de 1 ¼" dispuestos cada 20 cm.

Es importante señalar que una vez ensambladas las piezas se procedió a recubrir completamente la superficie que estará en contacto con el mortero, con desmoldante (aceite con petróleo), quedando la superficie como si estuviese plastificada, para así evitar que la madera pudiera absorber agua del mortero, cambiando así sus propiedades.



Fotografía 3.1 *Aplicación desmoldante*

3.2.- FABRICACIÓN DE LA ARMADURA.

Las armaduras fueron diseñadas tratando de semejar a la de estructuras de mayores dimensiones, ya que la idea es probar la resistencia al corte en la unión, así simulamos una unión normal, para esto fabricamos las 108 piezas que cuentan con fierro de 6 mm., malla acma c-139 y malla hexagonal de ¾" de abertura.

Una vez que la armadura se diseñó, se dimensionó con el propósito de hacer cortes exactos a la hora de ir armando la armadura que finalmente se depositará dentro del moldaje. Estas medidas son las que a continuación se muestran en la (Figura 4.3).

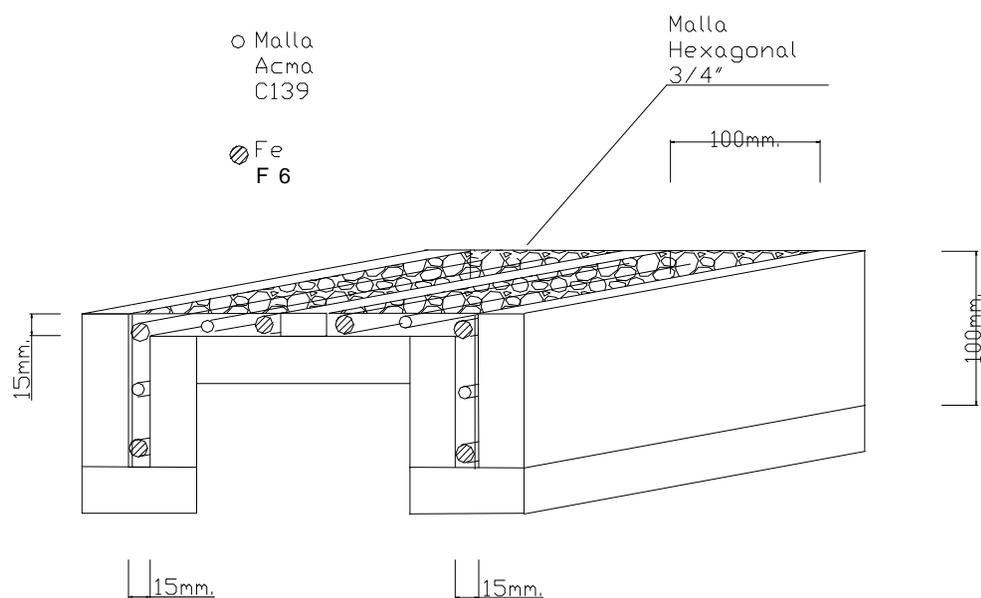


Figura 3.3 *Moldaje para perfiles con enfierradura y malla*

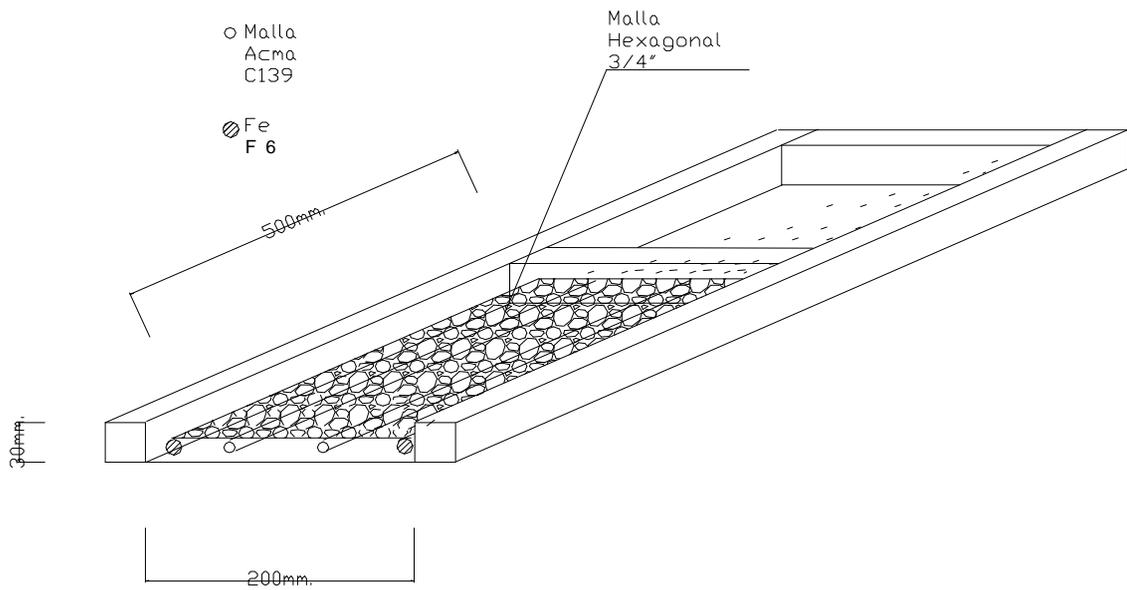


Figura 3.4 *Moldaje para pieza central con armadura y malla*

Antes de comenzar a armar o ensamblar la armadura se cortaron todas las piezas componentes de esta, vale decir, el fierro, la malla hexagonal y finalmente la malla soldada ACMA, para luego doblar esta última en forma de “L” como se indicó en la (Figura 4.3).

Se intentará que las mallas tengan dobleces en sus terminaciones (aprox. de 2 cm), además, serán amarradas a los fierros con alambre negro #18, con el fin de compactar y de darle más firmeza a la armadura para que actúe como un solo cuerpo. La malla hexagonal envuelve todo el conjunto y debe ir bien estirada.

A continuación en las fotografías se aprecia la armadura construida.



Fotografía 3.2 *Moldaje con armadura*



Fotografía 3.3 *Moldaje con armadura*

3.3.- VACIADO DEL MORTERO.

Una vez acordado el día y la hora de descarga del mortero con la empresa hormigonera, se le hicieron los últimos ajustes a las probetas para que sea depositado el mortero en forma correcta y cerca de donde serán ensayadas para no tener que moverlas tanto a la hora de hacer el ensayo, con esto, se evita el riesgo de que puedan sufrir algún daño.

Antes de que llegara el camión Mixer que trae la mezcla, se debieron tener los materiales o herramientas adecuadas para depositar de buena forma el mortero dentro de los moldajes, vale decir, carretillas, palas, vibradores de inmersión, platachos, etc.

El procedimiento de vaciado comienza descargando el mortero del mixer depositándolo en la carretillas, posterior a eso, se llevó en estas hasta el lugar en que se encontraban las vigas y se empezó a vaciar con las palas en el moldaje. Es importante decir que la mezcla se fue depositando por capas, y como el vibrador no entra en el moldaje, bastó con colocarlo por encima tocando la armadura y a la vez dando algunos golpes en la parte exterior del moldaje para que

tenga un buen vibrado y el mortero escurra en todo su interior, puesto que el mortero diseñó muy fluido con un cono aproximado de 20 cm.



Fotografía 3.4 *Terminaciones del mortero*

Una vez terminado el proceso de vaciado se afinó un poco la superficie libre con espátulas y platachos adecuadas para esto, para finalmente cubrir las probetas con polietileno a modo de protegerlo un poco del ambiente para obtener un mejor fraguado y curado.



Fotografía 3.5 *Terminaciones del mortero*

3.4.- DESMOLDE

El desmolde se realizó transcurridos 3 días del vaciado del hormigón a los moldajes. Como todas las uniones de los moldajes se hicieron con tornillos, el desmolde se realizó con más facilidad y rapidez, evitando así algún tipo de daño a las probetas.

Una vez retirados los moldajes, las probetas continuaron su proceso de endurecimiento hasta completar los días indicados para que estén en condiciones aptas para el ensayo, no sin antes perforarlas y unir las. Las probetas fueron mojadas a diario para favorecer su proceso.

Finalmente las probetas quedaron de esta forma:



Fotografía 3.6 *Piezas de ferrocemento*



Fotografía 3.7 *Piezas de ferrocemento*

3.5.- ARMADO DE LAS PROBETAS

Como se dijo anteriormente, las probetas con que realizaremos los ensayos están compuestas por una pieza central y dos perfiles tipo L todos de 50 centímetros de longitud, las cuales irán unidas con pernos y con Clavos Hilti, para lo cual necesitamos unir 36 probetas, 3 con un clavo, 3 con dos clavos, etc. hasta 3 con 6 clavos, y a su vez lo mismo con pernos.

La forma de la probeta la podemos ver en el siguiente ejemplo que muestra una probeta unida con un perno.

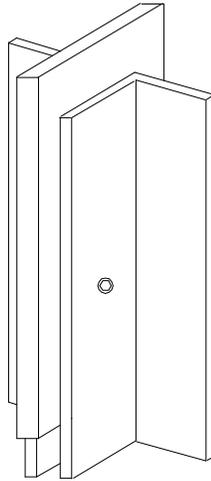


Figura 3.5 *Probeta para ensayo*

CAPÍTULO IV: ENSAYO REALIZADO A PROBETAS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL CORTE DE LA UNIÓN

4.1.- INTRODUCCIÓN.

A continuación se definirá y se darán características del ensayo a aplicar en las probetas de ferrocemento, además se darán pormenores de los elementos a utilizar en el *Ensayo* a realizar en el “Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción, L.E.M.C.O.”.

En este capítulo también se ensayaran las 36 probetas fabricadas como se especifico anteriormente y se recopilarán los datos de cada una de las probetas ensayadas, poniendo énfasis en resistencia que oponga la unión a la carga aplicada y sobre todo en la carga ultima que resista la unión, para luego poder determinar el cortante de la unión.

4.2.- GENERALIDADES DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL CORTE.

4.2.1.- Definición del Ensayo.

El Ensayo de resistencia al corte a aplicar sobre las probetas a construir consiste en aplicar carga axial en un extremo de la probeta para así hacer trabajar a corte la unión. De esta manera iremos obteniendo los valores de carga que logra resistir este tipo de unión, desde un clavo hasta seis, y de la misma manera lo haremos para los pernos. La forma de aplicar la carga a las probetas se aprecia en la siguiente foto.



Fotografía 4.1 *Ensayo de probetas.*



Fotografía 4.2 *Ensayo de probetas.*

4.2.2.- Motivo del Ensayo.

La idea de hacer este ensayo es para calcular o más bien para determinar el cortante que habrá entre las piezas con este tipo de unión, con Clavos Hilti, como también con pernos, y así determinar cual sería la mejor opción.

Otro motivo importante por el cual se hizo este ensayo es para conocer el comportamiento que tienen las piezas de ferrocemento con este tipo de uniones.

La idea de todo este ensayo es obtener un método sencillo y práctico para calcular el número de conectores que se requieren para una carga determinada y a la vez obtener el cortante para cada tipo de unión, para que permitan al ingeniero calculista diseñar con este tipo de unión.

4.3.- EQUIPO Y MATERIALES A UTILIZAR.

Para realizar en forma óptima el Ensayo resistencia al corte se necesitan diferentes elementos los que se deben aplicar en forma adecuada para tener éxito en el ensayo.

Los equipos y materiales a utilizar se pueden dividir en tres grupos principales que se nombran a continuación:

- *La Estructura de Carga:* dentro de este grupo los más importantes son el marco estructurado en perfilaría de acero bajo el cual se instala el elemento a ensayar y es el que soporta la fuerza ejercida por el pistón sobre la probeta, y el Pistón Hidráulico el cual puede ejercer cargas hasta de 20 toneladas.



Fotografía 4.3 *Estructura de carga.*

- *El Compresor:* aquí se distinguen tres elementos, el primero es la Palanca de Compresión y Descompresión, la cual nos sirve para aumentar o quitar carga en el pistón; Regulador de Velocidad de Carga, este controla el paso del flujo de aceite hidráulico en el interior del compresor; y por último, el Switch de Encendido del Compresor.



Fotografía 4.4 *Compresor.*

- *Medidor de Carga:* es electrónico y funciona a través de un sensor de carga conectado al pistón.



Fotografía 4.5 *Medidor de carga.*

4.4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla de resultado N°1

De acuerdo a las mediciones realizadas en el ensayo para las probetas unidas con clavos Hilti, la tabla queda así:

N° de Clavos	Carga en Kg.	Separación en cm.	Tipo de falla
1	430	30	Fractura por carga
1	310	30	Fractura por carga
1	340	30	Fractura por carga
2	640	20	Fractura por carga
2	800	20	Fractura por carga
2	530	20	Fractura en armado
3	780	15	Fractura por carga
3	1170	15	Fractura por carga
3	640	15	Fractura en armado
4	1400	10	Fractura por carga
4	1660	10	Fractura por carga
4	1200	10	Fractura por carga
5	1780	7.5	Fractura por carga
5	1520	7,5	Fractura por carga
5	1420	7,5	Fractura por carga
6	1200	6	Fractura en armado
6	1950	6	Fractura por carga
6	1725	6	Fractura por carga

Tabla 4.1 *Resultado ensayos.*

Las probetas que se fracturaron en el armado que aparecen con color gris en la tabla, no serán consideradas en el siguiente gráfico para que no afecten a la curva que queremos obtener.

A continuación representaremos los puntos en el siguiente gráfico Carga versus N° de Clavos.

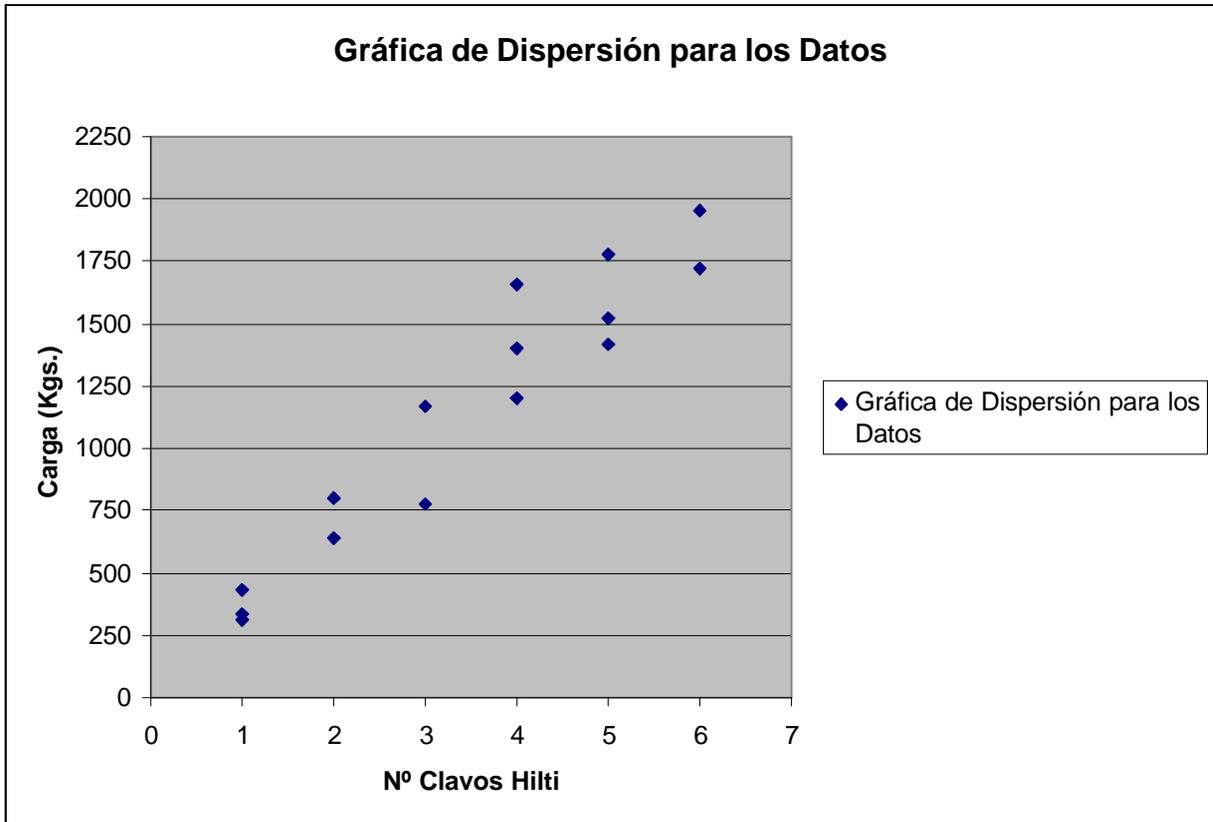


Gráfico 4.1 *Dispersión de los datos obtenidos.*

Por lo que podemos apreciar hay una fuerte tendencia de “y” a aumentar cuando aumenta “x”, esto es, los valores mayores de carga tienden a estar asociados con valores de mayor n° de clavos Hilti, una relación positiva entre las variables.

Al parecer se podría pronosticar el valor de “y” a partir del valor “x” si se determina una línea que pasara de manera razonable cerca de los puntos en la gráfica. En otras palabras, hay evidencia de una apreciable (aunque no perfecta) relación lineal entre las dos variables.

Para esto usaremos el modelo estadístico más apropiado, el cual se llama Modelo de regresión lineal simple a través del principio de mínimos cuadrados (Devore, 2004).

La siguiente es una tabla con los datos representativos, presentados en un formato tabular adecuado para calcular los valores de las estadísticas de resumen.

Obs.	X	Y	X^2	XY	Y^2
1	1	430	1	430	184900
2	1	310	1	310	96100
3	1	340	1	340	115600
4	2	640	4	1280	409600
5	2	800	4	1600	640000
6	3	780	9	2340	608400
7	3	1170	9	3510	1368900
8	4	1400	16	5600	1960000
9	4	1660	16	6640	2755600
10	4	1200	16	4800	1440000
11	5	1780	25	8900	3168400
12	5	1520	25	7600	2310400
13	5	1420	25	7100	2016400
14	6	1950	36	11700	3802500
15	6	1725	36	10350	2975625
SUMA	52	17125	224	72500	23852425

Tabla 4.2 Datos representativos para calcular los valores de las estadísticas.

$$\text{Así, } \bar{x} = 3.466667, \bar{y} = 1141.666667 \text{ y}$$

$$\beta_1 = \frac{s_{xy}}{s_{xx}} = \frac{72500 - (52) * (17125) / 15}{224 - (52)^2 / 15}$$

$$= 300.3048782$$

$$\beta_0 = 1141.666667 - (300.3048782) * (3.466667)$$

$$= 100.609656$$

Estimamos que el cambio esperado de carga, asociado con el aumento del número de Clavos Hilti de un clavo, sea 300.305%. La ecuación de la recta estimada de regresión, o recta de mínimos cuadrados, es $y = 300.305x + 100.61$, con la restricción $X \in [1, \infty [$.

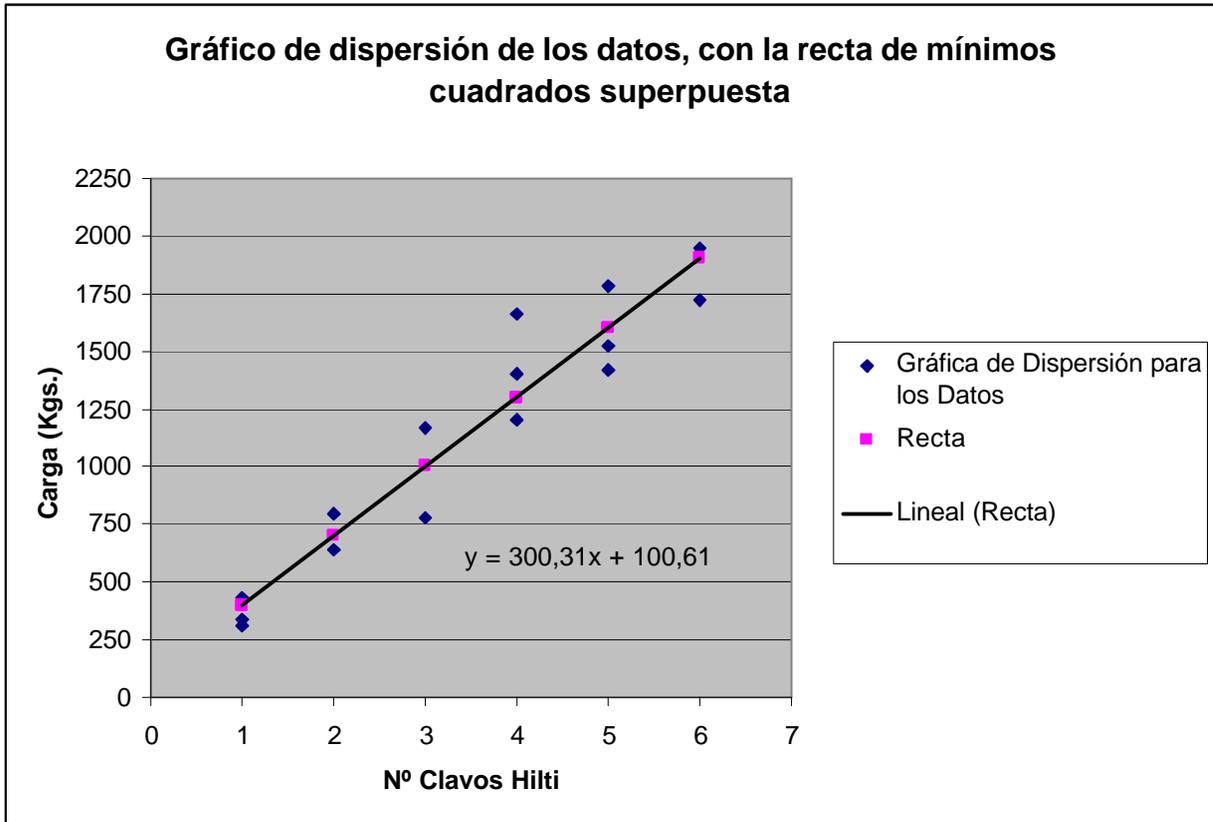


Gráfico 4.2 Dispersión de los datos obtenidos, con recta superpuesta.

Un buen indicador de que la recta que obtuvimos por el método de mínimos cuadrados es una buena aproximación es **el coeficiente de determinación**, representado por r^2

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

Donde: SSE es la suma de cuadrados del error.
 SST es suma total de cuadrados.

SSE es la suma de desviaciones cuadradas alrededor de la recta de mínimos cuadrados $y = 300.305x + 100.61$ y SST es la suma de desviaciones cuadradas alrededor de la recta horizontal en la altura \bar{y} (entonces las desviaciones verticales son $y_i - \bar{y}$).

$$\begin{aligned} \text{SSE} &= 23852425 - 100.61 * 17125 - 300.305 * 72500 \\ &= 357366.25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SST} &= 23852425 - (17125)^2 / 15 \\ &= 4301383.33 \end{aligned}$$

Entonces, el coeficiente de determinación es

$$r^2 = 1 - \frac{357366.25}{4301383.33}$$

$$r^2 = 0.9169$$

$$r^2 \approx 0.917$$

Esto es, el 91.7% de la variación observada de Carga es atribuible a (se puede explicar por) la relación lineal aproximada entre la Carga y el número de Clavos Hilti, resultado muy impresionante. (Muchos científicos sociales ansían llegar a un valor de r^2 mucho más alto que 0.5)

Tabla de resultado N°2

De acuerdo a las mediciones realizadas en el ensayo para las probetas unidas con pernos, la tabla queda así:

N° de Pernos	Carga en Kg.	Separación en cm.	Tipo de Falla
1	1940	30	Fractura por carga
1	2520	30	Fractura por carga
1	1910	30	Fractura por carga
2	2785	20	Fractura por carga
2	2500	20	Fractura en armado
2	3200	20	Fractura por carga
3	3680	15	Fractura por carga
3	4280	15	Fractura por carga
3	4640	15	Fractura por carga
4	5440	10	Fractura por carga
4	4600	10	Fractura por carga
4	5435	10	Fractura por carga
5	5350	7,5	Fractura por carga
5	4200	7,5	Fractura en armado
5	5935	7,5	Fractura por carga
6	6900	6	Fractura por carga
6	5800	6	Fractura por carga
6	6100	6	Fractura por carga

Tabla 4.3 *Resultado ensayos.*

Las probetas que se fracturaron en el armado que aparecen con color gris en la tabla, no serán consideradas en el siguiente gráfico para que no afecten a la curva que queremos obtener.

A continuación representaremos los puntos en el siguiente grafico Carga versus N° de Pernos.

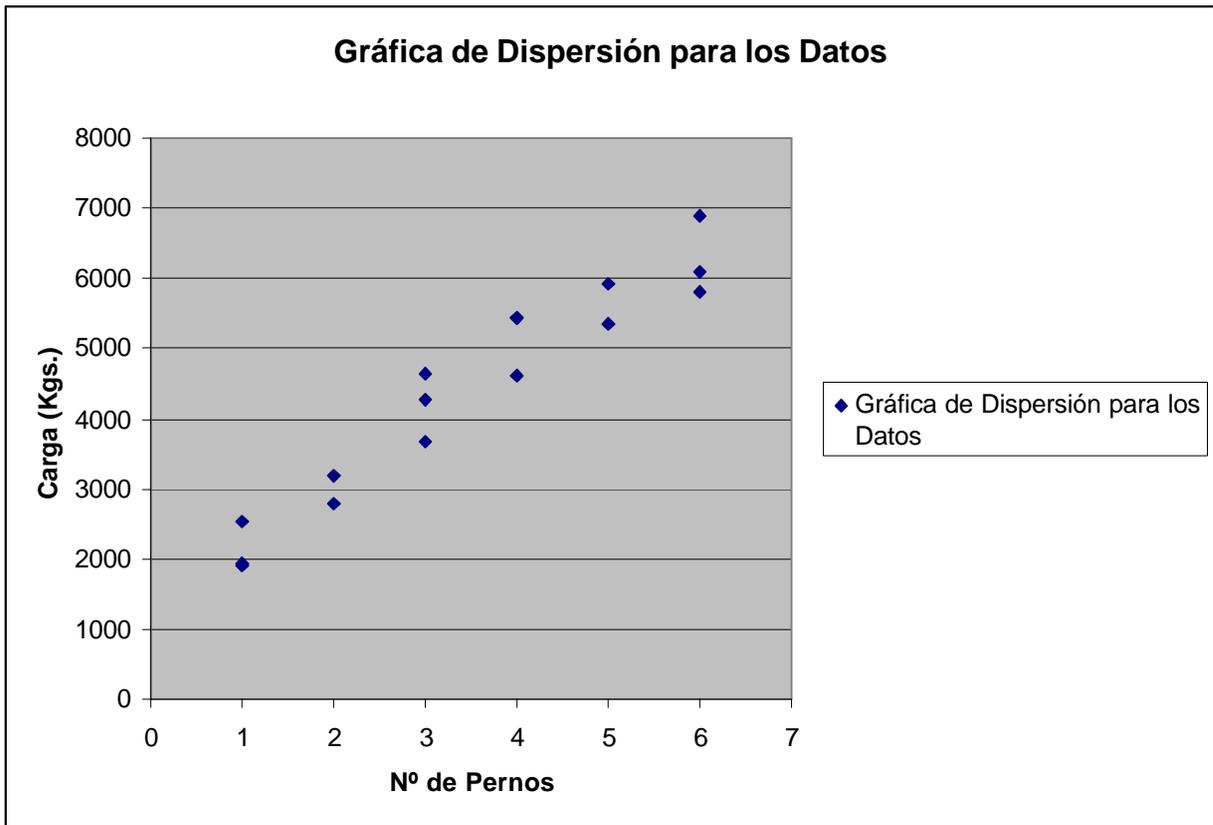


Grafico 4.3 *Dispersión de los datos obtenidos.*

Por lo que podemos también apreciar hay una fuerte tendencia de “y” a aumentar cuando aumenta “x”, esto es, los valores mayores de carga tienden a estar asociados con valores de mayor n° de Pernos, una relación positiva entre la variables.

Al parecer se podría pronosticar el valor de “y” a partir del valor “x” si se determina una línea que pasara de manera razonable cerca de los puntos en la gráfica. En otras palabras, hay evidencia de una apreciable (aunque no perfecta) relación lineal entre las dos variables.

Para esto usaremos el modelo estadístico más apropiado, el cual se llama Modelo de regresión lineal simple a través del principio de mínimos cuadrados

La siguiente es una tabla con los datos representativos, presentados en un formato tabular adecuado para calcular los valores de las estadísticas de resumen.

Obs.	X	Y	X ²	XY	Y ²
1	1	1940	1	1940	3763600
2	1	2520	1	2520	6350400
3	1	1910	1	1910	3648100
4	2	2785	4	5570	7756225
5	2	3200	4	6400	10240000
6	3	3680	9	11040	13542400
7	3	4280	9	12840	18318400
8	3	4640	9	13920	21529600
9	4	5440	16	21760	29593600
10	4	4600	16	18400	21160000
11	4	5435	16	21740	29539225
12	5	5350	25	26750	28622500
13	5	5935	25	29675	35224225
14	6	6900	36	41400	47610000
15	6	5800	36	34800	33640000
16	6	6100	36	36600	37210000
SUMA	56	70515	244	287265	347748275

Tabla 4.4 Datos representativos para calcular los valores de las estadísticas

$$\text{Así, } \bar{x} = 3.5, \bar{y} = 4407.1875 \text{ y}$$

$$\beta_1 = \frac{s_{xy}}{s_{xx}} = \frac{287265 - (56) * (70515) / 16}{244 - (56)^2 / 16}$$

$$= 842.96875$$

$$\beta_0 = 4407.1875 - (842.96875) * (3.5)$$

$$= 1456.796875$$

Estimamos que el cambio esperado de carga, asociado con el aumento del número de Pernos de un Perno, sea 842.96875%. La ecuación de la recta estimada de regresión, o recta de mínimos cuadrados, es $y = 842.97x + 1456.8$, con la restricción $X \in [1, \infty [$.

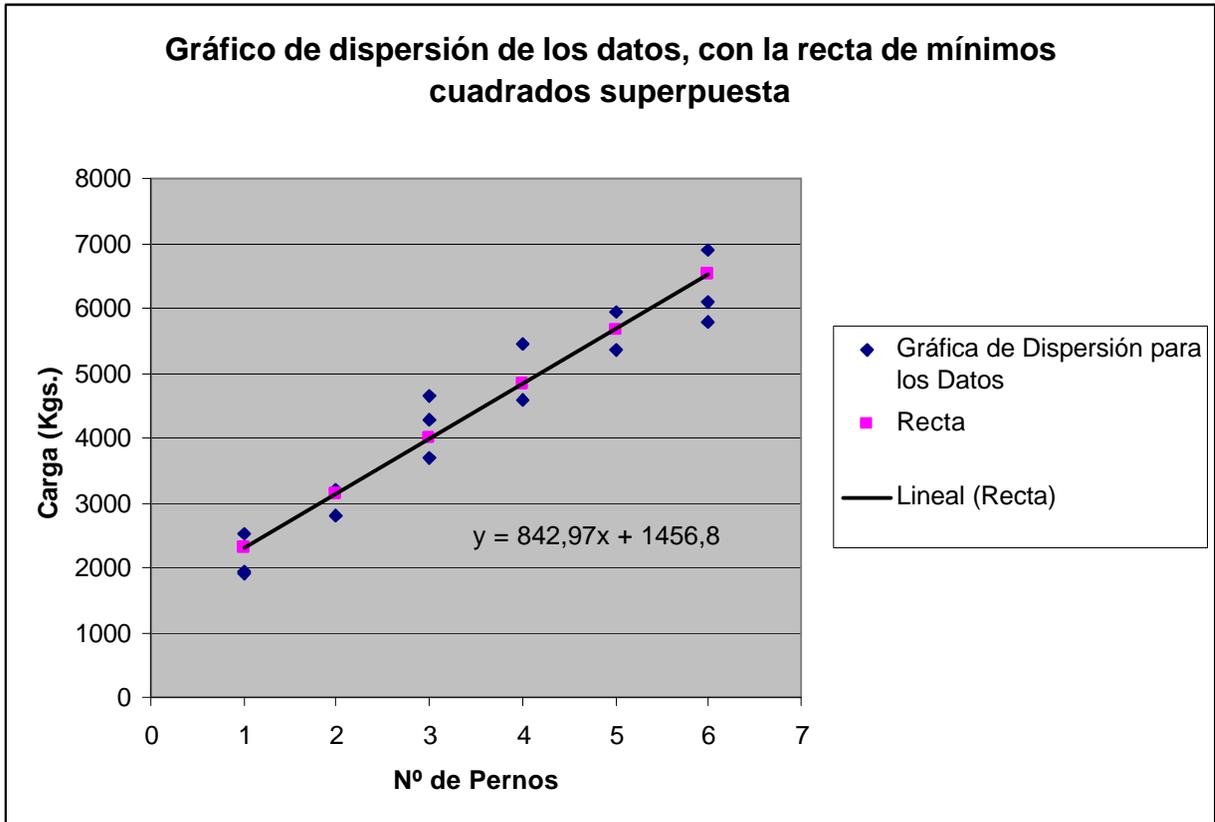


Grafico 4.4 *Dispersión de los datos obtenidos, con recta superpuesta.*

Un buen indicador de que la recta que obtuvimos por el método de mínimos cuadrados es una buena aproximación es **el coeficiente de determinación**, representado por r^2

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

Donde: SSE es la suma de cuadrados del error.
 SST es suma total de cuadrados.

SSE es la suma de desviaciones cuadradas alrededor de la recta de mínimos cuadrados $y = 842.97x + 1456.8$ y SST es la suma de desviaciones cuadradas alrededor de la recta horizontal en la altura \bar{y} (entonces las desviaciones verticales son $y_i - \bar{y}$).

$$\begin{aligned} \text{SSE} &= 347748275 - 1456.8 * 70515 - 842.97 * 287265 \\ &= 2866245.9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SST} &= 347748275 - (70515)^2 / 16 \\ &= 36975448.4 \end{aligned}$$

Entonces, el coeficiente de determinación es

$$r^2 = 1 - \frac{2866245.9}{36975448.4}$$

$$r^2 = 0.9224824573$$

$$r^2 \approx 0.922$$

Esto es, el 92.2% de la variación observada de Carga es atribuible a (se puede explicar por) la relación lineal aproximada entre la Carga y el número de Pernos, resultado muy impresionante. (Muchos científicos sociales ansían llegar a un valor de r^2 mucho más alto que 0.5)

4.4.1.- DETERMINACIÓN DE LAS RECTAS DE DISEÑO

4.4.1.1.- Recta Resultante para Clavos Hilti

A partir de los resultados obtenidos y asumiendo un factor de seguridad de 3 (un tercio de la carga de rotura) obtendremos una nueva tabla.

Nº de Clavos	Carga en Kg.	Separación en cm.	Tipo de falla
1	143.333	30	Fractura por carga
1	103.333	30	Fractura por carga
1	113.333	30	Fractura por carga
2	213.333	20	Fractura por carga
2	266.666	20	Fractura por carga
2	176.666	20	Fractura en armado
3	260	15	Fractura por carga
3	390	15	Fractura por carga
3	213.333	15	Fractura en armado
4	466.666	10	Fractura por carga
4	553.333	10	Fractura por carga
4	400	10	Fractura por carga
5	593.333	7.5	Fractura por carga
5	506.666	7,5	Fractura por carga
5	473.333	7,5	Fractura por carga
6	400	6	Fractura en armado
6	650	6	Fractura por carga
6	575	6	Fractura por carga

Tabla 4.5 Resultado ensayos.

Las probetas que se fracturaron en el armado que aparecen con color gris en la tabla, no serán consideradas en el siguiente gráfico para que no afecten a la curva que queremos obtener.

A continuación representaremos los puntos en el siguiente gráfico Carga versus N° de Clavos.

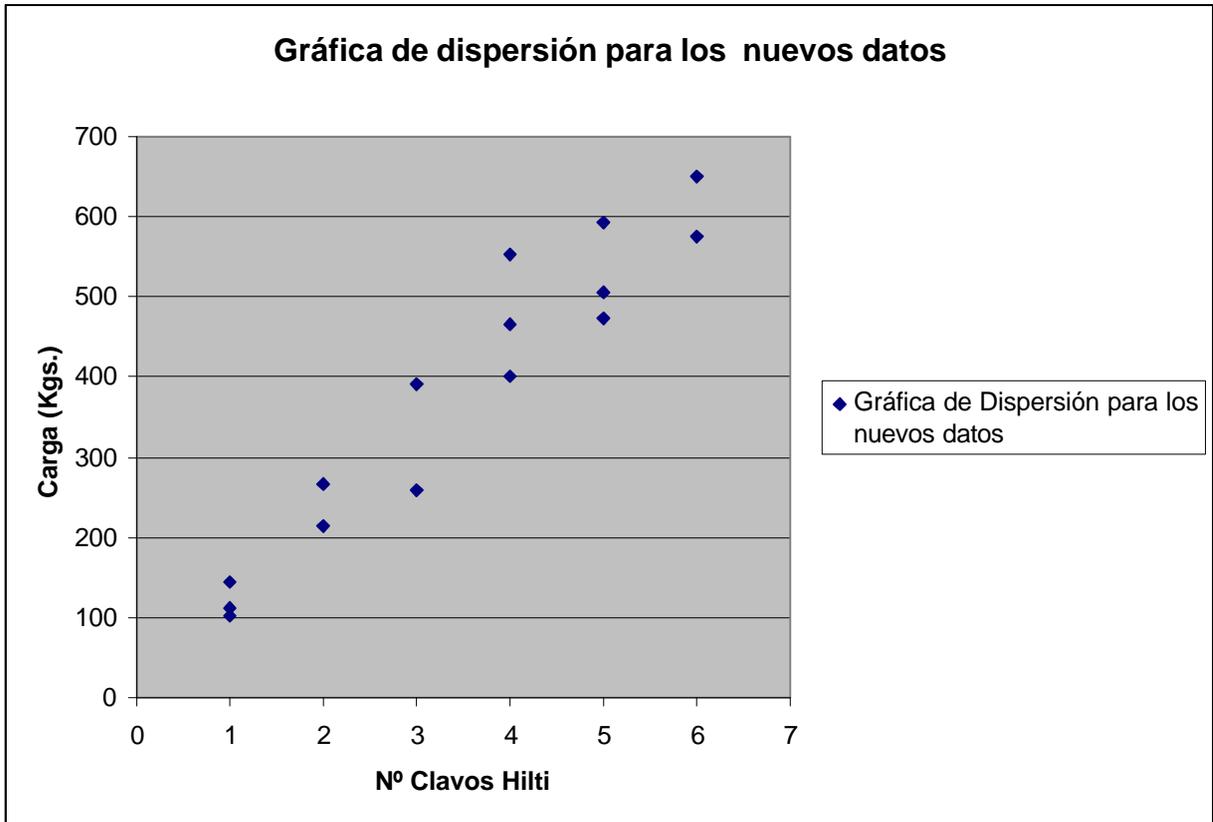


Grafico 4.5 *Dispersión de los datos obtenidos.*

Por lo que podemos apreciar hay una fuerte tendencia de “y” a aumentar cuando aumenta “x”, esto es, los valores mayores de carga tienden a estar asociados con valores de mayor n° de clavos Hilti, una relación positiva entre las variables.

Al parecer se podría pronosticar el valor de “y” a partir del valor “x” si se determina una línea que pasara de manera razonable cerca de los puntos en la gráfica. En otras palabras, hay evidencia de una apreciable (aunque no perfecta) relación lineal entre las dos variables.

Para esto usaremos el modelo estadístico más apropiado, el cual se llama Modelo de regresión lineal simple a través del principio de mínimos cuadrados

La siguiente es una tabla con los datos representativos, presentados en un formato tabular adecuado para calcular los valores de las estadísticas de resumen.

Obs.	X	Y	X ²	XY	Y ²
1	1	143,333	1	143,333	20544,35
2	1	103,333	1	103,333	10677,71
3	1	113,333	1	113,333	12844,37
4	2	213,333	4	426,666	45510,97
5	2	266,666	4	533,332	71110,76
6	3	260	9	780	67600
7	3	390	9	1170	152100
8	4	466,666	16	1866,664	217777,2
9	4	553,333	16	2213,332	306177,4
10	4	400	16	1600	160000
11	5	593,333	25	2966,665	352044
12	5	506,666	25	2533,33	256710,4
13	5	473,333	25	2366,665	224044,1
14	6	650	36	3900	422500
15	6	575	36	3450	330625
SUMA	52	5708,329	224	24166,65	2650266

Tabla 4.6 Datos representativos para calcular los valores de las estadísticas

$$\text{Así, } \bar{x} = 3.466667, \bar{y} = 380.55527 \text{ y}$$

$$\beta_1 = \frac{s_{xy}}{s_{xx}} = \frac{24166.65 - (52) * (5708.329) / 15}{224 - (52)^2 / 15}$$

$$= 100.1015884$$

$$\beta_0 = 380.55527 - (100.1015884) * (3.466667)$$

$$= 33.5363968$$

Estimamos que el cambio esperado de carga, asociado con el aumento del número de Clavos Hilti de un clavo, sea 100.101%. La ecuación de la recta estimada de regresión, o recta de mínimos cuadrados, es $y = 100.101x + 33.54$, con la restricción $X \in [1, \infty [$.

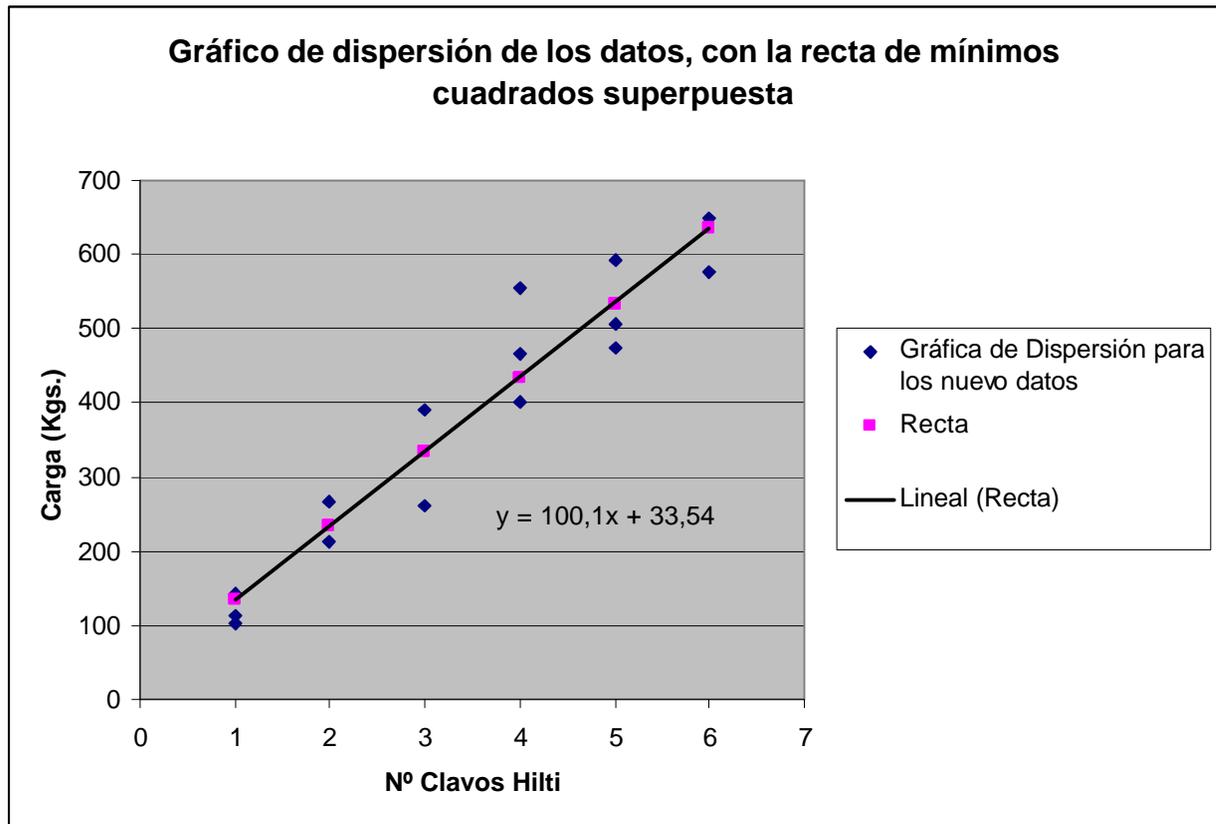


Grafico 4.6 *Dispersión de los datos obtenidos, con recta superpuesta.*

Un buen indicador de que la recta que obtuvimos por el método de mínimos cuadrados es una buena aproximación es **el coeficiente de determinación**, representado por r^2

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

Donde: SSE es la suma de cuadrados del error.
 SST es suma total de cuadrados.

SSE es la suma de desviaciones cuadradas alrededor de la recta de mínimos cuadrados $y = 100.101x + 33.54$ y SST es la suma de desviaciones cuadradas alrededor de la recta horizontal en la altura \bar{y} (entonces las desviaciones verticales son $y_i - \bar{y}$).

$$\begin{aligned} \text{SSE} &= 2650266 - 33.54 * 5708,329 - 100.101 * 24166,65 \\ &= 39702.814 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SST} &= 2650266 - (5708,329)^2 / 15 \\ &= 477931.335 \end{aligned}$$

Entonces, el coeficiente de determinación es

$$r^2 = 1 - \frac{39702.814}{477931.335}$$

$$r^2 = 0.9169$$

$$r^2 \approx 0.917$$

Esto es, el 91.7% de la variación observada de Carga es atribuible a (se puede explicar por) la relación lineal aproximada entre la Carga y el numero de Clavos Hilti, resultado muy impresionante. (Muchos científicos sociales ansían llegar a un valor de r^2 mucho más alto que 0.5)

4.4.1.2.- Recta resultante para pernos

A partir de los resultados obtenidos y asumiendo un factor de seguridad de 3 (un tercio de la carga de rotura) obtendremos una nueva tabla.

N° de Pernos	Carga en Kg.	Separación en cm.	Tipo de Falla
1	646.666	30	Fractura por carga
1	840	30	Fractura por carga
1	636.666	30	Fractura por carga
2	928.333	20	Fractura por carga
2	833.333	20	Fractura en armado
2	1066.666	20	Fractura por carga
3	1226.666	15	Fractura por carga
3	1426.666	15	Fractura por carga
3	1546.666	15	Fractura por carga
4	1813.333	10	Fractura por carga
4	1533.333	10	Fractura por carga
4	1811.666	10	Fractura por carga
5	1783.333	7,5	Fractura por carga
5	1400	7,5	Fractura en armado
5	1978.333	7,5	Fractura por carga
6	2300	6	Fractura por carga
6	1933.333	6	Fractura por carga
6	2033.333	6	Fractura por carga

Tabla 4.7 *Resultado ensayos.*

Las probetas que se fracturaron en el armado que aparecen con color gris en la tabla, no serán consideradas en el siguiente gráfico para que no afecten a la curva que queremos obtener.

A continuación representaremos los puntos en el siguiente grafico Carga versus N° de Pernos.

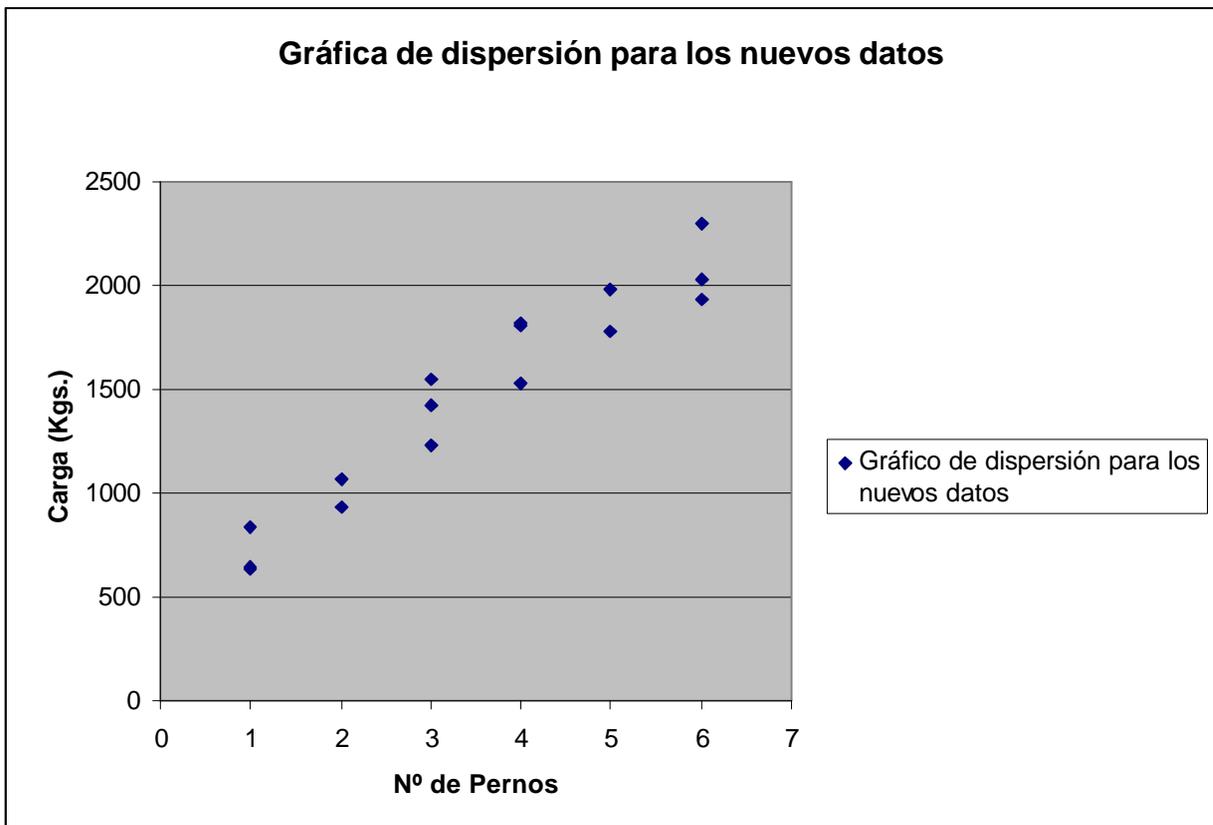


Grafico 4.7 *Dispersión de los datos obtenidos.*

Por lo que podemos también apreciar hay una fuerte tendencia de “y” a aumentar cuando aumenta “x”, esto es, los valores mayores de carga tienden a estar asociados con valores de mayor n° de Pernos, una relación positiva entre la variables.

Al parecer se podría pronosticar el valor de “y” a partir del valor “x” si se determina una línea que pasara de manera razonable cerca de los puntos en la gráfica. En otras palabras, hay evidencia de una apreciable (aunque no perfecta) relación lineal entre las dos variables.

Para esto usaremos el modelo estadístico más apropiado, el cual se llama Modelo de regresión lineal simple a través del principio de mínimos cuadrados

La siguiente es una tabla con los datos representativos, presentados en un formato tabular adecuado para calcular los valores de las estadísticas de resumen.

Obs.	X	Y	X ²	XY	Y ²
1	1	646,666	1	646,666	418176,916
2	1	840	1	840	705600
3	1	636,666	1	636,666	405343,596
4	2	928,333	4	1856,666	861802,159
5	2	1066,666	4	2133,332	1137776,36
6	3	1226,666	9	3679,998	1504709,48
7	3	1426,666	9	4279,998	2035375,88
8	3	1546,666	9	4639,998	2392175,72
9	4	1813,333	16	7253,332	3288176,57
10	4	1533,333	16	6133,332	2351110,09
11	4	1811,666	16	7246,664	3282133,7
12	5	1783,333	25	8916,665	3180276,59
13	5	1978,333	25	9891,665	3913801,46
14	6	2300	36	13800	5290000
15	6	1933,333	36	11600	3737776,49
16	6	2033,33	36	12199,98	4134430,89
SUMA	56	23504,99	244	95754,96	38638665,9

Tabla 4.8 Datos representativos para calcular los valores de las estadísticas

$$\text{Así, } \bar{x} = 3.5, \bar{y} = 1469.061875 \text{ y}$$

$$\beta_1 = \frac{s_{xy}}{s_{xx}} = \frac{95754.96 - (56) * (23504.99) / 16}{244 - (56)^2 / 16}$$

$$= 280.9894792$$

$$\beta_0 = 1469.061875 - (280.9894792) * (3.5)$$

$$= 485.5986978$$

Estimamos que el cambio esperado de carga, asociado con el aumento del número de Pernos de un Perno, sea 281%. La ecuación de la recta estimada de regresión, o recta de mínimos cuadrados, es $y = 281x + 485,6$, con la restricción $X \in [1, \infty [$.

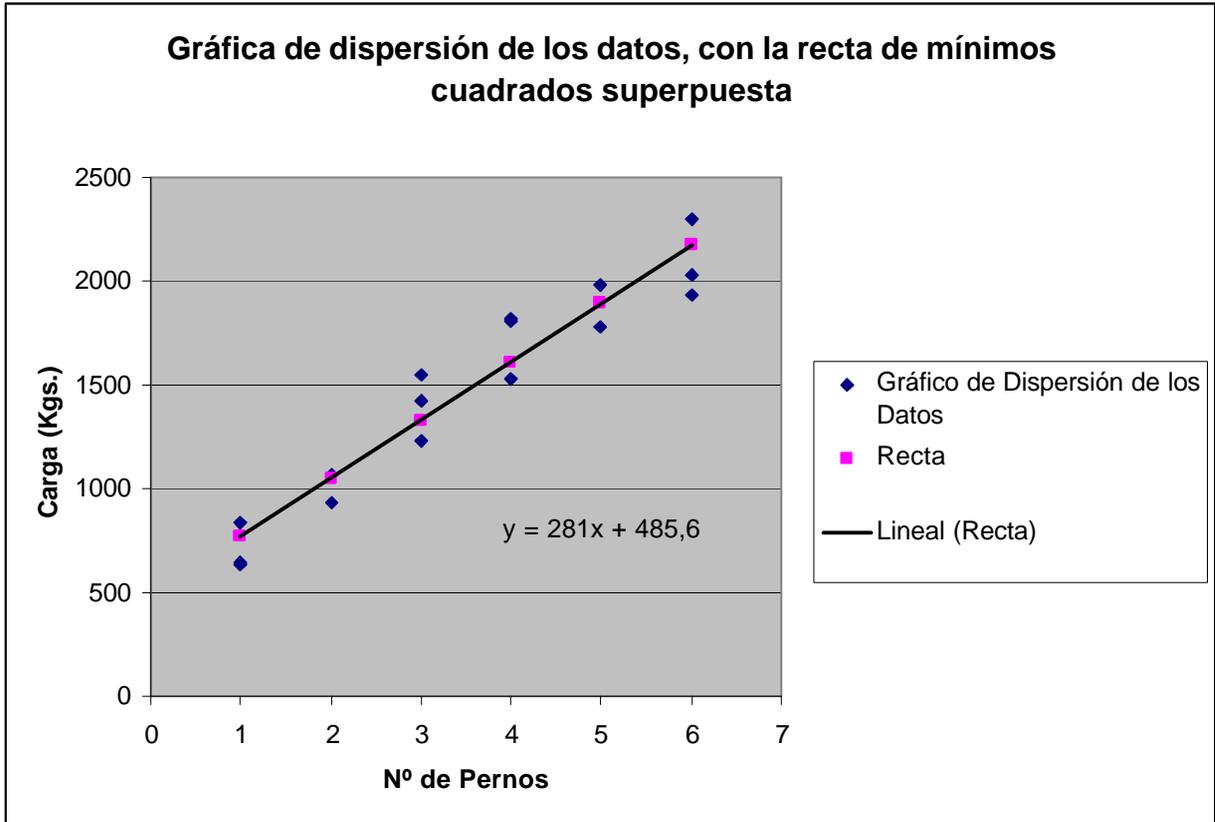


Gráfico 4.8 *Dispersión de los datos obtenidos, con recta superpuesta.*

Un buen indicador de que la recta que obtuvimos por el método de mínimos cuadrados es una buena aproximación es **el coeficiente de determinación**, representado por r^2

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

Donde: SSE es la suma de cuadrados del error.

SST es suma total de cuadrados.

SSE es la suma de desviaciones cuadradas alrededor de la recta de mínimos cuadrados $y = 281x + 485.6$ y SST es la suma de desviaciones cuadradas alrededor de la recta horizontal en la altura \bar{y} (entonces las desviaciones verticales son $y_i - \bar{y}$).

$$\begin{aligned} \text{SSE} &= 38638665,9 - 485,6 * 23504,99 - 281 * 95754,96 \\ &= 317499 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SST} &= 38638665,9 - (23504,99)^2 / 16 \\ &= 4108381,22 \end{aligned}$$

Entonces, el coeficiente de determinación es

$$r^2 = 1 - \frac{317499}{4108381,22}$$

$$r^2 = 0,922719$$

$$r^2 \approx 0,922$$

Esto es, el 92.2% de la variación observada de Carga es atribuible a (se puede explicar por) la relación lineal aproximada entre la Carga y el número de Pernos, resultado muy impresionante. (Muchos científicos sociales ansían llegar a un valor de r^2 mucho más alto que 0.5)

4.4.2.- DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE DISEÑO DEL FLUJO CORTANTE EN FUNCIÓN DE LA SEPARACIÓN DE LOS CONECTORES.

4.4.2.1.- Curva resultante para Clavos Hilti

A partir de los resultados obtenidos y usando un factor de seguridad de 3 (un tercio de la carga de rotura) obtendremos una nueva tabla.

Tabla con factor de seguridad para Flujo Cortante de Clavos Hilti.

Separación en cm.	Carga en Kgs.	F. Cortante en Kgs./ml
30	133.641	445.47
20	233.742	1168.71
15	333.843	2225.62
10	433.944	4339.44
7,5	534.045	7120.599
6	634.146	10569.1

Tabla 4.9 Valores con factor de seguridad para Flujo Cortante de Clavos Hilti.

Analizando los datos se tiene la siguiente ecuación de la curva resultante:

$$Y = 359410 X^{-1.9305}$$

En donde:

X = Separación de los conectores (cm.)

Y = Flujo Cortante (Kgs. /MI)

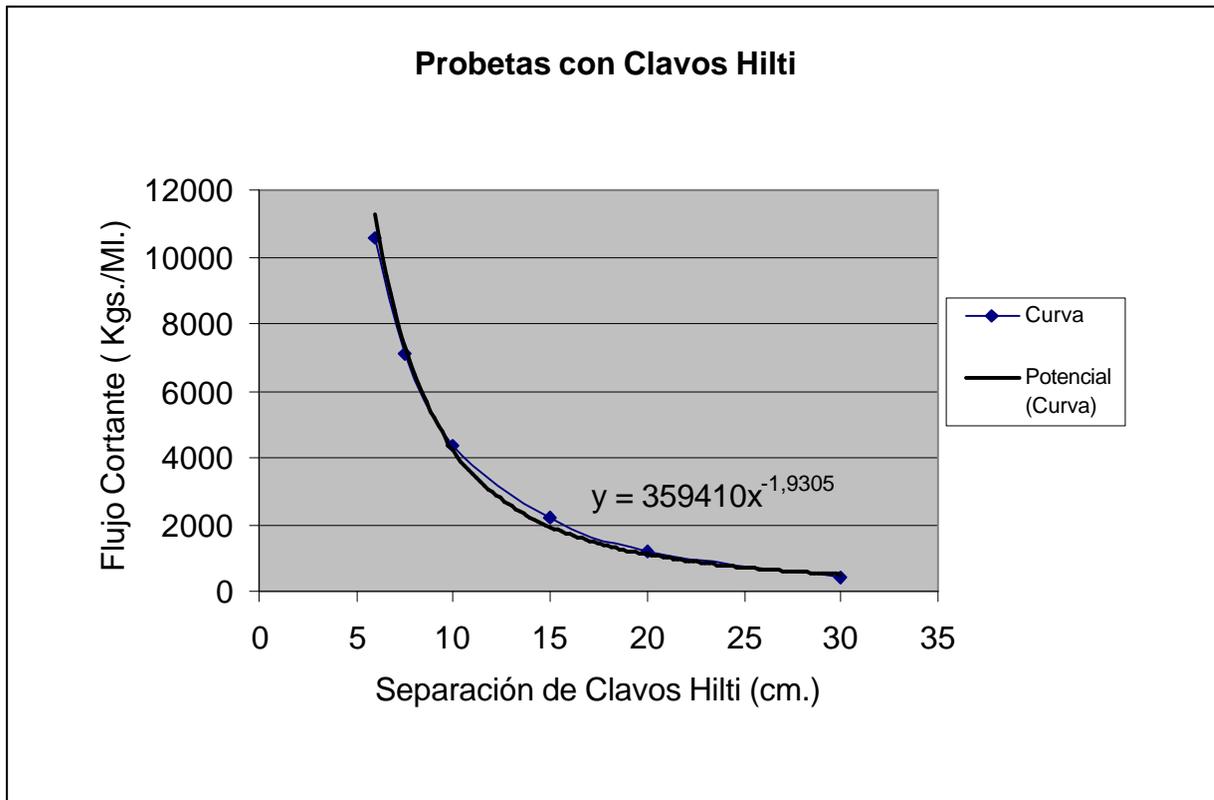


Grafico 4.9 Curva F. Cortante con curva aproximada conocida

4.4.2.2.- Curva resultante para Pernos

A partir de los resultados obtenidos y usando un factor de seguridad de 3 (un tercio de la carga de rotura) obtenemos una nueva tabla.

Tabla con factor de seguridad para Flujo Cortante de Pernos.

Separación en cm.	Carga en Kgs.	F. Cortante en kgs./ml
30	766.6	2555.33
20	1047.6	5238
15	1328.6	8857.33
10	1609.6	16096
7,5	1890.6	25207.99
6	2171.6	36193.33

Tabla 4.10 Valores con factor de seguridad para Flujo Cortante de Pernos

Analizando los datos se tiene la siguiente ecuación de la curva resultante:

$$Y = 685549 X^{-1.6308}$$

En donde:

X = Separación de los conectores (cm)

Y = Flujo Cortante (Kgs. /ml)

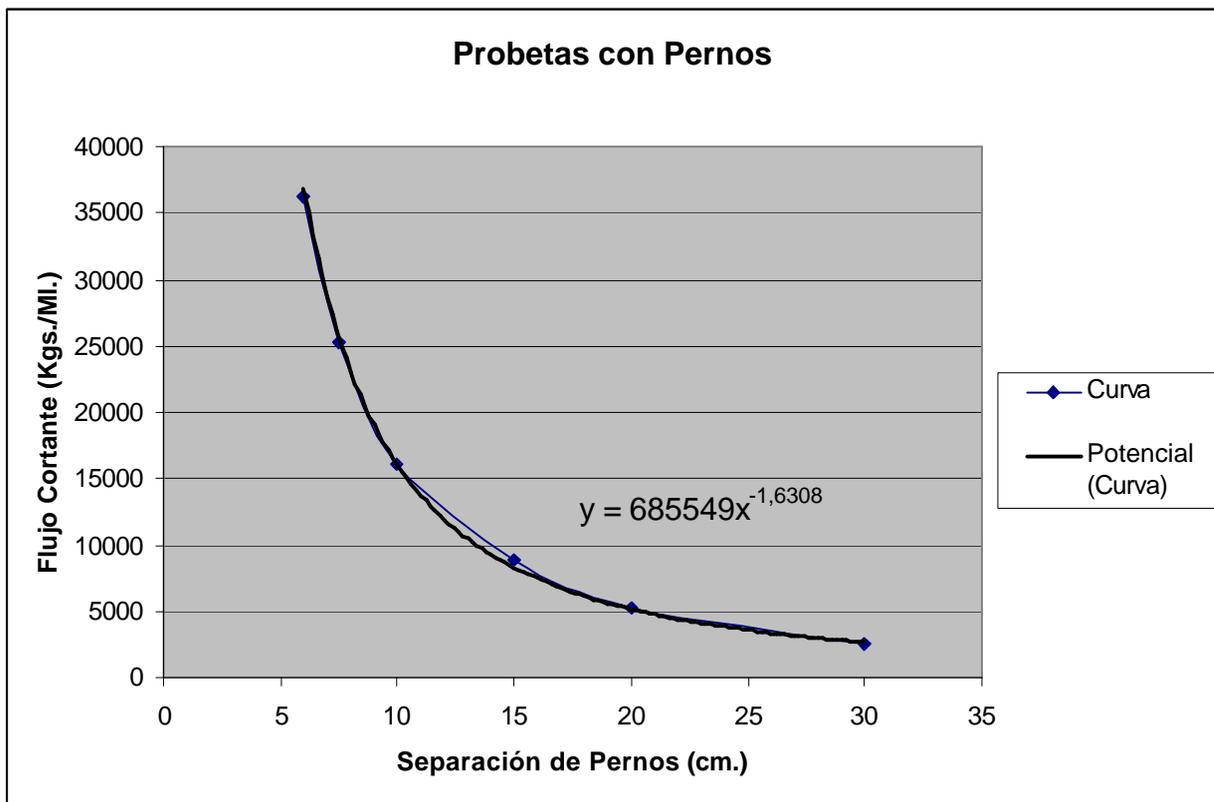


Gráfico 4.10 Curva F. Cortante con curva aproximada conocida

4.5.- COMPORTAMIENTO DEL FERROCEMENTO EN EL ENSAYO

Luego de haber ensayado las 36 probetas, 18 con clavos hilti y 18 con pernos pudimos observar varias formas de fallas, como también la forma en que trabajaba cada tipo de unión, de esto hablaremos a continuación:

4.5.1.- Fallas en las uniones con Clavos Hilti.

En las probetas unidas con Clavos Hilti al momento de cargarlas iban mostrando fisuras pero las fallas fueron por aplastamiento local en primera instancia, como se aprecia en la foto, luego después de esto se producía el desclave definitivo.



Fotografía 4.6 Fallas en probetas con Clavos Hilti



Fotografía 4.7 Fallas en probetas con Clavos Hilti

4.5.2.- Fallas en las uniones con Pernos

En las probetas unidas con Pernos al momento de cargarlas iban mostrando fisuras alrededor de los pernos, pero las fallas fueron por aplastamiento local en primera instancia, como se aprecia en la foto, el perno se va doblando y a la vez la golilla se va incrustando en la pieza de ferrocemento. También hubo fallas de las piezas en las patas donde se apoyaba, pero siempre las hicimos fallar en la unión, ya que las patas al fallar se volvían a afirmar y así podíamos ver la falla en la unión.



Fotografía 4.8 *Falla en probeta con Perno*



Fotografía 4.9 *Falla en patas de la Probeta*

4.5.3.- Deformación de las probetas

Este parámetro no era la idea considerarlo en este estudio pero lo mencionaremos en este punto solo superficialmente, contando como varió en este ensayo.

Como el medidor de carga registra hasta la carga ultima y el compresor sigue cargando el pistón y este a su vez a la probeta, no se puede tener la deformación exacta, ya que esta depende de la carga aplicada en el tiempo tanto en las probetas con Clavos Hilti como en las con Pernos.

El valor aproximado para la deformación en las probetas con Clavos Hilti fue de 5mm. Y para las probetas con Pernos 8mm., pero reitero que son valores muy aproximados ya que en el caso de los Pernos es aún mas variable ya que al cargar en el tiempo el perno se empieza a doblar y esto produce la deformación mencionada anteriormente. Ver foto.



Fotografía 4.10 *Deformación del Perno*

4.5.4.- Influencia de la excentricidad

Otro parámetro que descubrimos casi por error de colocación de la probeta en la prensa fue la de la excentricidad de la carga. Siempre se tiene que quedar alineada la carga con la parte de la probeta donde se va a cargar, de no ser así se puede dañar la probeta, o puede fallar en un lugar que no esperábamos que fallara por lo menos en primera instancia. Como se puede apreciar en la foto.



Fotografía 4.11 *Falla por excentricidad de carga*



Fotografía 5.12 *Falla por excentricidad de carga*

4.5.5.- Comportamiento de las probetas

Como se puede apreciar en las tablas de resultados, la resistencia a la carga sigue una relación lineal o mejor dicho progresiva con respecto al número de pernos y clavos. Lo que sienta un buen precedente para nuestro estudio ya que al verse marcada una tendencia es más fácil acercarse a la curva resistencia versus número de pernos y/o clavos a una curva conocida y así a su vez poder predecir a futuro la cantidad necesaria de pernos y/o clavos para una determinada carga.

También cabe destacar que por el mismo hecho de llevar más pernos las probetas oponen mayor resistencia, y por lo mismo sufren mas daño, como se muestra a continuación en la foto.



Fotografía 4.13 *Probeta muy dañada*



Fotografía 4.14 *Probeta muy dañada*

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos, podemos concluir lo siguiente:

- Las uniones clavadas y apernadas pueden utilizarse como tal en la construcción alcanzando un nivel de resistencia adecuado.
- Los dos tipos de uniones ensayadas son de fácil materialización, económicas y no necesitan de mano de obra especializada.
- Como se obtuvo una ecuación lineal entre el número de conectores y la carga, se puede obtener, para casos particulares, los números de conectores para la resistencia que se solicite.
- Los resultados obtenidos en las rectas de diseño son confiables ya que se utilizó un factor de seguridad de 3 que le da total seguridad al diseño.
- Para las uniones clavadas, aunque tiene la desventaja de deteriorar parte de los elementos a unir, se logro obtener el cortante o resistencia al corte para las uniones de ferrocemento en función a su separación.
- Para las uniones apernadas, aunque es más lento este sistema de unión, se logro obtener el cortante o resistencia al corte para las uniones de ferrocemento en función a su separación.
- Un Ingeniero Calculista está en condiciones de hacer uso de este tipo de uniones propuesto ya que en este estudio se entregan todos los elementos para su utilización.
- Las uniones con pernos son más convenientes ya que tienen casi el mismo costo pero resisten una mayor carga.
- En cuanto al comportamiento del ferrocemento podemos decir que las fallas producidas en las piezas fueron por aplastamiento local.

- El ferrocemento es un material que nos avisa antes de colapsar a través de grietas que se producen junto a los conectores.

ANEXO 1

EJEMPLO PRACTICO CON EL FLUJO CORTANTE

Como decíamos anteriormente en el capítulo II, uno de los ejemplos más prácticos donde podemos aplicar el Flujo cortante que calculamos con la parte práctica son en vigas compuestas por un alma y las alas que irían unidas al alma con, en nuestro caso, clavos hilti y/o pernos. A continuación explicaremos los pasos a seguir para calcular el corte que resiste esta viga en función de las uniones, y así podremos dar la cantidad y separación de conectores.

De un libro de mecánica de sólidos (Crandall, 1966) obtenemos la siguiente formula:

$$q_{yx} = \frac{V * Q}{I_{yy}}$$

En donde:

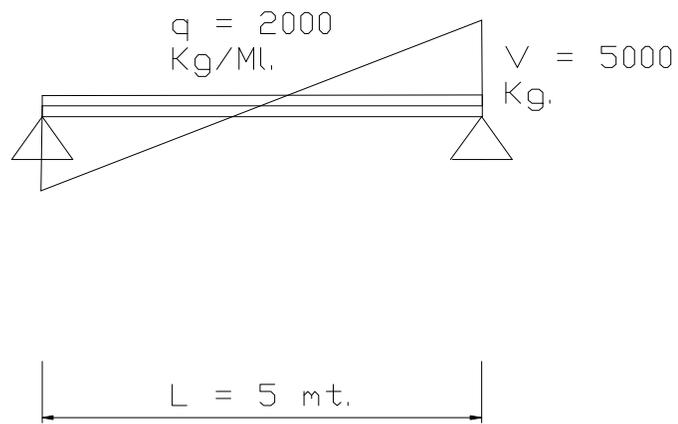
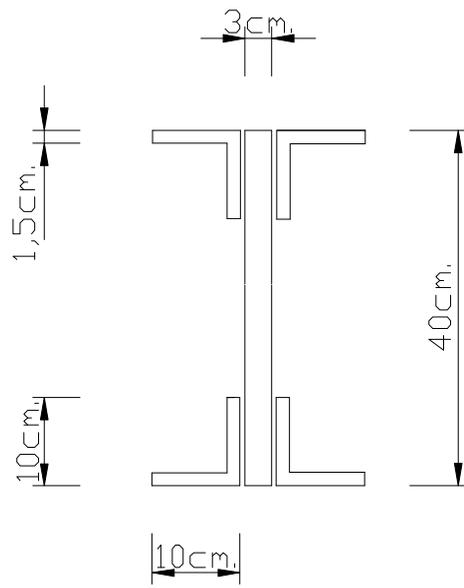
q_{yx} = Flujo cortante.

V = Fuerza cortante.

Q = Momento estático.

I_{yy} = inercia de la pieza

Trabajaremos con la siguiente viga de 5mt. de longitud, compuesta por un alma central y las alas que irán unidas mediante pernos, con un $q_u = 2000 \text{ Kg.*M.}$, las dimensiones se señalan en la siguiente figura:



$$M_{\text{máx}} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{2000 \cdot 25}{8} = 6250 \text{ Kg} \cdot \text{m}$$

$$V_{\text{máx}} = \frac{q \cdot L}{2} = \frac{2000 \cdot 5}{2} = 5000 \text{ kg.}$$

De esta forma podremos averiguar el flujo cortante necesario para que funcione este tipo de unión, ya que el resto de los datos los podemos obtener, el flujo cortante lo obtendremos en función de los siguientes datos: el momento estático, la inercia y el corte de nuestra viga para luego ingresar a los gráficos que obtuvimos de nuestra experiencia práctica y determinar la separación de los conectores.

Los valores de Inercia de la pieza y momento de área o estático los calcularemos a continuación, el de el flujo cortante lo obtenemos de nuestro análisis de los ensayos.

$$Q = \text{Momento estático} = 940.73 \text{ cm}^3.$$

$$I_{yy} = \text{Inercia de la pieza} = 48908 \text{ cm}^4.$$

$$V = \text{Fuerza cortante.} = 5000 \text{ kgs.}$$

$$q_{yx} = \text{Flujo cortante} = ?.$$

Los pernos tienen que soportar la tensión de flexión desequilibrada que actúa sobre el área de la sección recta de las alas.

$$\implies q_{yx} = \frac{V * Q}{I_{yy}}$$

$$q_{yx} = \frac{5000 * 940.73}{48908}$$

$$q_{yx} = 96.17 \text{ Kgs/cm.}$$

$$q_{yx} = 9617.34 \text{ Kgs/Ml.}$$

Con este valor podemos entrar a la tabla 4.4.2.2 o a la curva que obtuvimos con nuestra experiencia práctica y obtener la separación a la que deben ir los pernos para que resistan el flujo cortante solicitado.

Separación en cm.	Carga en Kgs.	F. Cortante en Kgs./ml
30	766.6	2555.33
20	1047.6	5238
15	1328.6	8857.33
10	1609.6	16096
7,5	1890,6	25207.99
6	2171.6	36193.33

Según esta tabla, la separación debería estar entre 10 y 15 centímetros, pero para obtener una separación mas exacta podemos ocupar la formula de la curva que es la siguiente $Y = 685549 X^{-1.6308}$, reemplazando obtenemos que la separación debe ser de 13.685 centímetros.

Cabe destacar que los resultados obtenidos son confiables ya que se utilizó un factor de seguridad de 3 que le da total seguridad al diseño.

Podemos decir que este tipo de unión puede utilizarse como tal en la construcción alcanzando un nivel de resistencia adecuado ya que fue analizado bajo estándares de alta confiabilidad.

ANEXO 2

COMPARACION DE COSTOS

A continuación describiremos los costos asociados a la utilización de los dos métodos de unión.

Clavos Hilti

A diferencia de los pernos en los que se utiliza uno por unión, en las uniones con Clavos Hilti se necesita un clavo por lado, además de llevar un costo asociado que es el de los fulminantes para su colocación y el arriendo de una pistola clavadora para esto.

Materiales	Costo (\$)	Cantidad	Valor (\$)
Clavos Hilti	53	2	106
Fulminantes	54	2	108
Arriendo Pistola	7000/día	1	7000/día

Pernos

En los pernos esta la ventaja de que es más fácil conseguir los materiales, ya que son de menor complejidad para su uso.

Materiales	Costo (\$)	Cantidad	Valor (\$)
Pernos	175	1	175
Tuercas	20	1	20
Golillas	5	1	5
Arriendo Taladro	3500/día	1	3500/día

Nos damos cuenta de que los costos son similares o por lo menos parecidos, pero en la práctica los Pernos nos entregan una resistencia considerablemente mayor que los Clavos Hilti, por ende a la hora de escoger el mejor método de unión, sin duda el mas seguro, mas resistente y por el mismo costo es el método de unión con Pernos.

ANEXO 3

PROPIEDADES DEL FERROCEMENTO

DEFINICIÓN.

El ferrocemento es un tipo de material compuesto donde los materiales que lo integran, generalmente de consistencia frágil, llamada matriz, se refuerzan con fibras dispersas a través del compuesto, dando como resultado mejores comportamientos estructurales que el comportamiento individual.

En general, el ferrocemento se considera como una forma altamente versátil de un material compuesto hecho de mortero de cemento y capas de malla de alambre, o un emparrillado de acero de diámetro pequeño similar, ligados íntimamente para crear una estructura rígida. Este material, que es una forma especial del concreto reforzado, muestra un comportamiento tan diferente del concreto reforzado común en cuanto a su funcionamiento efectivo, resistencia y aplicaciones potenciales, que debe ser clasificado como un material separado. En estructuras de ferrocemento racionalmente diseñadas, el refuerzo consiste en una malla de alambre de diámetro pequeño en las cuales se hacen uniformes la proporción y distribución del refuerzo al extender las mallas de alambre a través del espesor del elemento.

La dispersión de las fibras en la matriz frágil ofrece no solamente posibilidades convenientes y prácticas de lograr mejoras en muchas de las propiedades físicas del material, tales como fractura, resistencias a la tensión y a la flexión, flexibilidad, resistencia a los esfuerzos de trabajo y al impacto, sino también ventajas en términos de fabricación en productos y elementos. Estas ventajas y lo novedoso del concepto han estimulado lo que ahora está considerado como de interés mundial en el uso del ferrocemento (Paul, 1992).

Hace unos cuantos años, el comité 549 del American Concrete Institute (ACI) sobre ferrocemento llegó a la conclusión de que no se puede limitar la definición del ferrocemento como refuerzo de acero, aun cuando la mayoría de las aplicaciones actuales enfatizan el uso de este material como refuerzo. Por consiguiente, el comité lo define de la siguiente manera: “Ferrocemento es un tipo de construcción de concreto reforzado con espesores delgados, en el cual generalmente, el cemento hidráulico está reforzado con capas de malla continua de diámetro relativamente pequeño.”

La idea básica en apoyo a este material, es que el concreto puede sufrir deformaciones importantes en la cercanía del refuerzo y la magnitud de las deformaciones depende de la distribución y subdivisión del refuerzo a través de la masa de concreto.

Es muy conveniente emplear el ferrocemento en estructuras espaciales, tiene mejores propiedades mecánicas y mayor durabilidad que el tradicional concreto reforzado. Dentro de ciertos límites de carga se comporta como un material elástico homogéneo y estos límites son más amplios que los del concreto normal. La distribución uniforme y la elevada relación del área de superficie con el volumen (superficie específica) del refuerzo, da como resultado un mejor mecanismo de restricción de grietas, esto es, la propagación de grietas se detiene, originando una alta resistencia a la tensión del material.

El ferrocemento se usa en estructuras de espesores delgados en donde la resistencia y la rigidez se desarrollan mediante la forma del elemento. Tiene la gran ventaja de ser moldeable y de poder construirse de una sola pieza. Otras de sus ventajas principales son su bajo costo, y sus características de incombustibilidad y su alta resistencia a la corrosión.

MATERIALES COMPONENTES DEL FERROCEMENTO

Las piezas de ferrocemento son, generalmente, de sección delgada y consiste en capas de malla de alambre impregnadas con una rica mezcla (elevada proporción de cemento en relación con la arena) de mortero de cemento y curada durante un periodo especificado. A continuación se presenta una breve descripción de los materiales usados para el ferrocemento con que trabajaremos.

La Armadura.

El ferrocemento es un material compuesto que consta de una delgada capa de mortero (2 o 3 cm.) de cemento densa y homogéneamente armado con fibras de refuerzo que reciben el nombre de armaduras, las que se presentan generalmente como mallas continuas de alambre de acero dúctil de pequeños diámetros, que pueden estar sostenidas por barras de acero de mayor diámetro.

La función del refuerzo en ferrocemento es, en primera instancia, conformar la estructura y soportar el mortero sin fraguar (en el caso de no usar moldaje) y posteriormente absorber los esfuerzos de tracción que el mortero solo no sería capaz de soportar, y favorecer el surgimiento de una configuración de fisuras poco espaciadas.

Las armaduras del ferrocemento se pueden clasificar en dos tipos:

Armadura Difusa.

Compuesta por una o más capas de malla de alambre, que ayudan a absorber la retracción hidráulica del mortero y se distribuyen uniformemente dentro de este, además, al ser solicitados los elementos estructurales, retarda la aparición de las primeras grietas.

Las mallas que componen la armadura difusa son de pequeño diámetro y pueden ir soldadas o entretejidas, generalmente con un espaciamiento pequeño.

Una de las características principales que debe tener esta armadura es que debe ser fácil de manejar y lo más importante es que debe tener buena trabajabilidad, para así no tener problemas para ser doblada y ajustarse lo mejor posible al moldaje, si es que se requiere de este.

Cabe destacar que como armadura difusa se pueden ocupar diferentes tipos de mallas, en este caso se ocupará la más común que es la malla hexagonal.

Malla de Alambre Hexagonal:

La malla hexagonal está compuesta por alambres de pequeño diámetro y se fabrican con alambre estirado en frío. El proceso de producción consiste en el entrelazamiento de alambres galvanizados, generalmente con patrones hexagonales.

Para ferrocemento los diámetros varían entre 0.1 y 0.8 mm, y de abertura de malla aproximadamente desde ½” a 1 ½”. Lo descrito anteriormente hace que la malla posea una gran flexibilidad, y es por esto justamente que se necesita de la armadura discreta de esqueleto, para afirmar las mallas y poder amarrarlas correctamente.

La malla hexagonal galvanizada presenta varias ventajas, destacándose entre ellas, que tiene protección contra la corrosión, no se desteje debido a su triple torsión en las amarras, además, tiene como característica ser una estructura resistente y moldeable.

En el caso de las probetas a diseñar, se utilizará una malla hexagonal con las siguientes características:

Tipo	Abertura (pulg.)	Alambre BWG	Peso aprox. (kg/m²)	Diámetro (mm)	Carga Rup. (kg)	Zinc (gr/m²)
¾” x 22	¾”	21	0.36	0.67	11	28

Tabla 1 *Características de malla hexagonal*

La malla se presenta de la siguiente forma:

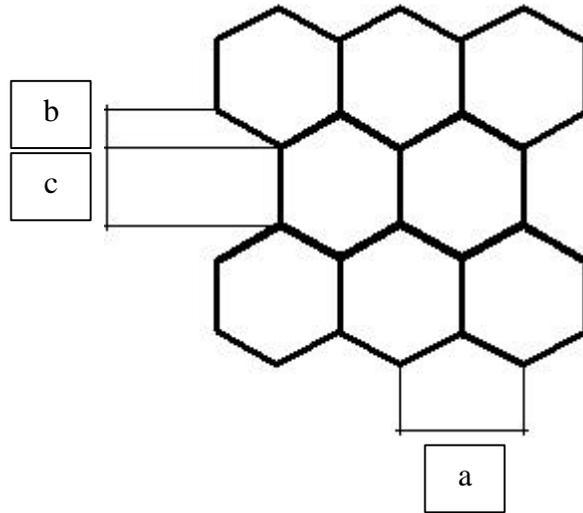


Figura 1 *Malla hexagonal*

Donde:

a: 19.05 mm

b: 7 mm

c: 14 mm

Armadura Discreta.

Se refiere a la armadura resistente y se distinguen dos tipos.

- Armadura de esqueleto: tiene como función otorgar resistencia al elemento y además sostener a la armadura difusa. Son barras de acero de entre 4 y 12 mm. de diámetro, que van soldadas o amarradas firmemente entre sí, lo más espaciado posible. Se distribuyen de forma longitudinal y transversal dando forma al elemento de ferrocemento deseado.

- Armadura suplementaria: estas también son barras de acero pero su función es netamente de resistencia o estructural, actúa en conjunto con las mallas de la armadura difusa. La armadura suplementaria, al igual que la armadura de esqueleto, puede presentarse en diferentes formas, dependiendo de su resistencia, recubrimiento, tamaño, etc. características que finalmente inciden en su comportamiento.

En las probetas a diseñar se utilizarán ambas armaduras con el fin de sostener la malla a colocar perteneciente a la armadura difusa y agregar más resistencia a la probeta. En nuestro caso utilizaremos como armadura discreta barras de refuerzo para hormigón y la malla soldada.

a) Barras de Refuerzo para Hormigón:

Las barras de refuerzo para hormigón son de acero y se presentan de diferentes diámetros, poseen sección circular y tienen resaltes para una mejor adherencia y anclaje al hormigón.

Estas barras se usan generalmente en la confección de armaduras de cualquier elemento de hormigón armado, ya sea vaciado en obra, pretensado o premoldeado.

En ferrocemento, se utilizan barras de diámetro variable, entre 5 y 12 mm, intentándose siempre usar barras de diámetro lo más pequeño posible, para así mejorar el comportamiento del ferrocemento ante la fisuración.

El tipo de acero para todas las barras a utilizar cumple con lo dispuesto en la *Nch 204 of 77*, además se usará solamente acero del tipo A44-28H. Esta nomenclatura se traduce a lo siguiente:

A	Acero de Carbono
44	440 Mpa (límite ruptura)
28	280 Mpa (límite fluencia)
H	Uso en hormigón armado

Tabla 2 *Nomenclatura de barras de refuerzo*

La armadura discreta puede ser de barras de acero estriado de 6, 8 y 12 mm de diámetro. Siendo estas usadas como armadura discreta de esqueleto, las cuales a su vez también pueden cumplir una función estructural. Estas barras poseen las siguientes características:

Características Nominales			
Diámetro, e (mm)	Masa (kg/m)	Sección (cm²)	Perímetro (cm)
8	0.395	0.503	2.51
12	0.888	1.13	3.77

Tabla 3 *Características nominales de barras de refuerzo*

Las dimensiones de los resaltes son las siguientes:

Diámetro de la barra (mm)	Espaciamiento medio máximo, E (mm)	Altura media mínima, H (mm)	Ancho base máximo, A (mm)
8	5.6	0.32	2.0
12	8.4	0.48	3.0

Tabla 4 *Dimensiones de resaltes de las barras*

Esto se puede apreciar en la Figura 2

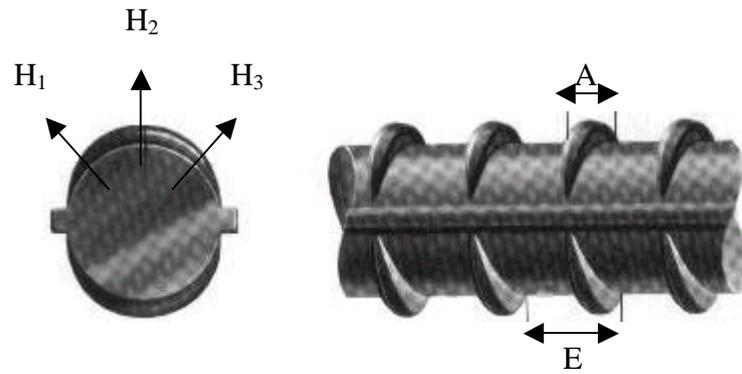


Figura 2 *Barra de refuerzo con resaltes*

Con:

$$H = (H_1 + H_2 + H_3) / 3$$

b.- Malla Soldada:

Esta malla está constituida por alambres de acero que forman cuadrados o rectángulos. Estos alambres o alambres son rectilíneos y están soldados en sus intersecciones.

La malla soldada es mucho más rígida que la hexagonal, y es por eso que su función generalmente se aplica al ámbito estructural. Debido a sus características, se puede adaptar fácilmente al montaje en superficies planas, es por esto que se puede utilizar con éxito en la construcción de piezas prefabricadas de ferrocemento.

Para nuestras probetas de ferrocemento a construir, se utilizará malla electrosoldada ACMA®, la cual es fácil de adquirir en nuestro mercado. Posee varias propiedades que la hacen más confiable, una de ellas es que la malla es soldada por fusión eléctrica, o sea, sin aporte de material, la ventaja de esto es que permite uniones más sólidas, con terminaciones de alta calidad, y que no se “corren”. Además, los cruces soldados a lo largo de las barras proporcionan un anclaje efectivo del hormigón.

Estas mallas cumplen satisfactoriamente con las Normas Chilenas establecidas por el *Instituto Nacional de Normalización (INN)*:

- *NCh 219. Of 77 “Construcción – Mallas de Acero de Alta Resistencia – Condiciones de Uso en el Hormigón Armado”*, esta, establece las condiciones de uso de la malla soldada fabricada con alambre de acero de alta resistencia para su utilización en hormigón armado.
- *NCh 218. Of 77 “Acero – Mallas de Alta Resistencia para Hormigón Armado – Especificaciones”*, en que se señalan los requisitos que deben cumplir las mallas de acero de alta resistencia, para su uso en hormigón armado.
- *NCh 1173 of 77*, que establece los requisitos que debe cumplir el alambre de acero de alta resistencia para su utilización en hormigón armado.

Otro aspecto importante de la malla soldada ACMA® es su gran resistencia lo que hace que se trabaje con secciones pequeñas, el acero es del tipo AT56-50H, esta nomenclatura se traduce de la siguiente forma:

A	Acero
T	Trefilado
56	5600 kg/cm ² (límite de ruptura)
50	5000 kg/cm ² (límite de fluencia)
H	Hormigón

Tabla 5 Nomenclatura de malla Acma C139

En el caso de las probetas a diseñar, se utilizará una malla electrosoldada ACMA® con las siguientes características:

Tipo de Malla	Distancia Barras		Diámetro Barras		Sección de Acero		Peso de Malla (kg)
	Longit. (mm)	Transv. (mm)	Longit. (mm)	Transv. (mm)	Longit. (cm ² /m)	Transv. (cm ² /m)	
C139	100	100	4.2	4.2	1.39	1.39	28.34

Tabla 6 Características malla Acma C139

c.- Abertura cuadrada. (Ver Figura 3)

Medidas: 2.6 x 5.0

Como se aprecia en la siguiente Figura:

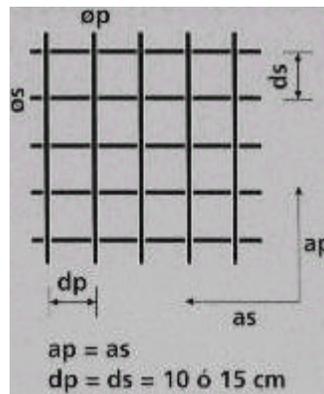


Figura 3 Medidas malla Acma C139

El Mortero.

El mortero utilizado normalmente en el ferrocemento es una mezcla de cemento hidráulico y arena al que eventualmente se le pueden añadir aditivos que mejoren sus propiedades, las que están dadas por el tipo y la calidad de los materiales componentes, la proporción en que son mezclados, las condiciones en que se prepara y los factores ambientales.

Hay gran cantidad de variables que pueden afectar la calidad del producto terminado. Los requerimientos generales para este componente del ferrocemento son que debe tener la mayor resistencia posible a la compresión, impermeabilidad, dureza, resistencia a ataques químicos y quizás el más importante factor de todos, la consistencia de la mezcla que debe permanecer uniforme, compacta y con la menor cantidad de poros independientemente de la concentración de las telas de mallas de refuerzo, ya que, como se conoce, los agentes agresivos del medio ambiente no son sólo los mecánicos que deforman, rompen y desgastan sino también los físico – químicos que provocan sobre todo, la corrosión de las armaduras, desempeñando en esto el mortero un papel muy importante.

A continuación se describirán los materiales utilizados en la composición del mortero a utilizar realmente en este trabajo y luego se especificarán las propiedades o especificaciones de este.

Componentes del Mortero.

Como se mencionó anteriormente se trabajará con un mortero premezclado otorgado por la empresa HORMIGONES PREMIX S.A. Cada uno de los elementos componentes del mortero se describirá en forma general a continuación.

a.- Cemento.

El cemento es un material con propiedades de adherencia y cohesión que lo hacen capaz de aglutinar fragmentos minerales en una masa compacta. En presencia de agua, el cemento reacciona para formar una pasta cementante que con el tiempo forma una masa firme y muy dura.

En el ferrocemento, más que en el hormigón armado, la calidad del cemento puede afectar sensiblemente su comportamiento principalmente en lo que se refiere a la durabilidad de los elementos debido a los pequeños espesores y al reducido recubrimiento del acero.

En el caso del mortero utilizado se utilizó cemento *Melón Extra*, el cual cumple con todos los requerimientos y normas necesarias para hacer una buena mezcla. Este es un cemento *Pórtland* de fraguado rápido el cual, como su nombre lo indica, desarrolla su resistencia más rápidamente, por lo que generalmente se utiliza cuando se requiere alta resistencia inicial, además es de fácil adquisición.

b.- Áridos.

Este material es muy importante pues se encuentra disperso en toda la masa del mortero y ocupa aproximadamente entre el 60 y el 70 % de su volumen, por lo que el árido utilizado en la producción del mortero debe ser resistente, impermeable, y capaz de lograr una buena penetración en las mallas.

Aspectos importantes a tener en cuenta son el módulo de finura, el área específica, la composición granulométrica y la forma de los granos. Arenas bien graduadas permiten la obtención de morteros más densos, con mejor resistencia a esfuerzos mecánicos y mayor trabajabilidad.

El árido utilizado en este caso fue solamente arena fina, debido al poco espacio que queda entre la armadura, por causa de las diferentes mallas y las barras de acero, a parte de que el

espesor del elemento va de 1.5 a 3 cm. Además utilizando arena fina en la mezcla nos aseguramos que el mortero penetre en cada sitio del moldaje y la armadura no permitiendo que se formen espacios vacíos dentro que van en perjuicio de la mezcla.

El origen de la arena es de la extracción un río de la zona, lo que se traduce a que sea de gran calidad. El diámetro aproximado de los granos de arena es menor o igual a los 3 mm, o sea que un alto porcentaje del volumen de este pasa por el tamiz N° 8 e incluso otros más pequeños.

c.- Agua.

Las impurezas del agua pueden interferir en el fraguado del cemento, afectar adversamente la resistencia, provocar un manchado en la superficie o provocar corrosión en el refuerzo, es por eso que se deben tomar las precauciones necesarias antes de usar agua que contenga impurezas tales como barro, ácidos, sales solubles, materiales vegetales en descomposición y muchas otras sustancias orgánicas que pueden afectar la calidad de esta. Es por eso que el agua utilizada para la realización del mortero debe ser fresca y cumplir en nuestro país con la *NCh 1498 “Hormigón – Agua de Amasado – Requisitos”*.

En este caso se utilizó agua potable destinada al uso público, pues esta resulta satisfactoria para conseguir una mezcla acorde con las exigencias y no es necesario verificar su calidad.

d.- Aditivos.

Para disminuir el gasto de cemento, mejorar las características físico – mecánicas y acelerar el endurecimiento de los morteros, se utilizan aditivos minerales y químicos que se le adicionan al mortero fresco.

Los aditivos químicos de mayor uso se pueden dividir en función de las características que le introducen al mortero. Los más comunes son:

- *Plastificantes o reductores de agua*, son aquellos que actúan sobre el mortero fresco y le proporcionan mejor trabajabilidad, lo que posibilita reducir la cantidad de agua necesaria para el mezclado con la consecuente mejoría en la resistencia mecánica, impermeabilidad y durabilidad del mortero. Existen, también, los llamados aditivos *superplastificantes* que contienen productos químicos de elevado poder dispersante y permiten la obtención de morteros fluidos, automoldeables, con una significativa reducción de la cantidad de agua (del 25 al 35 %) y que posibilitan el aumento de las resistencias desde las primeras edades.
- *Aceleradores*, son aquellos que aceleran la reacción del fraguado del cemento, y, *retardadores*, son los que retardan la acción de hidratación. Su uso depende de las condiciones particulares de la construcción y del medio ambiente.
- *Los incorporadores de aire* promueven la formación de un número extremadamente elevado de minúsculas burbujas de aire en el mortero y le confieren mejor trabajabilidad, impermeabilidad y resistencia al intemperismo.
- *Aditivos de expansión*, son aquellos empleados para provocar una expansión controlada de la pasta de cemento con el objetivo de compensar en general el efecto de la retracción.
- *Impermeabilizantes*, son aditivos empleados para disminuir la permeabilidad del mortero reduciendo los vacíos. Contienen agentes hidrófugos.

Existen otros muchos tipos de aditivos que pueden ser usados en ferrocemento. En todos los casos deben cumplir con las normas vigentes, de no ser así su posible uso estará basado en datos de ensayo sobre el mortero a utilizar.

En el caso del mortero utilizado se incorporaron dos aditivos. Uno fue el AD_R-1000 que es un aditivo *superplastificante* para elevar el cono, el otro fue el AD_P-121 que es un *plastificante o reductor de agua*.

Especificaciones del Mortero.

Hay que decir que el mortero solicitado a la empresa hormigonera no es un producto que generalmente se comercialice, esto es debido a sus particulares características. Antes de fabricarlo se hizo un estudio teórico del cual salió la dosificación final con que se haría la mezcla.

Las características generales del mortero son las siguientes:

- La resistencia f_c será igual a 30 Mpa o 300 kg/cm²
- El mortero debe ser muy fluido, vale decir con un cono muy elevado (aprox. 20 cm.), para que no haya necesidad de vibrar tanto, además, con esto se asegura que la mezcla penetre en cada sitio de la armadura y moldaje.
- Además, el mortero se hará solamente con arena fina, esto es también para facilitar que este penetre en cada sitio de la armadura y el moldaje, debido al poco espacio que queda entre la armadura y el poco de las probetas.

La dosificación de las cantidades de material para 1 m³ de mortero se especifican en la siguiente tabla (estos datos fueron facilitados por la empresa hormigonera).

INSUMO	CANTIDAD	UNIDAD
Cemento Melón Extra	450	Kg.
Agua	271	Lts.
Arena Fina	1515	Kg.
Aditivo P – 121	2.93	Kg.
Aditivo R – 1000	4.5	Lts.

Tabla 7 *Tabla dosificación mortero*

Observaciones:

- *El cono de llegada a obra fue de 7 cm.*
- *En obra se añadió Aditivo Superplastificante R – 1000 para levantar el cono a 20 cm.*
- *La mezcla se realizó 5 minutos antes de iniciar la descarga.*

Como no hay antecedentes prácticos ni un historial de este producto, para estudiar la resistencia del mortero, al vaciar el mortero en las probetas, paralelamente se hicieron pruebas en probetas *RILEM*, que son probetas que tienen 3 compartimientos similares a pequeñas vigas de medidas 4 x 4 x 16 cm. La forma de colocación del mortero en estas probetas se hace de la siguiente forma: primero, se deposita mortero solamente hasta la mitad en los tres depósitos de la probeta, luego, se compacta este mortero haciendo 60 golpes caída libre a la probeta desde una altura de 1 cm. Luego de esto se deposita más mortero sobre los tres espacios de la probeta hasta sobrepasar un poco el nivel superior de la probeta, para posteriormente proceder a dar nuevamente los 60 golpes de caída libre a la probeta (Fotografía 2.1). Finalmente, se saca el mortero sobrante sobre el nivel superior de la probeta para que quede pareja la superficie libre.



Fotografía 1 *Probetas RILEM*

Este mortero depositado en las probetas se desmoldó a los dos días y se procedieron a sumergir las pequeñas vigas en las piscinas de la sala de curado en el laboratorio LEMCO para que así tengan un procedimiento adecuado de curado y endurecimiento.

Posterior a esto se ensayaron a 7 y 28 días de haberse depositado en las probetas. Esto se realizó para ver la resistencia que iba adquiriendo el mortero a través del tiempo, para así saber cuando sería el momento adecuado para ensayar las vigas, o sea, a que edad el mortero adquiere su resistencia de diseño. Los ensayos realizados fueron a *compresión* y a *flexotracción*.

Los resultados obtenidos se aprecian en la (Tabla 8).

EDAD (días)	N° de Prueba	Peso (gr)	Compresión (kg/cm²)	Flexotracción (kg/cm²)	Promedio Compresión (kg/cm²)	Promedio Flexotracción (kg/cm²)
7	1	554	172	3.32	172	3.32
	2	552	171	3.32		
28	1	554	300	3.79	301	3.89
	2	556	302	3.98		
28	1	554	312	4.26	306	4.12
	2	554	300	3.98		

Tabla 8 Resultado de ensayo de compresión y flexotracción

De esta tabla nos interesa la resistencia a compresión, ya que como la literatura existente sobre ferrocemento nos dice que debemos ocupar un f_c alto aproximadamente de 300 kg/cm².

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL FERROCEMENTO.

Introducción.

En general, tanto en el hormigón armado como en el ferrocemento, la resistencia que este tenga, da una idea general de la calidad del material y se considera como una propiedad muy valiosa. Esto tiene relación directa con las propiedades del mortero y de la armadura que posea.

Una característica fundamental del ferrocemento es que contiene una importante cantidad de armadura en las dos direcciones, esto hace que el mortero adquiera una gran elasticidad y resistencia a la rotura. Está demostrado que el mortero que esta cercano al refuerzo metálico, tiene la capacidad de soportar importantes deformaciones sin la aparición de grandes fisuras.

En la práctica, el ferrocemento posee propiedades que llegan a superar al hormigón armado tradicional, como su capacidad a la tracción, resistencia al impacto, ductibilidad y resistencia a la fisuración.

Lamentablemente no todas las propiedades mecánicas del ferrocemento han sido investigadas tan a fondo como para deducir fórmulas de diseño, pero de otros si hay información. A continuación se describirán estas propiedades.

Resistencia a la Compresión.

En el ferrocemento claramente es el mortero quien soporta la mayor parte de las tensiones de compresión, en proporción directa a el área de su sección transversal. Y por supuesto un factor que es muy importante en la resistencia del mortero es la razón agua-cemento, al igual que en los elementos de hormigón armado.

Pero otro aspecto que es muy importante de mencionar, y que puede tener cierta relevancia en el esfuerzo a compresión es el tipo, orientación y colocación del refuerzo. Y es justamente en este punto donde se ha llegado a la conclusión que en donde hay un incremento importante de compresión, es con el refuerzo de malla cuadrada. Esta, restringe al mortero y lo lleva a adoptar condiciones de tensión mayores.

Resistencia a la Tracción.

En ferrocemento, la resistencia a tracción, corresponde aproximadamente a la capacidad que tienen los elementos de refuerzo a soportar cargas a tracción, o sea, la sumatoria del producto de la resistencia última del acero y la sección transversal efectiva, de las mallas y la enfierradura utilizada.

En general, la tensión o resistencia a tracción es igual a la capacidad de soportar cargas a tracción dividida por la sección transversal de ferrocemento.

Existen diferencias de resistencia asociadas a la orientación de el número de elementos por unidad de ancho multiplicado por su área de sección transversal y multiplicada por el coseno del ángulo de inclinación de la aplicación de la fuerza. Esto nos indica que existe una relación entre la resistencia y la orientación de las capas de refuerzo.

Al ser sometido a esfuerzos de tracción, en el ferrocemento se observan tres etapas, las cuales se pueden apreciar en el (Gráfico 1).

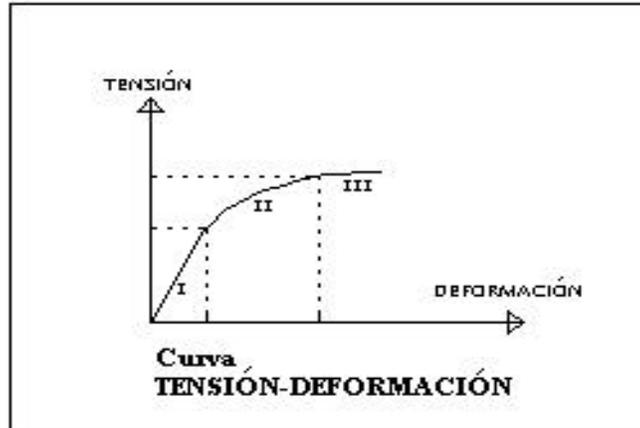


Gráfico 1 Curva tensión deformación

Zona I: Rango elástico, la curva es básicamente lineal. Conforme aumenta el esfuerzo el ferrocemento se vuelve casi elástico y aparecen micro grietas.

Zona II: El mortero presenta deformaciones plásticas. Se produce un ensanchamiento de las grietas y la curva ya no es lineal.

Zona III: Ya se ha desarrollado el número máximo de grietas que van a formarse. Finalmente el refuerzo soporta todas las fuerzas de tensión.

Basándose en los resultados de ensayos realizados, se proponen diferentes estados tecnológicos en el trabajo del ferrocemento limitándolos por la abertura de las microgrietas y que se corresponden con los tres estados de trabajo del material.

(Wainshtok, 1998)

FASE	ESTADO TECNOLÓGICO	ANCHO DE FISURA
Elástica	Impermeable	$\omega = 20 \mu$
Elasto – plástico	Anticorrosivo I	$20 < \omega = 50 \mu$
Plástico	Anticorrosivo	$50 < \omega = 100 \mu$
	Corrosivo	$> 100 \mu$

Tabla 9 Estados tecnológicos

Resistencia a la Flexión.

La resistencia a flexión deriva principalmente de la acción combinada del material, vale decir, el mortero trabaja ante el esfuerzo de compresión, y el acero ante el esfuerzo a tracción.

La resistencia a flexión también depende del refuerzo en el tipo de malla, su orientación y su geometría intrínseca así como la presencia o no de acero de esqueleto, particularmente cuando se tiene en cuenta la resistencia a la carga en dos direcciones.

La influencia de los factores tanto de resistencia a tracción, como los de compresión reflejan la resistencia última a flexión.

En general se ha demostrado, a través de la regresión lineal, que las reglas que obedecen los cálculos de resistencia de ferrocemento, son similares a las del hormigón armado.

Resistencia al Corte.

Pocos estudios han incluido un análisis de la resistencia al corte, puesto que el ferrocemento es usado principalmente en flexión, de modo que el corte no es primordial como criterio de falla.

No obstante, algunos fabricantes en ferrocemento, principalmente en la construcción de embarcaciones, han demostrado cualidades de la dureza del material por corte principalmente por punzonamiento, a través, de ensayos como colisiones con rocas u otros botes.

Otro punto importante de aclarar es que no se experimenta desunión debido a este esfuerzo entre los materiales componentes de ferrocemento, o sea, la deformación por corte se presenta en el conjunto. (Wainshtok, 1998)

Resistencia a la Fatiga.

En general, en el ferrocemento, la resistencia a la fatiga es proporcional a la resistencia a la fatiga de los elementos de refuerzo, o sea, principalmente, el tipo de malla a utilizar y el acero de armazón, aunque es muy importante también en cuanto al mortero, propiedades como el tipo de cemento y los métodos de curado.

En ensayos realizados la malla de alambre hexagonal impartió una mayor resistencia a la fatiga que la malla cuadrada soldada y metal desplegado. Además, los resultados implican que la malla reforzada sin galvanizar parece impartir mayor resistencia a la fatiga que la malla galvanizada (Paul, 1992)

Resistencia al Impacto.

Numerosos trabajos atestiguan la favorable característica del ferrocemento al impacto, casi siempre referidos a situaciones relacionadas con barcos durante colisiones entre ellos, con muelles o con arrecifes. Las principales ventajas que presenta consisten en la resistencia a la desintegración del mortero, localización del daño y fácil reparación. (Wainshtok, 1998)

Generalmente los factores que influyen en la resistencia a la primera grieta debido al impacto son, el tipo, la geometría, dirección y superficie específica de la armadura de refuerzo, vale decir, las propiedades del refuerzo influyen sobre esta capacidad de resistencia en el ferrocemento. Además, contra más pequeñas las separaciones del acero de armadura se obtiene una mejor resistencia al impacto que con separaciones mayores.

Hay que decir que se considera un poco mayor la resistencia al impacto del ferrocemento, que la del hormigón armado tradicional, esto, debido a su elevada capacidad de absorción de energía. (Paul, 1992)

Según resultados de experiencias realizadas se concluye que las barras de acero intermedias, barras de esqueleto, desempeñan un papel importante en la resistencia al impacto y que el área dañada disminuye a medida que la resistencia y superficie específica de la tela de mallas aumenta. (Wainshtok, 1998)

Resistencia al Fuego.

La construcción del ferrocemento generalmente se presenta en capas con pequeños espesores, y es por esto, que su resistencia al fuego es débil, además, el bajo recubrimiento que este posee lo hace más deficiente a este riesgo. (Wainshtok, 1998)

Durabilidad.

En ferrocemento, al igual que en el hormigón armado, el daño a la estructura del mortero puede ser por causas del medio ambiente o por causas internas dentro de el mismo material, aunque existen otros factores que afectan la durabilidad que son únicos del ferrocemento. (Paul, 1992)

Los factores principales que inciden en la durabilidad del ferrocemento son tres. El primer factor importante es el recubrimiento que tengan los refuerzos, generalmente los espesores con que se trabaja el ferrocemento son pequeños, es por esto que si se está en presencia de líquidos corrosivos muy fuertes, existe la posibilidad de que estos penetren llegando a la armadura de refuerzo. En segundo lugar, el área de la superficie de refuerzo es alta, por lo tanto, el área de contacto donde pueden tener lugar las reacciones de corrosión también es alta. Y tercero, la capa de zinc que tienen las mallas que son galvanizadas, puede producir una reacción desfavorable, al reaccionar con otros refuerzos no galvanizados, produciendo burbujas de hidrógeno en el mortero, lo que puede perjudicar su adherencia.

Si el mortero es de buena calidad, puede mejorar en gran medida su durabilidad. Existen pruebas que demuestran que la absorción de humedad del mortero es insignificante, y mediante el uso de aditivos puede mejorar aun más. Un buen ejemplo de esto son las embarcaciones, estas obviamente están gran parte del tiempo en contacto con medios húmedos, y hasta hoy, existen barcos de más de cien años que se mantienen aún en buenas condiciones.

BIBLIOGRAFIA

Ferrocemento

Bedoya, D.A; J Farbiarz; J. E Hurtado; Ll. G. Pujades. 2004. Ferrocemento: Un acercamiento al diseño sísmico. Editorial CIMNE. Disponible en: WWW.structuralia.com. Consultado el: 08 de junio 2004.

Gschwind, C. 2004. Sitioferrocemento. Disponible en: www.sitioferrocemento.com. Consultado el: 08 de junio 2004.

Olvera, A. 2003. El Ferrocemento y sus aplicaciones. Mexico. Editorial Alfaomega. Disponible en: http://alfaomega.com.mx/shopsite_sc/store/html/product547.html. Consultado el: 08 de junio 2004.

Paul B.K.;R.P. Pama. eds.1992.Ferrocemento.ed. Limusa.Mexico.71-73p.

UCN.2004. Ferrocemento. Tecnología del hormigón. Disponible en: <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/FerrocemT8.htm>. Consultado el: 08 de junio 2004.

Wainshtok, Hugo. 1998. "Ferrocemento – Diseño y Construcción". 3° edición. Editorial offset abad cía. Ltda.

Acero

CINTAC 1993 Manual de Diseño Estructural

ICHA 2001 Manual del Instituto Chileno del Acero.

Madera

NCh 1198 Of. 91 Madera – Construcciones en madera - Calculo.

Perez V. Manual de cálculo de construcciones en madera.

Mecánica de sólidos

Crandall S.;R Archer. eds.1966. mecánica de sólidos. Madrid, Castilla.

Estadística

Devore J. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. 5ª edición Internacional Thomsom Editores, S.A., Pag. 480-510.