

# CAPÍTULO 3

## PRUEBAS DE FRACTURA, SEGÚN NORMA ASTM E399

### 3.1 ELABORACIÓN DE PROBETAS CT ASTM E 399

#### 3.1.1 PROBETA DE ACERO ESTRUCTURAL ASTM A-36<sup>2</sup>

**Tabla 3.1 Dimensiones de la Probeta CT Acero estructural ASTM A-36**

Denominación	B [mm]	W [mm]	a [mm]	Observaciones
E1, E2, E3, E6, E7, E8, E9, E10	24	48	24	Las probetas E9 y E10, se maquinaron para realizar las pruebas a bajas temperaturas.
E4, E5	21	42	21	Se rebajaron las dimensiones para observar la variación de los resultados del ensayo.

Fuente: Anexos B, C y Figura 2.34

#### 3.1.2 PROBETA DE ACERO GRADO MAQUINARIA AISI 1045<sup>3</sup>

**Tabla 3.2 Dimensiones de Probeta CT Acero grado maquinaria AISI 1045**

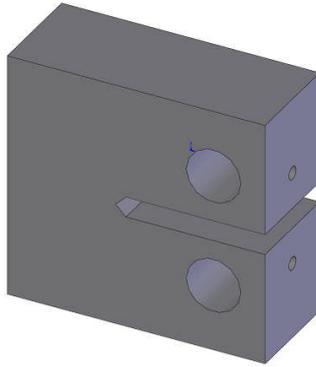
Denominación	B [mm]	W [mm]	a [mm]	Observaciones
T1, T2, T3, T6, T7, T8	24	48	24	
T4, T5	21	42	21	Se rebajaron las dimensiones para observar la variación de los resultados del ensayo.

Fuente: Anexos B, C y Figura 2.34

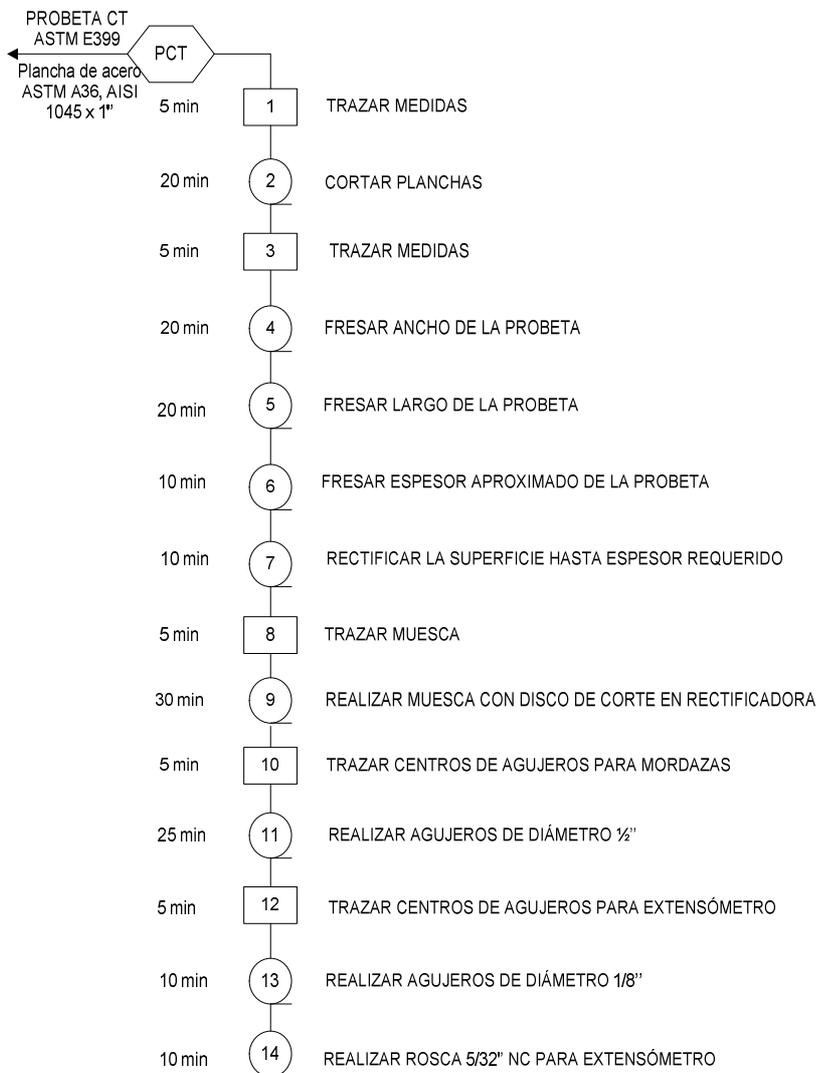
<sup>2</sup> Propiedades de Aceros Anexo F

<sup>3</sup> Propiedades de Aceros Anexo F

### 3.1.3 FABRICACIÓN DE PROBETAS CT ASTM E399



**Figura 3.1 Probeta CT ASTM E399**



**Figura 3.2 Diagrama de proceso probeta CT ASTM E399**

**Tabla 3.3 Diagrama de flujo Probeta CT ASTM E399**

<b>Nombre:</b> Probeta CT ASTM E399			<b>Código:</b> PCT
<b>Material:</b> ASTM A 36, AISI 1045			<b>Cantidad:</b> 18
<b>No</b>	<b>Descripción</b>	<b>Máquina/Herramienta utilizada</b>	<b>Tiempo/probeta [min]</b>
1	Trazar medidas	Calibrador Pie de Rey y trazador.	5
2	Cortar Plancha	Sierra eléctrica, con disco de corte	20
3	Trazar medidas	Calibrador Pie de rey y trazador	5
4	Fresar ancho de la probeta	Fresadora, con cuchilla bailarina	20
5	Fresar largo de la probeta	Fresadora, con cuchilla bailarina	20
6	Fresar espesor aproximado de la probeta	Fresadora, con cuchilla bailarina	10
7	Rectificar las superficies hasta espesor requerido	Rectificadora, disco de piedra rectificadora	10
8	Trazar muesca	Calibrador Pie de rey y trazador	5
9	Realizar muesca	Rectificadora con disco de corte	30
10	Trazar centros de agujeros para mordazas	Calibrador Pie de rey y trazador	5
11	Realizar agujeros de diámetro ½"	Taladro y kit de brocas	25
12	Trazar centros de agujeros para extensómetro	Calibrador Pie de rey y trazador	5
13	Realizar agujeros de diámetro 1/8"	Taladro y kit de brocas	10
14	Realizar rosca 5/32" NC	Machuelo y gira machuelos	10

Fuente: Anexo D

### **3.2 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL EQUIPO**

La norma ASTM E399 cubre la determinación de la resistencia a la fractura en el plano de tensión ( $K_{Ic}$ ) de materiales metálicos mediante pruebas de fatiga usando una variedad de probetas con grieta. Para lo cual se utilizará la máquina de ensayos universales MTS-810 del laboratorio de Mecánica de Materiales de la ESPE.

### 3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

EQUIPO: Máquina de ensayos universales<sup>4</sup>

CÓDIGO: RM-30

MARCA: MTS

MANUAL: MRM-30

MODELO: 810-14-2

#### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

VOLTAJE: 230 V

REFRIGERANTE: N/A

FASES: 3

TIPO DE MOTOR: SC

CICLOS: 60 Hz

POTENCIA MOTOR: 40 HP

PESO: 3000 Kg

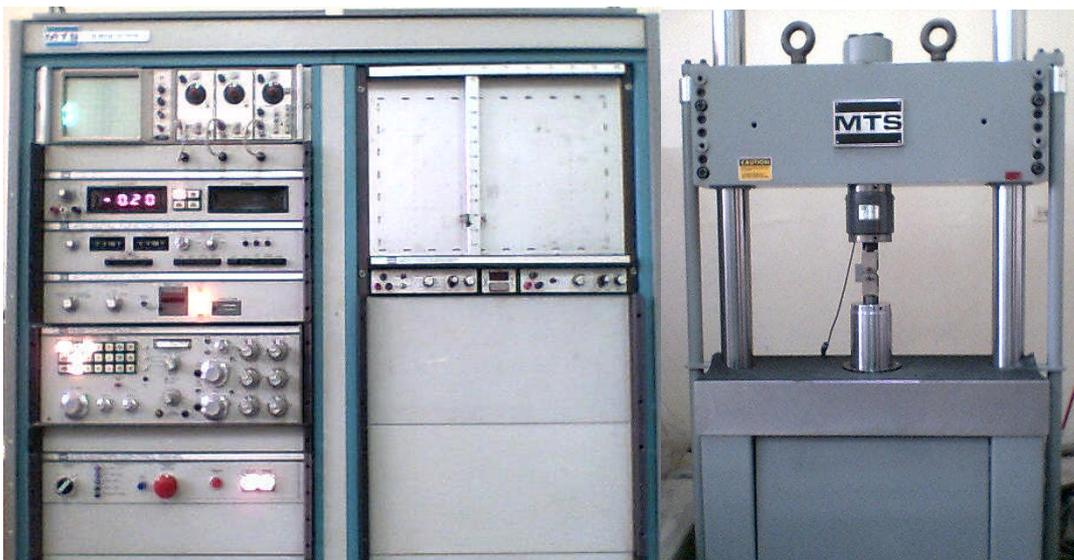
VELOCIDAD MÁX MOTOR: 1765 rpm

CAPACIDAD MÁXIMA: 500 KN

COMBUSTIBLES: N/A

En el equipo se pueden realizar ensayos estáticos (tracción y compresión) y ensayos dinámicos (fatiga); los cuales se encuentran determinados por funciones lineales para el caso estático y sinusoidales en el caso dinámico.

Así como también la obtención de datos de la máquina se lo puede realizar en control de carga, desplazamiento y deformación; ya que los tres parámetros se los puede sensar gracias a las facilidades del equipo.



**Figura 3.3 Máquina de Ensayos Universales MTS 810.**

---

<sup>4</sup> Detalles Anexo E

La máquina de ensayos universales MTS, dispone de los siguientes accesorios:

- Galga de desplazamiento CLIP-ON GAGE 632.02C-20<sup>5</sup>



**Figura 3.4 Galga de desplazamiento CLIP-ON GAGE Modelo 632.02C-20**

- Mordazas para mecánica de fractura FRACTURE MECHANICS GRIPS Modelo 640.20 A-03.<sup>6</sup>



**Figura 3.5 Mordazas FRACTURE MECHANICS GRIPS Modelo 640.20**

<sup>5</sup> Detalles Anexo E

<sup>6</sup> Detalles Anexo E

### 3.2.2 ESQUEMA DE MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSALES MTS 810

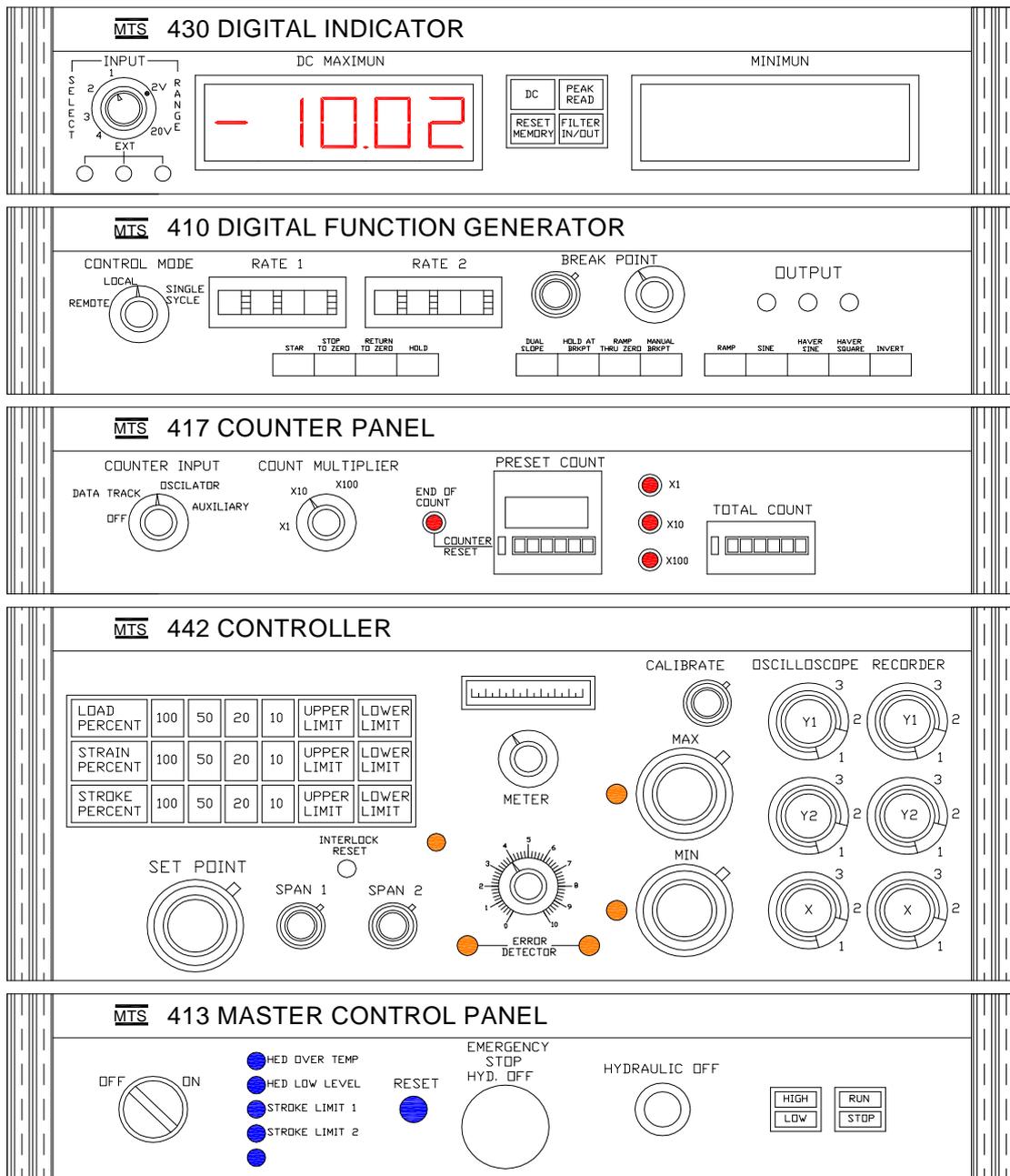
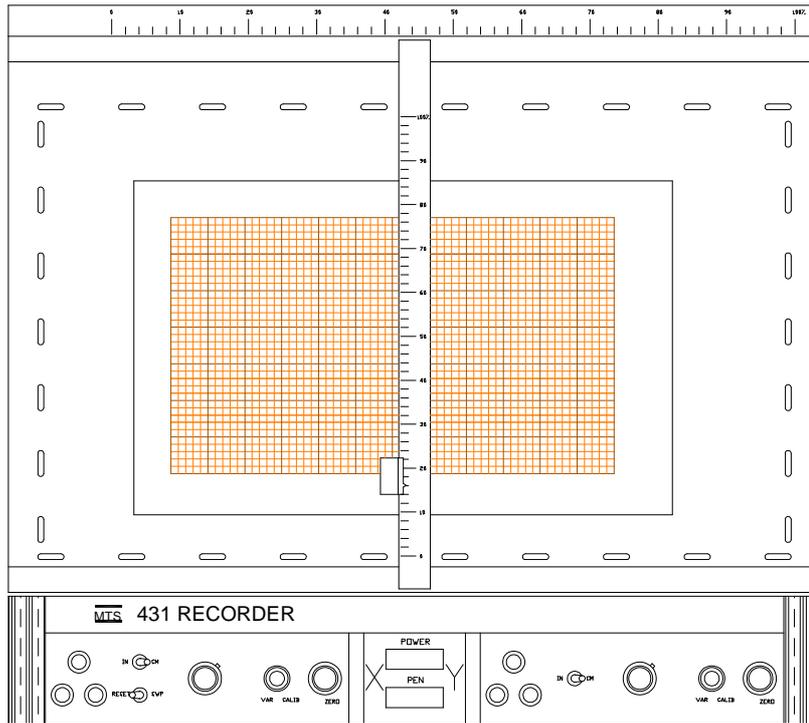
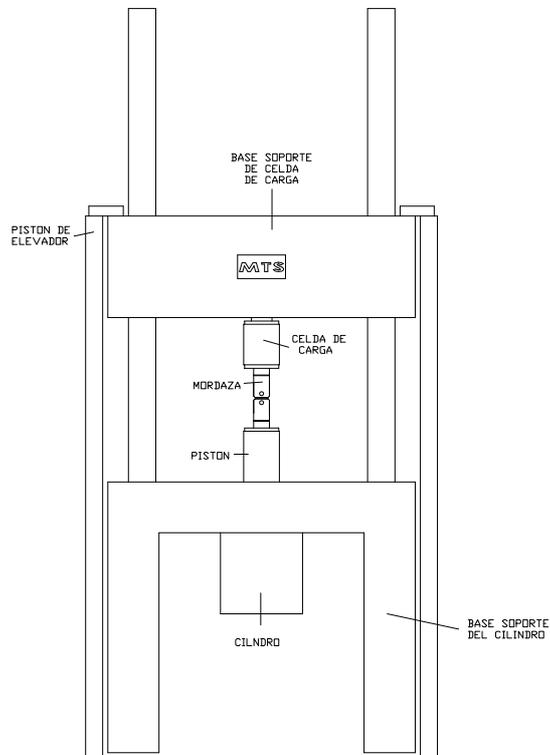


Figura 3.6 Esquema del Panel de Control de la máquina de ensayos universales MTS 810.



**Figura 3.7 Esquema del Graficador de la máquina de ensayos universales MTS 810.**



**Figura 3.8 Esquema del Cabezal de la máquina de ensayos universales MTS 810.**

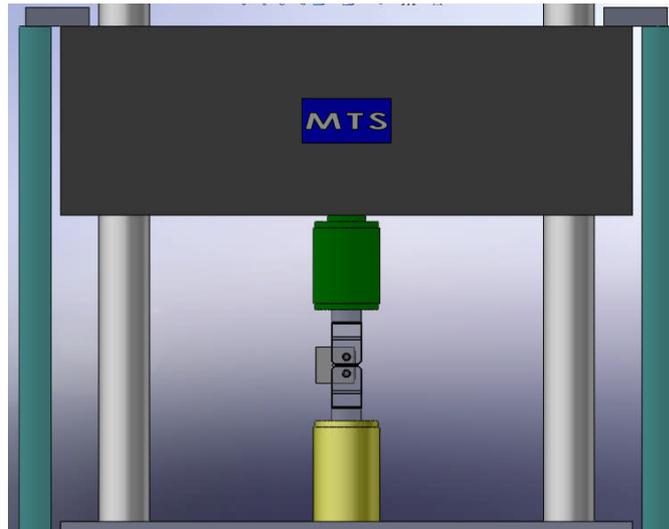
### **3.2.3 ENSAYO DE FATIGA**

#### **3.2.3.1 Encerado del Equipo**

- Accionar los breakers para energizar el estabilizador de voltaje.
- Energizar la máquina con la perilla ON/OFF del panel 413.
- Al inicio el equipo se encuentra desfasado de los parámetros de operación y se puede observar encendidos los indicadores de error, para lo cual se debe esperar aproximadamente 2 minutos, para posteriormente encerar los parámetros de carga → LOAD → (1), deformación → STRAIN → (2) y desplazamiento → STROKE → (3).
- Primero se debe observar el indicador digital de voltaje del panel 430, para cada transductor correspondiente a los parámetros de carga (1), deformación (2) y desplazamiento (3) seleccionando con la perilla INPUT.
- Con la perilla INPUT del panel 430 seleccionar el parámetro (1), correspondiente a carga; con su respectivo transductor ubicado en el interior del panel 442 encerar el voltaje del indicador digital. Realizar el mismo procedimiento para los dos parámetros restantes de deformación y desplazamiento.
- Presionar el botón INTERLOCK RESET del panel 442 y RESET del panel 413.
- Accionar el mando Control de desplazamiento STROKE, del panel 442.
- Encender el sistema hidráulico en baja presión accionando el mando LOW del panel 413.

#### **3.2.3.2 Montaje de la Probeta CT ASTM E399**

- Ensamblar las mordazas modelo MTS 640.20 en el acople del pistón y de la celda de carga del cabezal de la máquina de ensayos universales MTS 810.
- Con el transductor de desplazamiento (3) elevar el pistón hasta la altura requerida para sujetar la probeta en las mordazas.
- Colocar la probeta dentro de las mordazas y colocar los pasadores con sus respectivas binchas de seguridad.
- El montaje debe estar como se muestra en las Figuras 3.8 y 3.9



**Figura 3.9 Montaje de la Probeta CT ASTM E399**



**Figura 3.10 Montaje de la Probeta CT ASTM E399**

### **3.2.3.3 Procedimiento de Fatiga**

- Apagar el sistema hidráulico presionando el botón HYDRAULIC OFF del panel 413.
- Accionar control carga LOAD del panel 442.
- Encender el sistema hidráulico en baja presión accionando el botón LOW del panel 413.
- Verificar que la perilla CONTROL MODE se encuentre en la posición LOCAL del panel 410.
- En el panel 410 programar la frecuencia de trabajo con RATE 1.

- Seleccionar la función SINE del panel 410.
- En el panel 417 ubicar la perilla COUNT MULTIPLIER en el factor requerido (x1, x10, x100) para registrar los ciclos en PRESET COUNT.
- Con SET POINT del panel 442 calibrar el voltaje correspondiente a la mitad de la carga máxima de trabajo, el cual se encuentra en la posición 5/0.
- En SPAN 1 del panel 442 programar el voltaje correspondiente al valor de la amplitud.
- Seleccionar REMOTE con la perilla CONTROL MODE del panel 410.
- Activar alta presión del sistema hidráulico presionando HIGH del panel 413.
- Presionar RUN del panel 413, para comenzar el ensayo de fatiga.
- Controlar que el indicador PRESET COUNT del panel 417, no marque 1000, para evitar la detención del ensayo; presionar COUNTER RESET si este fuera el caso.
- Verificar constantemente el crecimiento de la grieta, mediante inspecciones visuales y exposición de grieta por tintas penetrantes como complemento, tal como se muestra en las Figuras 3.11, 3.12 y 3.13.



**Figura 3.11 Inspección visual**



**Figura 3.12 Inspección visual**



**Figura 3.13 Exposición de grieta por tintas penetrantes.**

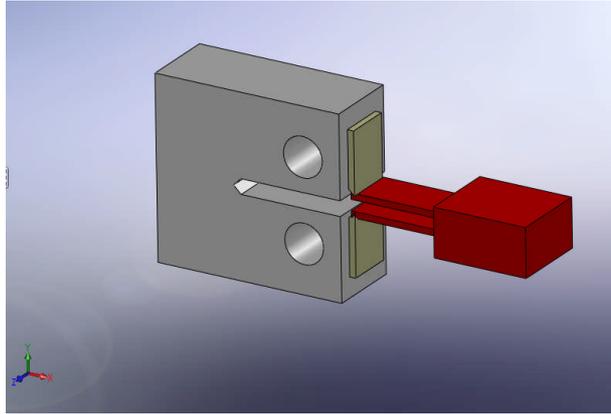
- Una vez que la grieta ha alcanzado aproximadamente la longitud esperada detener el ensayo presionando los botones STOP y LOW en el panel 413.
- Retornar a la posición LOCAL con la perilla CONTROL MODE del panel 410.
- Regresar a la posición inicial del SET POIN 5/0 del panel 442.
- Registrar el número de ciclos alcanzados por el pre-agrietamiento de fatiga del TOTAL COUNT del panel 417.

### **3.2.4 ENSAYO DE FRACTURA**

- Ensamblar el extensómetro MTS Modelo 632.02C-20, en la abertura de la muesca de la probeta CT.



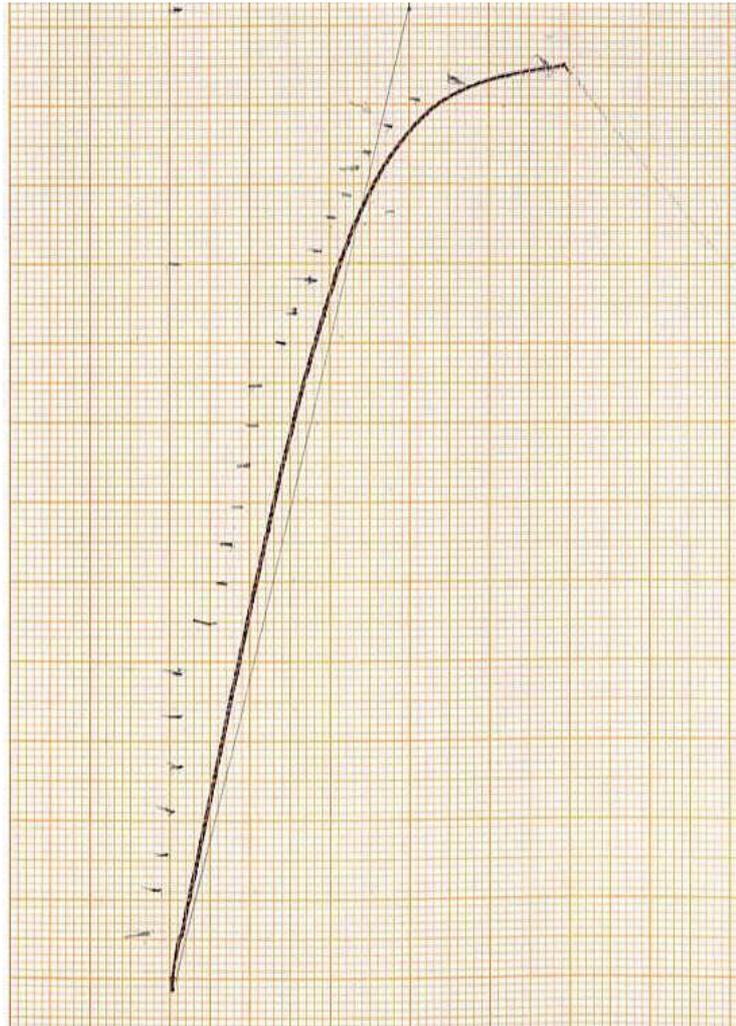
**Figura 3.14 Ensamble del extensómetro**



**Figura 3.15 Ensamble del extensómetro**

- Apagar el panel de control con la perilla CONSOLE POWER ON/OFF del panel 413.
- Conectar el extensómetro en el plug correspondiente a la señal de deformación.
- Encender el panel de control.
- Presionar el botón INTERLOCK RESET del panel 442 y RESET del panel 413.
- Encender el sistema hidráulico en baja presión accionando el mando LOW del panel 413.
- Programar el tiempo de duración del ensayo con RATE 1 y el tiempo de retorno del pistón a la posición inicial con RATE 2 en el panel 410.
- Seleccionar la función RAMP del panel 410.
- En el panel 442 las perillas RECORDER deben estar ubicadas en las posiciones: Y1 → LOAD, Y2 → LOAD, X → STRAIN y todos sentido positivo (+).
- Ubicar una hoja de papel milimetrado y un marcador en el graficador.
- Seleccionar las escalas de los ejes X y Y correspondientes al extensómetro y carga respectivamente.
- Encender el graficador con el botón POWER del panel 431.
- Con las perillas ZERO del panel 431 ubicar el inicio de la gráfica en el papel milimetrado, para los ejes X y Y.
- Desplazar el switch de la posición RESET a la posición SWP del panel 431.
- Registrar el voltaje inicial que sensa el extensómetro con la perilla INPUT en la posición 2 del panel 430.

- Colocar la perilla SPAN 1 del panel 442 en un voltaje alto.
- Seleccionar REMOTE con la perilla CONTROL MODE del panel 410.
- Activar alta presión del sistema hidráulico presionando HIGH del panel 413.
- Presionar RUN del panel 413, para comenzar el ensayo de fractura.
- Registrar el voltaje correspondiente a carga máxima que la probeta puede resistir del INDICADOR DIGITAL del panel 430.



**Figura 3.16 Diagrama carga-deformación**

- Presionar los botones STOP y LOW del panel 413.
- Presionar el botón RETURN TO ZERO del panel 410.
- Retirar los pasadores de las mordazas y extraer la probeta.
- Apagar el PANEL DE CONTROL.

### 3.2.5 ENSAYO DE FRACTURA A BAJAS TEMPERATURAS

- Colocar en un recipiente bloques pequeños de hielo seco junto con las probetas a ser fracturadas.
- Verter acetona sobre los bloques de hielo hasta cubrir por completo las probetas.



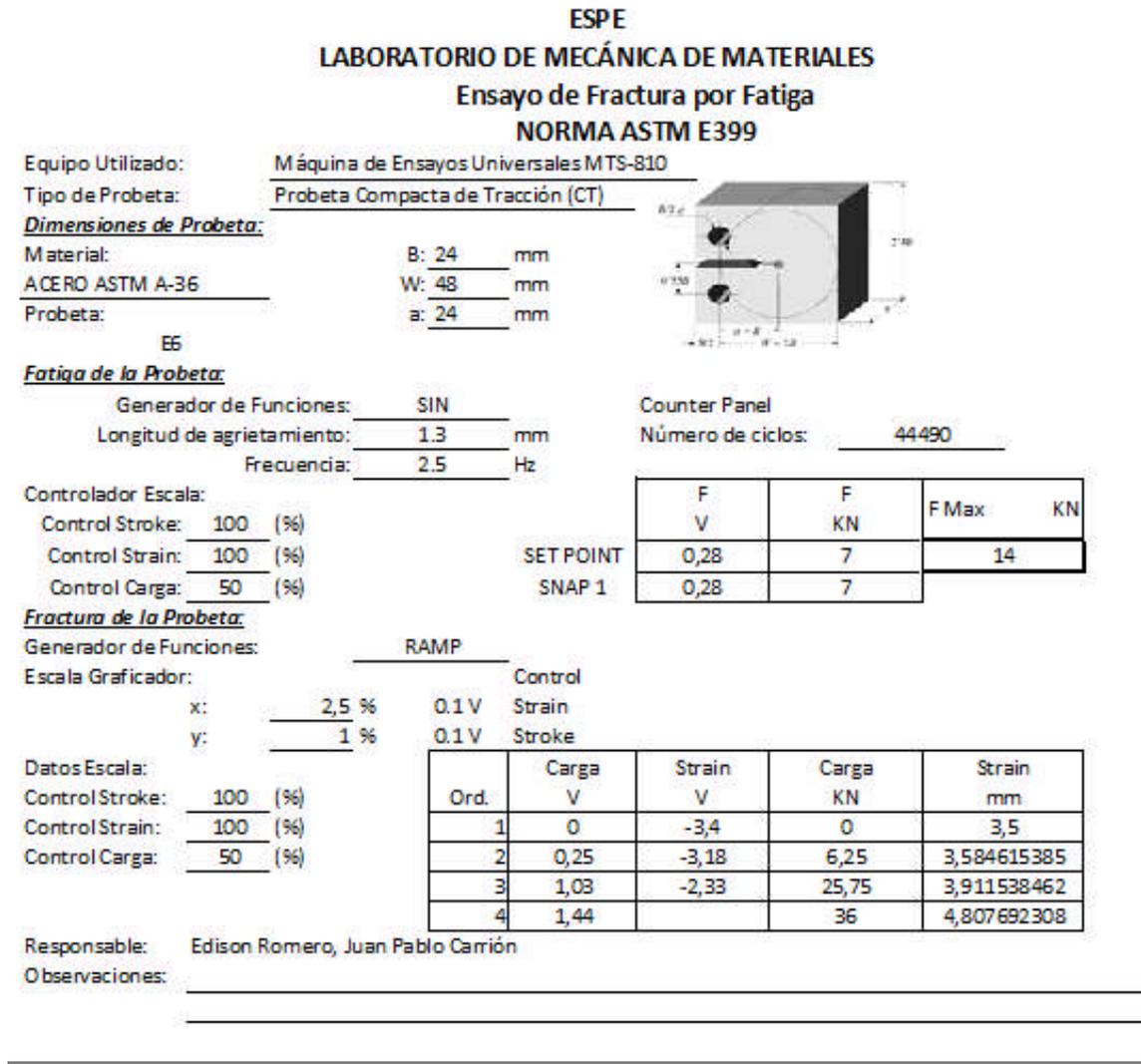
**Figura 3.17 Disminución de temperatura de las probetas.**

- Agitar la mezcla por unos 20 minutos aproximadamente hasta llegar a una temperatura comprendida entre los  $-50^{\circ}$  y  $-60^{\circ}$  C.
- Retirar la probeta de la mezcla y ensamblar rápidamente en las mordazas de la máquina de ensayos universales MTS 810 mientras se controla la temperatura.
- Repetir el procedimiento de fractura.



**Figura 3.18 Fractura a baja temperatura.**

### 3.3 PRUEBAS DE FRACTURA EN ACERO ESTRUCTURAL ASTM A-36.

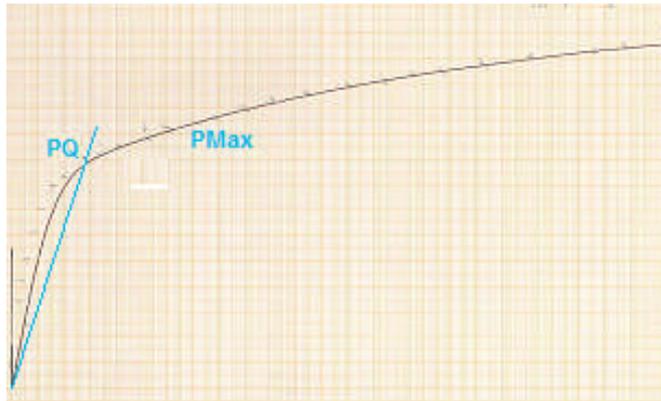


**Figura 3.19 Ensayo de fractura por Fatiga para la probeta de acero  
estructural ASTM A-36 E6.<sup>7</sup>**

La Figura 3.19 muestra los datos obtenidos a partir de un ensayo de fractura por fatiga el cual consta de: forma y dimensiones de la probeta, fatiga y fractura de la misma.

A partir de los procedimientos 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5 y de la curva de la Figura 3.20, se obtuvieron los datos correspondientes a la Tabla 3.6 para las probetas de acero estructural ASTM A-36.

<sup>7</sup> Cálculo de FMáx Anexo G, Reportes de Ensayos Anexo H



**Figura 3.20 Diagrama Carga-Deformación unitaria PQ y PMax probeta de acero estructural ASTM A-36 E6.**

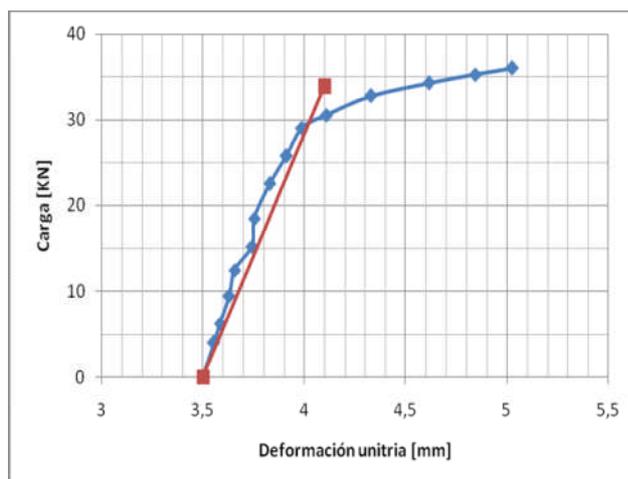
Fuente: Anexo H

La Figura 3.21 es la gráfica de la curva Carga-deformación unitaria que se la realiza a partir de los datos que se obtuvieron del ensayo de fractura por fatiga por las facilidades que presta la máquina de ensayos universales MTS 810, indicados en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Datos de la curva Carga-deformación unitaria, ensayo de fractura por fatiga de máquina MTS-810 probeta de acero estructural ASTM A-36 E6.**

Ord.	Carga V	Strain V	Carga KN	Strain mm
1	0	-3,4	0	3,5
2	0,16	-3,26	4	3,553846
3	0,25	-3,18	6,25	3,584615
4	0,38	-3,06	9,5	3,630769
5	0,5	-2,99	12,5	3,657692
6	0,61	-2,77	15,25	3,742308
7	0,74	-2,74	18,5	3,753846
8	0,9	-2,54	22,5	3,830769
9	1,03	-2,33	25,75	3,911538
10	1,16	-2,13	29	3,988462
11	1,22	-1,81	30,5	4,111538
12	1,31	-1,24	32,75	4,330769
13	1,37	-0,5	34,25	4,615385
14	1,41	0,1	35,25	4,846154
15	1,44	0,57	36	5,026923

Fuente: Anexo I



**Figura 3.21 Curva carga-deformación unitaria para la probeta de acero estructural ASTM A-36 E6.**

Fuente: Anexo I

Las dimensiones de la longitud  $a$  correspondientes al pre-agrietamiento por fatiga de las probetas se listan en la Tabla 3.5, las mismas que se realizaron luego de fracturar por completo las probetas.

**Tabla 3.5 Dimensiones de grieta acero estructural ASTM A-36**

PROBETA	ESPESOR B [mm]	MEDIDA INICIAL Lo [mm]	MEDIDA FINAL Lf [mm]	LONGITUD L [mm]	SUMA [mm]	PROMEDIO [mm]	LONGITUD DE GRIETA a [mm]
E1	24			0,000	0,000	0,000	-12,000
				0,000			
				0,000			
E2	24	-0,153	36,001	36,154	110,223	36,741	24,741
		-0,169	37,609	37,778			
		-0,373	35,918	36,291			
E3	24	1,001	37,418	36,417	111,104	37,035	25,035
		0,584	38,277	37,693			
		0,363	37,357	36,994			
E4	21	0,666	32,214	31,548	95,638	31,879	21,379
		0,310	32,957	32,647			
		0,430	31,873	31,443			
E5	21	0,959	32,866	31,907	97,497	32,499	21,999
		1,016	34,313	33,297			
		0,922	33,215	32,293			

**Tabla 3.5 Dimensiones de grieta acero estructural ASTM A-36  
(Continuación)**

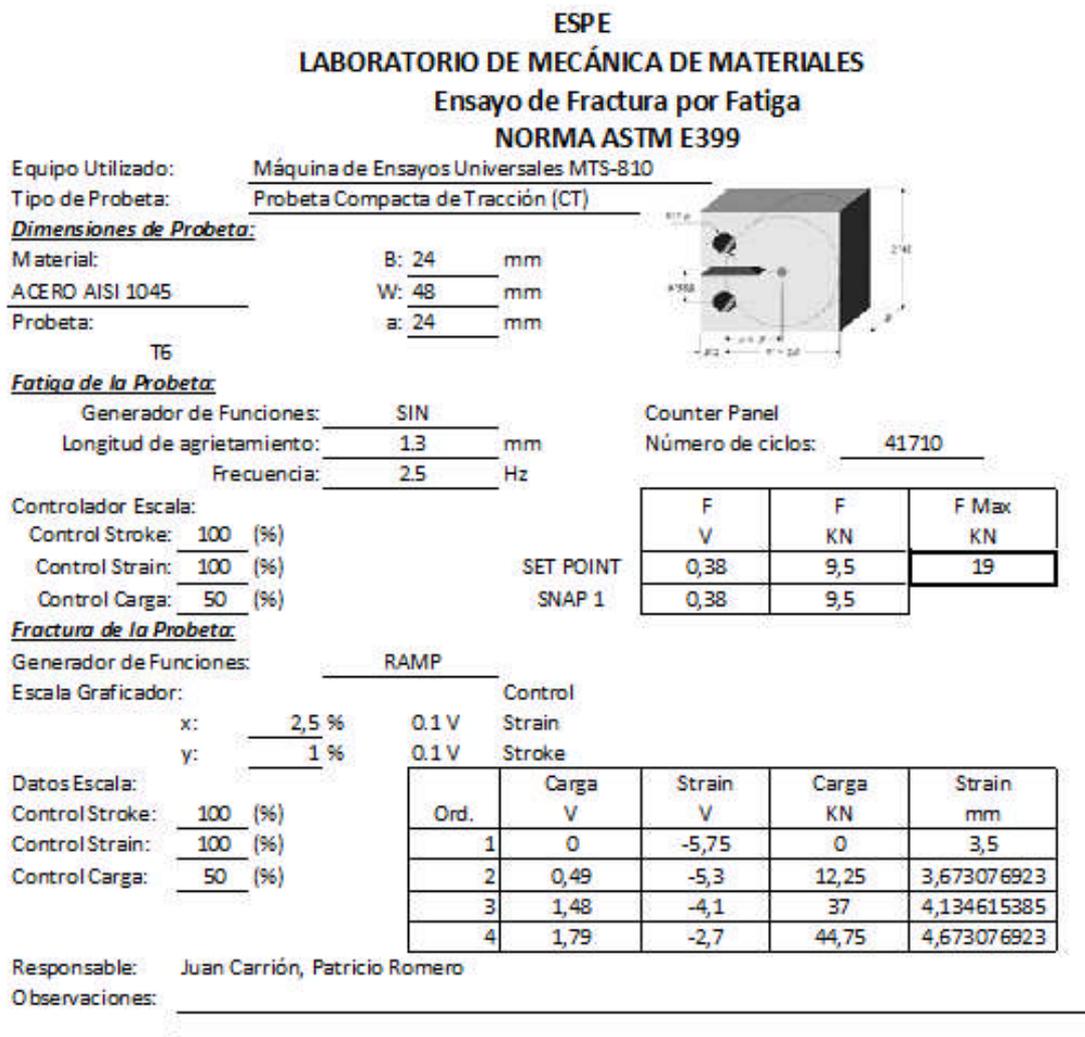
PROBETA	ESPESOR B [mm]	MEDIDA INICIAL Lo [mm]	MEDIDA FINAL Lf [mm]	LONGITUD L [mm]	SUMA [mm]	PROMEDIO [mm]	LONGITUD DE GRIETA a [mm]
E6	24	0,717	36,726	36,009	110,918	36,973	24,973
		0,745	38,603	37,858			
		0,404	37,455	37,051			
E7	24	-0,317	35,639	35,956	109,767	36,589	24,589
		-0,369	37,267	37,636			
		-0,242	35,933	36,175			
E8	24	0,200	36,496	36,296	111,206	37,069	25,069
		0,211	38,270	38,059			
		0,062	36,913	36,851			
E9	24	0,421	37,550	37,129	110,629	36,876	24,876
		0,153	37,692	37,539			
		0,451	36,412	35,961			
E10	24	1,141	38,241	37,100	111,692	37,231	25,231
		1,500	39,550	38,050			
		1,866	38,408	36,542			

**Tabla 3.6 Datos obtenidos del Ensayo de Fractura por Fatiga para el acero estructural ASTM A-36**

Probeta	PQ [KN]	Pmax [KN]	a [mm]	W [mm]	B [mm]	N	PFatiga [KN]
E1				48	24	10800	22
E2			24,74	48	24	21880	22
E3	36,8	39,8	25,03	48	24	15010	22
E4	24	27,3	21,38	42	21	52320	11
E5	21	25,3	22,00	42	21	42120	11
E6	30	36	24,97	48	24	44490	14
E7	34	40	24,59	48	24	43820	14
E8	33	35,8	25,07	48	24	48300	14
E9	29,3	31,3	24,88	48	24	61860	14
E10	31,5	34,3	25,23	48	24	73210	14

Fuente: Anexos H, I

### 3.4 PRUEBAS DE FRACTURA EN ACERO GRADO MAQUINARIA AISI 1045

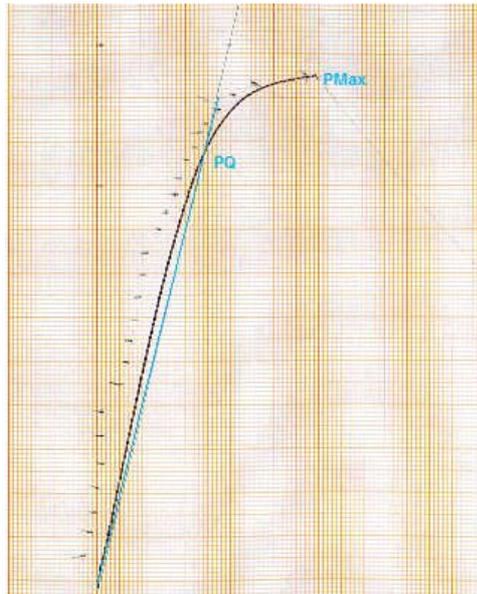


**Figura 3.22 Ensayo de fractura por Fatiga para la probeta de acero grado maquinaria AISI 1045 T6.<sup>8</sup>**

La Figura 3.22 muestra los datos obtenidos a partir de un ensayo de fractura por fatiga el cual consta de: forma y dimensiones de la probeta, fatiga y fractura de la misma.

A partir de los procedimientos 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5 y de la curva de la Figura 3.23, se obtuvieron los datos correspondientes a la Tabla 3.9 para las probetas de acero grado maquinaria AISI 1045.

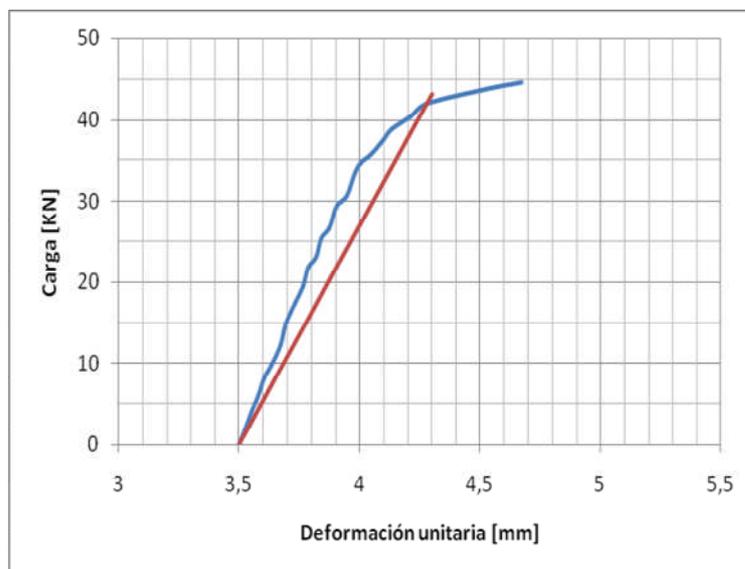
<sup>8</sup> Cálculo de FMáx Anexo G, Reportes de Ensayos Anexo H



**Figura 3.23 Diagrama Carga-Deformación unitaria PQ y PMax probeta de acero grado maquinaria AISI 1045 T6.**

Fuente: Anexo H

La Figura 3.24 es la gráfica de la curva Carga-deformación unitaria que se realiza a partir de los datos que se obtuvieron del ensayo de fractura por fatiga por las facilidades que presta la máquina de ensayos universales MTS 810, indicados en la Tabla 3.7.



**Figura 3.24 Curva carga-deformación unitaria para la probeta de acero grado maquinaria AISI 1045 T6.**

Fuente: Anexo I

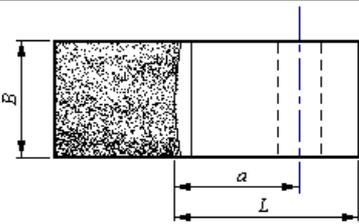
**Tabla 3.7 Datos de la curva Carga-deformación unitaria, ensayo de fractura por fatiga de máquina MTS-810 probeta de acero grado maquinaria AISI 1045 T6.**

Ord.	Carga V	Strain V	Carga KN	Strain mm
1	0	-5,75	0,00	3,5
2	0,08	-5,68	2,00	3,526923
3	0,17	-5,61	4,25	3,553846
4	0,24	-5,54	6,00	3,580769
5	0,33	-5,48	8,25	3,603846
6	0,39	-5,4	9,75	3,634615
7	0,49	-5,3	12,25	3,673077
8	0,60	-5,24	14,96	3,696154
9	0,69	-5,15	17,33	3,730769
10	0,78	-5,06	19,43	3,765385
11	0,87	-5	21,79	3,788462
12	0,92	-4,92	23,10	3,819231
13	1,02	-4,86	25,46	3,842308
14	1,07	-4,77	26,78	3,876923
15	1,18	-4,7	29,40	3,903846
16	1,23	-4,59	30,71	3,946154
17	1,33	-4,5	33,34	3,980769
18	1,39	-4,43	34,65	4,007692
19	1,43	-4,32	35,70	4,05
20	1,50	-4,19	37,54	4,1
21	1,55	-4,1	38,85	4,134615
22	1,62	-3,9	40,43	4,211538
23	1,68	-3,72	42,00	4,280769
24	1,75	-3,04	43,84	4,542308
25	1,79	-2,7	44,63	4,673077

Fuente: Anexo I

Las dimensiones de la longitud  $a$  correspondientes al pre-agrietamiento por fatiga de las probetas se listan en la Tabla 3.8, las mismas que se realizaron luego de fracturar por completo las probetas.

**Tabla 3.8 Dimensiones de grieta acero grado maquinaria AISI 1045**



PROBETA	ESPESOR B [mm]	MEDIDA INICIAL Lo [mm]	MEDIDA FINAL Lf [mm]	LONGITUD L [mm]	SUMA [mm]	PROMEDIO [mm]	LONGITUD DE GRIETA a [mm]
T1	24	1,256	38,211	36,955	108,482	36,161	24,161
		1,345	37,175	35,830			
		1,172	36,869	35,697			
T2	24			0,000	0,000	0,000	-12,000
				0,000			
				0,000			
T3	24	1,348	37,190	35,842	108,483	36,161	24,161
		1,292	38,222	36,930			
		1,163	36,874	35,711			
T4	21	-0,104	31,501	31,605	94,984	31,661	21,161
		2,241	34,905	32,664			
		2,446	33,161	30,715			
T5	21	0,500	32,205	31,705	97,048	32,349	21,849
		0,208	33,867	33,659			
		0,316	32,000	31,684			
T6	24	0,159	36,386	36,227	110,011	36,670	24,670
		0,313	37,614	37,301			
		0,163	36,646	36,483			
T7	24	0,392	36,075	35,683	108,637	36,212	24,212
		0,301	37,251	36,950			
		0,130	36,134	36,004			
T8	24	0,396	35,476	35,080	109,249	36,416	24,416
		0,396	37,968	37,572			
		0,049	36,646	36,597			

**Tabla 3.9 Datos obtenidos del Ensayo de Fractura por Fatiga para el acero grado maquinaria AISI 1045**

Probeta	PQ [KN]	Pmax [KN]	a [mm]	W [mm]	B [mm]	N	PFatiga [KN]
T1	28,3	37,75	24,16	48	24	862	25
T2		0		48	24	0	
T3		0	24,16	48	24	0	
T4	29	36,25	21,16	42	21	35930	15
T5	30	31	21,85	42	21	32310	15
T6	42	44,75	24,67	48	24	41710	19
T7	40	43,75	24,21	48	24	40830	19
T8	42	45	24,42	48	24	39560	19

Fuente: Anexos H, I