

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Ensayos de Fatiga por Flexión en Acero ASTM – A36 y Acero ASTM
– A36 con Recubrimiento de Acero Inoxidable AISI-304 por
Termorociado**

Alfonso Antonio Celleri Calle

Alfredo Valarezo Ph.D., Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Quito, mayo de 2014

Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Ensayos de Fatiga por Flexión en Acero ASTM – A36 y Acero ASTM – A36 con
Recubrimiento de Acero Inoxidable AISI-304 por Termorociado**

Alfonso Antonio Celleri Calle

Alfredo Valarezo, Ph.D.

Director y Miembro del Comité de Tesis

Telmo Sánchez, Ph.D.

Miembro del Comité de Tesis

Bernard Herrera, Ing.

Miembro del Comité de Tesis

Ximena Córdova, Ph.D.

Decana de la Escuela de Ingeniería

Colegio de Ciencia e Ingeniería

Quito, mayo de 2014

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art.144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Nombre: Alfonso Antonio Celleri Calle

C. I.: 1714232806

Fecha: Quito, mayo de 2014

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado para mis padres que fueron los que me dieron esta oportunidad y su apoyo incondicional.

Agradecimientos

Agradecimiento a todos los que contribuyeron con el proceso de educación y un agradecimiento especial a Fabián Morales, Edison Bonifaz, Bernard Herrera, Telmo Sánchez y Alfredo Valarezo.

Resumen

La mayoría de fallas catastróficas en la industria de ingeniería son causadas por fracturas por fatiga. La importancia de su análisis en el diseño mecánico es fundamental ya que se puede calcular la vida útil del producto, planificar mantenimiento, evitar catástrofes, tener confiabilidad, disminuir costos, optimizar recursos, entre muchas otras ventajas. Este proyecto de tesis consiste en el desarrollo y puesta-a-punto de la máquina de fatiga por flexión diseñada y construida en el año 2012 por Joaquín Mogollón, estudiante de ingeniería mecánica de la Universidad San Francisco de Quito. Este proyecto contiene la información necesaria acerca de fatiga, tipos de cargas que pueden ser aplicadas, su importancia en el diseño, tipos de análisis de fatiga, diferentes tipos de ensayos de fatiga e importancia de las propiedades mecánicas de los materiales. El desarrollo de la máquina consiste en una repotenciación del sistema mecánico, eléctrico y de control, optimizando la máquina en esas tres áreas dejándola lista para que todos los estudiantes de ingeniería mecánica puedan completar los laboratorios de ensayos destructivos en nuestra universidad, también los profesores y estudiantes puedan analizar nuevos materiales, recubrimientos, maquinado en frío o caliente, tratamientos térmicos, etc. Con la máquina en su óptimo funcionamiento se realizaron pruebas para verificar el rendimiento y precisión de la máquina. Se realizaron pruebas con probetas de acero A36 para generar una curva S-N, y también se realizaron ensayos con una capa de recubrimiento de acero inoxidable y se obtuvieron conclusiones. También se realizó un capítulo basado en los procedimientos y calibración de la máquina para realizar ensayos satisfactorios y el operador pueda hacer uso de la máquina sin dificultad.

Abstract

Most failures in the engineering industry are caused by fatigue. The importance of fatigue analysis in mechanical design is essential since you can calculate the lifetime of materials, plan maintenance, avoid disasters, have reliability, reduce costs, optimize resources, among many other benefits. This thesis project is a continuation and development of a bending fatigue machine designed and built in 2012 by Joaquín Mogollón, mechanical engineering student at the Universidad San Francisco de Quito. This project contains the necessary information of fatigue, different types of loads that can be applied, its importance in mechanical design, fatigue analysis types, different types of fatigue tests and importance of the mechanical properties of materials. The development of the machine consists in the upgrade of mechanical, electrical and control system. Optimizing the machine in those three areas making it ready for all mechanical engineering students to complete destructive testing laboratories at our university. Also teachers and students may explore new materials, coatings, hot or cold machining, heat treatment, etc. With the machine running at its optimum level, conclusions were made running the machine with ASTM A 36 Steel to verify performance and accuracy of the machine. Stainless Steel coating was also used to observe how coating affects to fatigue life. One chapter of the thesis is based on calibration procedures and a student manual to perform satisfactory fatigue testing so the operator can use the machine without difficulty.

Tabla de Contenido

Resumen	7
Abstract	8
Tabla de Contenido	9
Lista de Figuras	11
Lista de Tablas	13
Lista de Ecuaciones	14
Capítulo 1. Introducción	15
1.1. Introducción a la mecánica de los materiales y sus propiedades	15
1.2. Análisis de fatiga e importancia en el diseño	17
1.3. Tipos de ensayos de fatiga.....	18
1.4. Teorías de fatiga	20
1.5. Curvas S-N	21
1.6. Motivos de la falla por fatiga e importancia de diseño de probeta	22
1.7 Fallas por fatiga en aceros con recubrimientos	24
Capítulo 2. Objetivos y Repotenciación del sistema	26
2.1. Objetivo de la tesis:	26
2.2 Objetivos específicos de la tesis:.....	26
2.3. Repotenciación del sistema.....	27
2.4. Sistema eléctrico de potencia	28
2.5. Sistema eléctrico de control	30
2.6. Sistema mecánico y estética.....	34
Capítulo 3. Materiales y Metodología	37
3.1. Maquinado de Probetas.....	39
3.2. Tratamiento Térmico	41
3.3. Probetas con recubrimiento.....	42
3.4. Cálculos y metodología.....	44
3.5. Procedimiento de operación y calibración de la máquina	54
3.6. Procedimiento de ensayos para estudiantes	58
Capítulo 4. Análisis de probetas y resultados	62
4.1. Resultado de las probetas.....	62
4.2 Análisis de resultados	82

4.3. Diagrama S-N Acero A 36	84
4.4. Resultados de probetas con recubrimiento	86
4.5. Discusión.....	88
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	94
5.1. Recomendaciones	96
Bibliografía.....	97
Anexo A	99
Anexo B	105

Lista de Figuras

<i>Figura 1:</i> Diagrama Esfuerzo Deformación de una típica estructura de acero (Gere, 2008)...	16
<i>Figura 2:</i> Diagrama Esfuerzo vs Deformación de un material frágil y uno dúctil. (Pérez, 2006)	17
<i>Figura 3:</i> Máquina de ensayos de tracción, compresión y fatiga (UPC, 2014).....	18
<i>Figura 4:</i> Máquina de fatiga por flexión rotativa (de Vedia & Svoboda, 2014).....	19
<i>Figura 5:</i> Render máquina de fatiga por flexión pura (Mogollón, 2012).....	20
<i>Figura 6:</i> Curva S-N para Acero y Aluminio (Gere, 2008)	22
<i>Figura 7:</i> Estudio de Von Mises probeta estándar. Se puede observar que tiene esfuerzos constantes en la mayor parte del área de la probeta.	24
<i>Figura 8:</i> Antiguo sistema eléctrico de la máquina de fatiga (Mogollón, 2012)	29
<i>Figura 9:</i> Sistema eléctrico actual máquina de ensayos de fatiga.....	30
<i>Figura 10:</i> Sistema de control de vueltas máquina de fatiga 2012.....	31
<i>Figura 11:</i> Sensor láser, contador digital y variador de frecuencia correctamente instalados.	32
<i>Figura 12:</i> Esquema eléctrico de potencia y control (Mogollón, 2012)	33
<i>Figura 13:</i> Ensamble final máquina de ensayos de fatiga	36
<i>Figura 14:</i> Diagrama S-N por ensayos de flexión (Boyer, 1986)	38
<i>Figura 15:</i> Maquinado de radios con fresas de 8 y 9 mm de radio.	40
<i>Figura 16:</i> Pulido y rectificado de probeta estándar	41
<i>Figura 17:</i> Probeta estándar finalizado el recocido	42
<i>Figura 18:</i> Proceso de granallado de recubrimiento de probetas	43
<i>Figura 19:</i> Proceso de termorociado recubrimiento de probetas.....	44
<i>Figura 20:</i> Medidas de la probeta y ubicación de la fuerza	45

Figura 21: Diagrama Esfuerzo – Deformación a diferentes temperaturas acero A 36 (Milke, 2007)	53
Figura 22: Máquina de fatiga de ensayos por flexión y probeta estándar	59
Figura 23: Ejemplo de diagrama de fatiga S-N (Budinas & Nisbett, Eight Edition)	60
Figura 24: Simulación en Abaqus deflexión, esfuerzo y deformación plástica para deflexión de 9 mm	64
Figura 25: Simulación en Abaqus deflexión, esfuerzo y deformación plástica para deflexión de 13 mm	68
Figura 26: Simulación en Abaqus deflexión, esfuerzo y deformación plástica para deflexión de 17 mm	71
Figura 27: Simulación en Abaqus deflexión, esfuerzo y deformación plástica para deflexión de 21 mm	74
Figura 28: Diagrama S vs espesor deformación plástica y esfuerzo S11 para placa con recubrimiento 17 mm	77
Figura 29: Diagrama S vs espesor deformación plástica y esfuerzo S11 para placa con recubrimiento 21 mm	80
Figura 30: Diagrama S-N Experimental Acero A 36 (Boyer, 1986) y ensayos experimentales	85
Figura 31: Diagrama S-N experimental Acero A 36 (Boyer, 1986) y probetas con recubrimiento	87
Figura 32: Nucleación de grieta de un ensayo típico de flexión rotacional (Nascimento, Souza, Miguel, Pigatin, & Voorwald , 1999)	90
Figura 33: Esfuerzos residuales aplicados en el espesor durante el proceso de HVOF (Nascimento, Souza, Miguel, Pigatin, & Voorwald , 1999)	91

Figura 34: Distribución de ensayos de fatiga con recubrimientos y sin recubrimiento. (Ibrahim & Berndt, 2006).....	92
Figura 35: Grietas originadas desde el recubrimiento de cromo hasta el sustrato (Ibrahim & Berndt, 2006)	93

Lista de Tablas

Tabla 1: Modificaciones estéticas máquina de fatiga	35
Tabla 2: Propiedades mecánicas acero ASTM A-36 y acero inoxidable 304 unidades SI (Beer, 2010)	37
Tabla 3: Dimensiones de la probeta estándar en Sistema internacional.....	46
Tabla 4: División de perforaciones por disco y numeración	50
Tabla 5: Fuerza y esfuerzo aplicado a diferente distancia del centro del disco 1	50
Tabla 6: Fuerza y esfuerzo aplicado a diferente distancia del centro del disco 2	51
Tabla 7: Procedimiento de ensamblado, máquina de fatiga	57
Tabla 8: Resultados probetas deflexión 9 mm	65
Tabla 9: Resultados probetas deflexión 13 mm	69
Tabla 10: Resultados probetas deflexión 17 mm.....	72
Tabla 11: Resultados probetas deflexión 21 mm.....	75
Tabla 12: Resultados para probetas de 17 mm con recubrimiento	78
Tabla 13: Resultados para probetas de 21 mm con recubrimiento	81
Tabla 14: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 9 mm.....	83

Tabla 15: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 13 mm.....	83
Tabla 16: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 17 mm.....	84
Tabla 17: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 21 mm.....	84
Tabla 18: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 17 mm con recubrimiento	86
Tabla 19: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 17 mm con recubrimiento	87

Lista de Ecuaciones

(Ecuación 1: <i>Flexión estática a lo largo de una viga</i>).....	46
(Ecuación 2: <i>Esfuerzo para una viga de deformación constante, espesor constante, ancho variable</i>).....	47
(Ecuación 3: <i>Ecuación diferencial que gobierna la curva elástica</i>)	47
(Ecuación 4: <i>Deformación de la probeta en función de x</i>).....	49
(Ecuación 5: <i>Deflexión constante máxima por elección de ensayo</i>).....	49
(Ecuación 6: <i>Deformación unitaria</i>).....	51

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción a la mecánica de los materiales y sus propiedades

Uno de los principales objetivos del estudio de la mecánica de materiales, es conocer de sus capacidades para resistir a los esfuerzos y fuerzas aplicadas, sin que cedan (Beer, 2010). Es de mucha importancia conocer las propiedades mecánicas de los materiales, los distintos tipos de carga a los que estos pueden estar sujetos y la forma como estas son aplicadas. Las cargas o esfuerzos pueden ser a la tracción o tensión, compresión, torsión y de corte o al cizallamiento. Estas pueden ser aplicadas de manera estática, se agregan fuerzas de forma gradual, y su rapidez no causa ningún efecto. Al hacerlo dinámicamente las fuerzas se aplican con rapidez, su velocidad si tiene efecto en las propiedades de los materiales. Las cargas cíclicas son fuerzas dinámicas que se repiten.

La utilidad de los materiales en los procesos productivos depende de sus propiedades mecánicas, estas no solo indican su resistencia a la deformación, sino también la elasticidad, plasticidad, maleabilidad, ductilidad, dureza, fragilidad y resistencia a la fatiga. La resistencia a la deformación o resistencia mecánica es la habilidad de un material de resistir cuando una carga está siendo aplicada. La elasticidad es la capacidad de un material de volver a su estado natural luego de haberse deformado como consecuencia de la aplicación de una carga o esfuerzo, al ya no estar sometido a esfuerzos. En cambio, cuando a un material se le aplica un esfuerzo y este se deforma permanentemente, significa que se ha sobrepasado su límite de fluencia o límite elástico, ingresando a su zona de plasticidad.

La maleabilidad se produce cuando el material está sometido a una carga en compresión. La maleabilidad es la capacidad del material a deformarse sin desarrollar defectos. Dureza es la propiedad del material a ser indentado o penetrado. Para determinar la dureza de un material existen tres escalas que son Rockwell, Vickers o Brinell, donde mediante un material de mayor dureza, usualmente de diamante, se hace una marca; según esta y la fuerza aplicada se puede determinar la dureza del material (Integrated publishing, 2014).

A través de ensayos con probetas estándar, sometidas a tracción que se incrementa linealmente, se puede determinar: el límite de fluencia, que corresponde a la máxima carga aplicada a un material hasta que entre en deformación plástica; el esfuerzo último que corresponde al límite de la resistencia del material antes de su rompimiento; el esfuerzo de fractura, punto en el cual se produce el rompimiento. También se puede determinar la ductilidad o fragilidad. La ductilidad es la habilidad del material a tener grandes deformaciones sin que se fracture, en cambio un material es frágil cuando al sufrir pequeñas deformaciones falla.

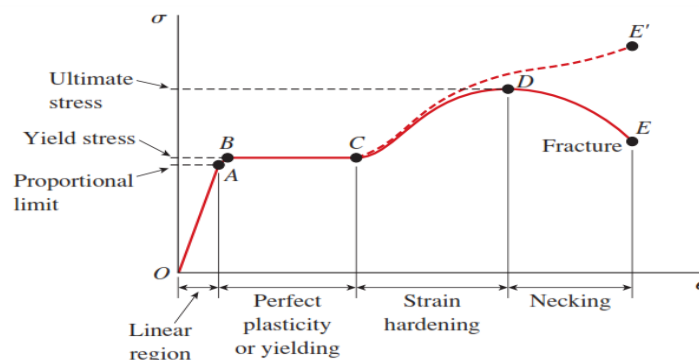


Figura 1: Diagrama Esfuerzo Deformación de una típica estructura de acero (Gere, 2008)

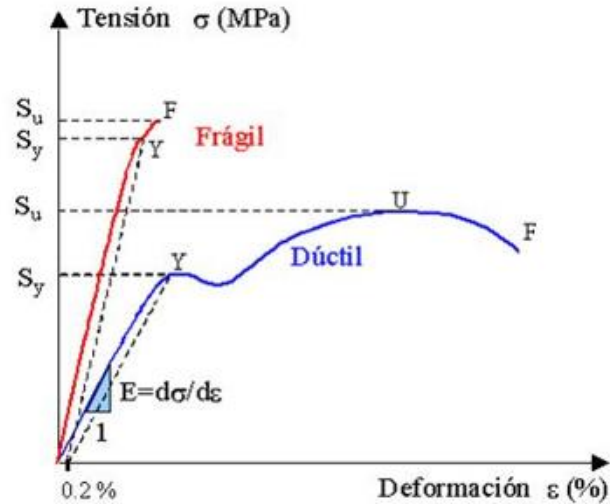


Figura 2: Diagrama Esfuerzo vs Deformación de un material frágil y uno dúctil. (Pérez, 2006)

1.2. Análisis de fatiga e importancia en el diseño

En la sección anterior se mencionó acerca de los ensayos a tracción que sirven para determinar el límite elástico y plástico de un material. Se puede aplicar una carga que no exceda el rango elástico docenas o centenares de veces, y esta volverá a tener sus condiciones iniciales. Sin embargo, cuando las cargas se repiten miles o millones de veces, la fractura ocurrirá aun inclusive cuando la carga sea mucho más baja que la resistencia estática a la fractura. A este fenómeno se lo conoce como fatiga, se la define como la fractura de un material debido a cargas cíclicas o fluctuantes de intensidad considerablemente menor al esfuerzo último (Beer, 2010).

La mayoría de fallas en la industria de ingeniería son causadas por fatiga. La importancia de su análisis en el diseño mecánico es fundamental ya que se puede calcular la vida útil del producto, planificar mantenimiento, evitar catástrofes, tener

confiabilidad, disminuir costos, optimizar recursos, entre muchas otras ventajas. Por esta razón es muy importante conocer las propiedades mecánicas de los materiales a ser utilizados y conocer a que esfuerzos van a estar sometidos.

1.3. Tipos de ensayos de fatiga

Debido a la importancia que tiene el análisis de fatiga en el diseño mecánico, existen métodos o ensayos para someter al material de interés a cargas cíclicas, de esta forma podemos obtener los diagramas S-N que serán introducidos más adelante. Para determinar la resistencia a la fatiga de los materiales existen tres métodos que son los siguientes:

- **Tracción / Compresión**

El análisis de fatiga de tracción / compresión consiste en cargas axiales alternantes llevando a la probeta a tensión cuando las mordazas se alejan, y compresión cuando las mordazas se juntan.



Figura 3: Máquina de ensayos de tracción, compresión y fatiga (UPC, 2014).

- **Torsión Flexión**

Las pruebas de fatiga por flexión rotativa consisten en aplicar una fuerza que fleja ligeramente a la probeta cuando esta está girando a altas revoluciones. Esta fuerza aplicada ocasiona que una sección de la probeta esté bajo tensión, y otra bajo compresión y esto se alterna con la rotación. Sin embargo también existe el ensayo solo debido a la torsión donde se empujan los dos lados de la probeta y se gira de un sentido a otro causando torsión.

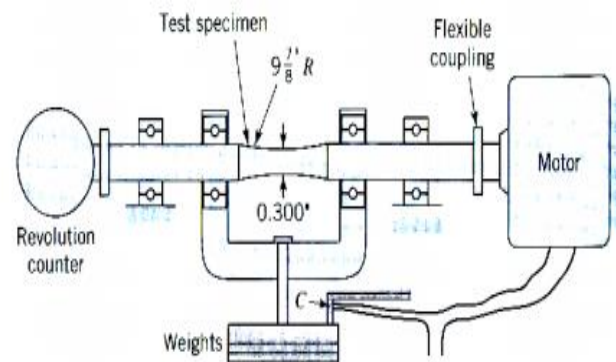
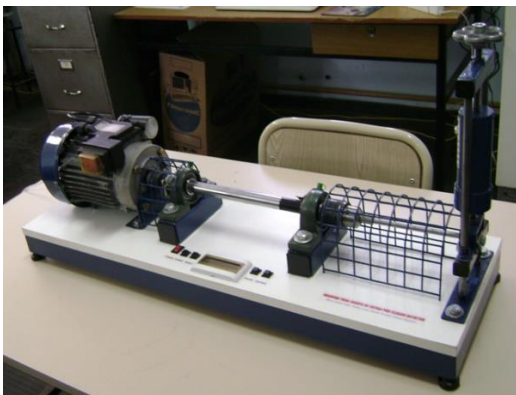


Figura 4: Máquina de fatiga por flexión rotativa (de Vedia & Svoboda, 2014)

- **Flexión Pura**

Por ultimo tenemos el tercer ensayo de fatiga que es el de flexión pura, donde la idea es mantener un extremo de la probeta fija, mientras en el otro extremo se ejerce una fuerza alternante generando esfuerzos cíclicos en la probeta. Este tipo de ensayos son los que van a ser reproducidos con la máquina de ensayos de fatiga por flexión.

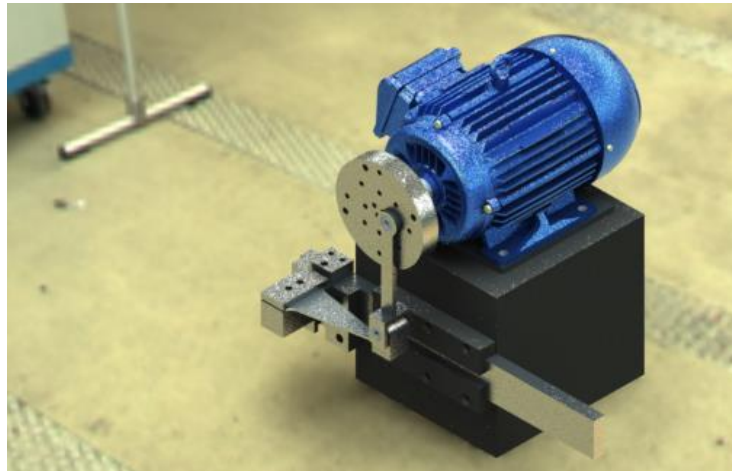


Figura 5: Render máquina de fatiga por flexión pura (Mogollón, 2012)

Inicialmente la máquina fue diseñada por Joaquín Mogollón, estudiante de Ingeniería Mecánica de la USFQ. Esta máquina da la opción, al operador, de trabajar con probetas de diferentes tamaños, generar diferente deflexión en la probeta, aumentar o disminuir el esfuerzo aplicado y utilizar un contador de ciclos del disco. En el siguiente capítulo se darán más detalles de la máquina y la repotenciación del sistema.

1.4. Teorías de fatiga

Existen tres teorías que estudian la fatiga que son: la teoría clásica o de alto número de ciclos; la de bajo números de ciclos y la mecánica lineal de la fractura (Badiola, 2014). En la teoría clásica la falla se considera por aparición de una grieta, se utiliza para elevado número de ciclos ($>10^3$) y los resultados se consideran en una gráfica S-N. En la teoría de bajo número de ciclos ($<10^3$), se basa el estudio en deformaciones en lugar de tensiones, se grafican curvas ϵ -N para establecer una formulación de vida útil a partir de la amplitud de las deformaciones. Y la tercera

teoría se considera cuando la grieta ya está iniciada, y la vida se calcula como la propagación de la grieta hasta la rotura (Badiola, 2014). Su Fase I consiste en la iniciación o nucleación de la grieta, donde las imperfecciones superficiales, porosidades, concentradores de esfuerzo hacen un rol importante. En la Fase II la grieta se propaga y en la Fase III es donde ocurre la fractura porque el material ya no puede resistir más esfuerzo.

1.5. Curvas S-N

Cuando una serie de ensayos se llevan a cabo utilizando diferentes niveles de esfuerzo máximo, los datos resultantes podrán graficarse en una curva S-N. Para cada ensayo el esfuerzo máximo S es graficado en la ordenada, y el número de ciclos N es graficado en la abscisa. Debido al gran número de ciclos que requiere un ensayo de fatiga, usualmente se utiliza una escala logarítmica. Una curva típica S-N indica que si el esfuerzo máximo aplicado es alto, se requieren relativamente pocos ciclos para causar la ruptura. En cambio cuando el esfuerzo máximo aplicado es bajo, se requiere de mayor cantidad de ciclos para causar la ruptura. Los ensayos de fatiga son pruebas destructivas recomendadas antes de realizar el diseño para poder seleccionar el material apropiado (Beer, 2010). Con la ayuda de las curvas S-N se puede determinar cuál será la vida útil de los materiales a un esfuerzo definido. Para que un ingeniero pueda estar seguro de que el material no va a fallar se debe trabajar debajo del límite de fatiga, es decir a un esfuerzo tal que el material no presente inconvenientes por fatiga. En la figura 6 se puede apreciar la curva S-N para acero y aluminio, donde se puede observar que el acero tiene un límite de fatiga

determinado porque su curva termina en una línea recta, en cambio la curva del aluminio sigue bajando.

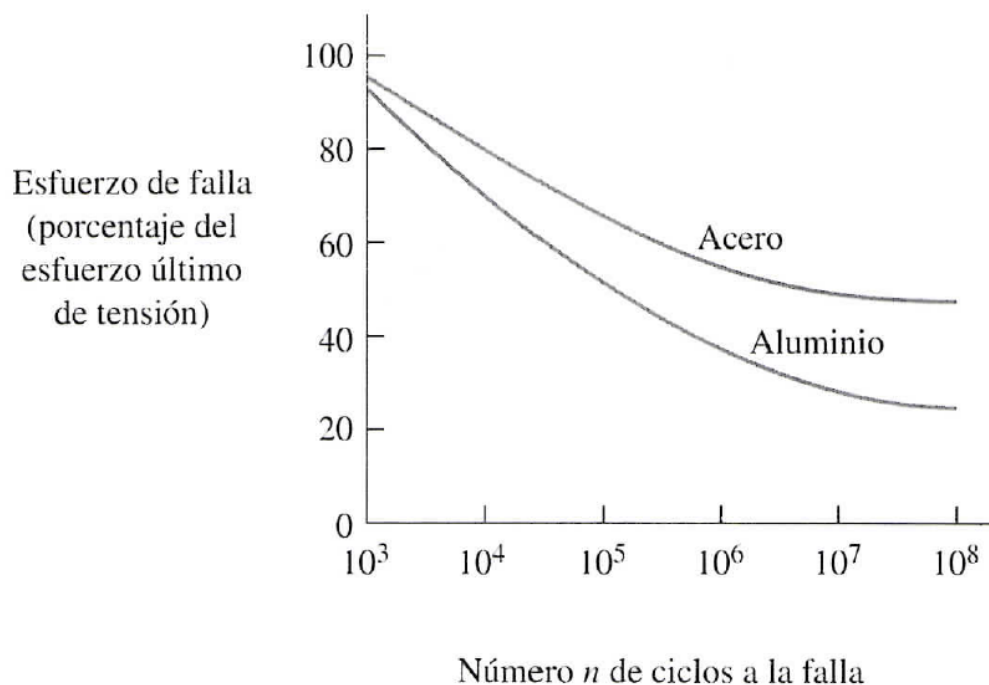


Figura 6: Curva S-N para Acero y Aluminio (Gere, 2008)

1.6. Motivos de la falla por fatiga e importancia de diseño de probeta

La fatiga de un material se puede presentar cuando un material está sometido a cargas cíclicas, por ejemplo cuando doblamos un alambre muchas veces, el alambre resiste pero cada vez se necesita aplicar menos fuerza, hasta que llega a la fractura. Existen otros elementos que fallan por fatiga como ejes, resortes, vigas. Cuando se realizaron pruebas a los materiales para saber porque se originan las fracturas, se determinó que todo empieza con una grieta microscópica u otra imperfección similar (Beer, 2010). Durante varios ciclos de cargas, la grieta empieza a propagarse hasta que el material no puede resistir el esfuerzo y se fractura frágilmente. La fatiga puede

hacer que hasta un material dúctil tenga una falla frágil y abrupta. Debido a que la fatiga puede iniciarse en cualquier grieta o imperfección, la condición superficial del material tiene un efecto importante en el límite de tolerancia obtenido en el ensayo. Normalmente el límite de fatiga de especímenes maquinados y pulidos, es mayor que para componentes laminados o forjados, o materiales corroídos. En ambientes salinos, o aplicaciones en el mar o cercanas a él, se espera una reducción de hasta el 50 % en el límite de fatiga (Beer, 2010). Para los ensayos de fatiga por flexión pura a ser realizados con la máquina fatiga del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad San Francisco de Quito, es de suma importancia que las probetas tengan un maquinado tal, que libre a la probeta de la mayor cantidad de imperfecciones posibles, para que de esta manera no se alteren los resultados. Se debe trabajar con una probeta estándar diseñada previamente. En este sentido se diseñó una probeta en la cual el esfuerzo estará distribuido uniformemente. Es muy importante que la probeta sea diseñada de esta manera, ya que así se impide la existencia de concentradores de esfuerzo. Adicionalmente, sea cual sea el proceso de manufactura de la probeta, es fundamental hacer un tratamiento térmico para normalizar las propiedades del acero y aliviar concentradores de esfuerzo provocados debido al proceso de manufactura.

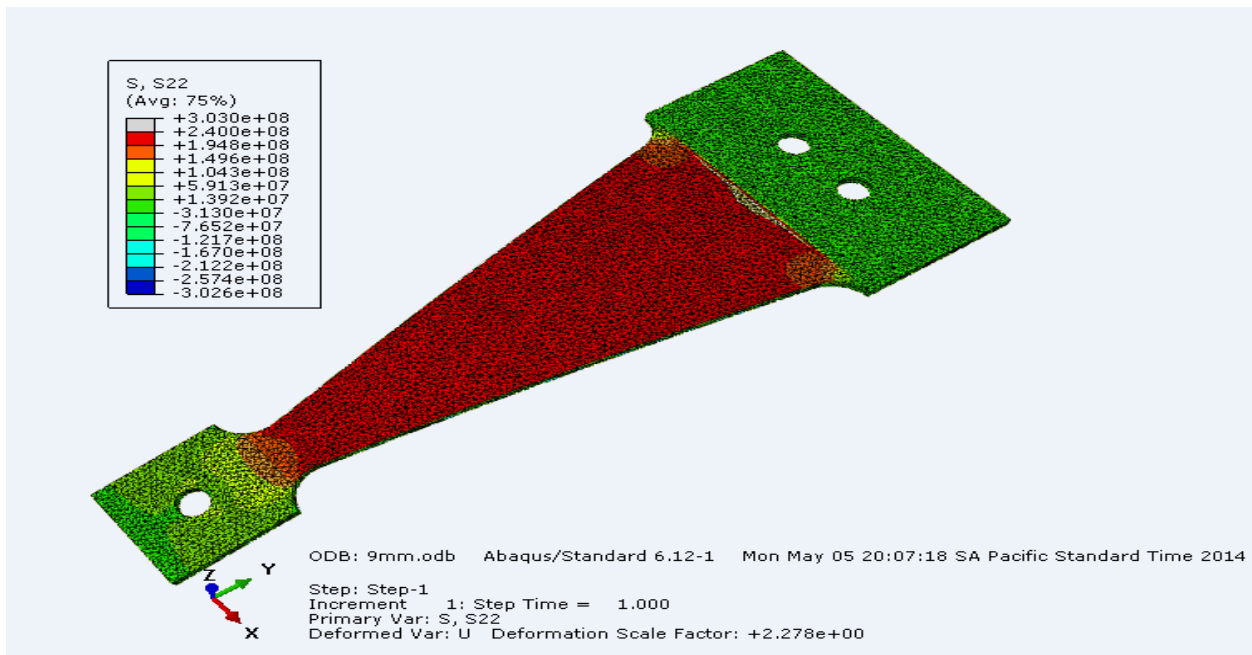


Figura 7: Estudio de Von Mises probeta estándar. Se puede observar que tiene esfuerzos constantes en la mayor parte del área de la probeta.

1.7 Fallas por fatiga en aceros con recubrimientos

El recubrimiento es utilizado para prolongar eficientemente la vida útil de piezas costosas, dar solución permanente a problemas de desgaste, corrosión, y mejorar las propiedades de un material. Sin embargo el límite de fatiga aumenta o disminuye según la aplicación del recubrimiento al sustrato. Estudios realizados comparan dos tipos de recubrimientos utilizados en acero AISI 4340 para ensayos de fatiga. El primero es HVOF (High velocity Oxygen Fuel) con carburo de tungsteno, y el segundo proceso es galvanoplastia de cromo duro. El resultado de estos estudios indica que HVOF rociado con WC-CO aumenta significativamente el esfuerzo de fatiga del sustrato, en cambio el recubrimiento de cromo duro reduce significativamente el límite de fatiga del acero.

La diferencia en la aplicación del recubrimiento son los esfuerzos residuales aplicados en la superficie del acero. En el recubrimiento de carburo de tungsteno los esfuerzos residuales aplicados a la superficie del acero están a compresión, en cambio para el recubrimiento de cromo duro los esfuerzos residuales están a tracción. Esto favorece a la nucleación de grietas. (Ibrahim & Berndt, 2006)

Capítulo 2. Objetivos y Repotenciación del sistema

2.1. Objetivo de la tesis:

Desarrollar ensayos y verificar el desempeño y precisión de la Máquina de ensayos de fatiga por flexión, realizando ensayos en acero A 36.

Investigar la respuesta a la fatiga del mismo acero con recubrimientos por termorociado de acero inoxidable

2.2 Objetivos específicos de la tesis:

- Optimizar el sistema eléctrico, mecánico y de control de la máquina
- Implementar un dispositivo digital contador para identificar cuando ocurre la falla del material por fatiga.
- Realizar pruebas de confiabilidad, estabilidad de la velocidad del sistema para ensayos.
- Modelar el sistema utilizando un software de elementos finitos para conocer el verdadero esfuerzo aplicado
- Evaluar el desempeño de la máquina comparando los resultados de los ensayos de fatiga con el comportamiento esperados de los mismos.
- Realizar una curva S-N en muestras de acero A36
- Realizar pruebas con muestra de material base A36 recubierto acero inoxidable por termorociado

2.3. Repotenciación del sistema

La máquina de ensayos de fatiga por flexión tiene como objetivo aplicar carga cíclica hasta la fractura. Para lograr su objetivo, la máquina debe sostener un lado de la probeta fijo, y en el otro lado poder aplicar una carga cíclica, flexionando a la probeta hacia arriba y hacia abajo. Para controlar la deflexión en la probeta se diseñó un disco con dieciséis orificios, cada uno con diferentes excentricidades (diferentes distancias desde el centro del disco al orificio). Mientras más cerca está el orificio del centro, la deflexión en la probeta es menor. A parte de poder aplicar carga, la máquina necesita contar el número de ciclos hasta que el material falle. Adicionalmente se debe poder regular las RPM a las que trabajará el motor.

La máquina consiste de tres sistemas. El sistema mecánico, el sistema eléctrico de potencia y el sistema eléctrico de control. El sistema eléctrico de potencia abarca todas las conexiones eléctricas del motor y equipos, para que la máquina pueda transferir el movimiento rotacional al disco. El sistema mecánico se encarga de transformar el movimiento rotatorio en movimiento lineal, para que pueda flexionar la probeta. Por último, el sistema eléctrico de control tiene como objetivo controlar las RPM del motor, apagar el motor cuando la probeta se rompe y contar el número de ciclos hasta la rotura de la probeta (Mogollón, 2012). En estos tres sistemas se han realizado modificaciones para que la máquina tenga un mejor funcionamiento, estética y eficiencia, los cuales serán explicados más adelante.

2.4. Sistema eléctrico de potencia

El objetivo del sistema eléctrico es energizar todos los equipos de la máquina para que pueda realizar su trabajo. La máquina consta actualmente de un motor eléctrico trifásico a 220V, un contador digital a 110V, un transformador 110V a 12V y el contactor de 220V monofásico, que alimenta al variador de frecuencia.

La toma trifásica de 5 hilos cuenta con las tres fases, un neutro y otra línea que es tierra. Para optimizar y reducir el número de tomas eléctricas que necesita la máquina, para los cuatro equipos nombrados, se procedió a cambiar el cable con el que se estaba trabajando por uno de 4 líneas para poder utilizar las tres fases que sirven para sacar los 220V, y el neutro para 110V. De esta manera se energizó todo el sistema con la toma trifásica.

En la *figura 8*, se puede apreciar el circuito eléctrico anterior donde se puede observar que, al braker de seguridad solo entran las 3 fases de la toma. También se puede observar el exceso de cables que complicaban la ubicación de la máquina ya que necesita de una fuente monofásica 220V, 110V y la toma trifásica 220V.

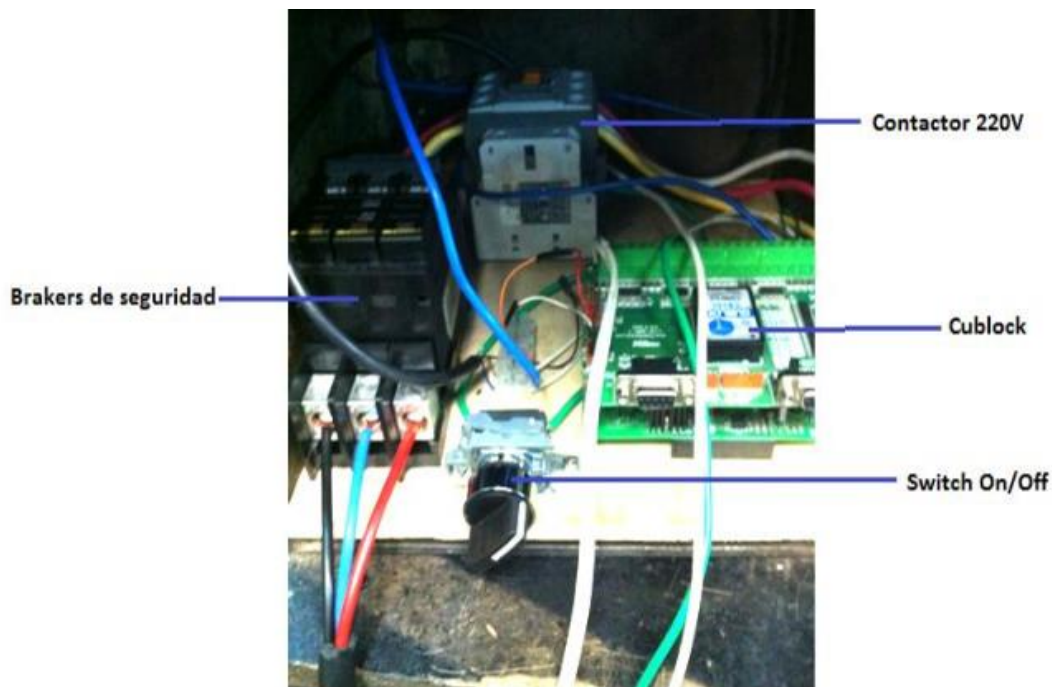


Figura 8: Antigo sistema eléctrico de la máquina de fatiga (Mogollón, 2012)

Actualmente el sistema eléctrico tiene el mismo diseño del anterior, pero se alimenta todo el sistema con la toma trifásica. El circuito eléctrico consiste en la alimentación trifásica que pasa por los brakers de seguridad hacia el contactor, y el cable neutro se conecta hacia una bornera 4 X 2. Desde el contactor se toma una fase para obtener 110V hacia otra bornera 4 X 2, de esta manera todos los equipos

están protegidos por el braker y se puede alimentar hasta 3 equipos que trabajen con 110V. El contactor solo se energiza cuando tiene una alimentación 220V monofásica, el switch On/Off debe estar en posición On, y el relé verificando que la probeta no esté rota, usándola para cerrar el circuito de 12V que genera el transformador.

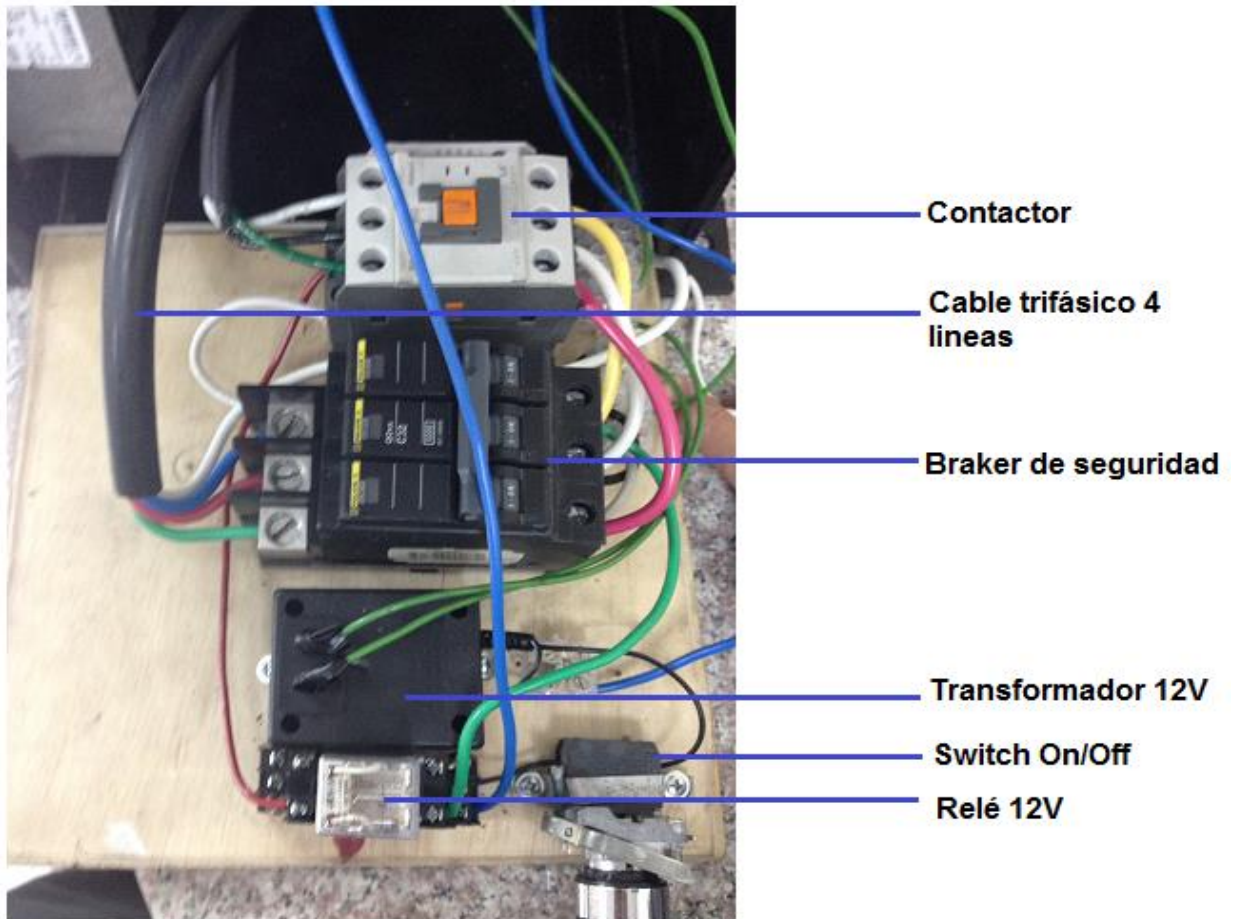


Figura 9: Sistema eléctrico actual máquina de ensayos de fatiga

2.5. Sistema eléctrico de control

Una vez mencionados los cambios del sistema eléctrico de potencia, se puede hablar con más amplitud de los cambios realizados en el sistema de control de la máquina. Como se puede observar en la figura 10, la máquina tenía un sistema

diferente para realizar el conteo de ciclos. Este sistema consistía en un disco excéntrico conectado a un encoder que enviaba pulsaciones al Cubloc. Debido a la relación de diámetros entre los dos discos; 3104 pulsos enviados por el encoder equivalían a una vuelta del disco, es decir a un ciclo. Este sistema presentaba problemas al subir las revoluciones por minuto del motor, ya que el encoder enviaba las pulsaciones demasiado rápido y el Cubloc no alcanzaba a interpretarlo. Adicionalmente, el disco excéntrico al ser de plástico se desgasta y no hay suficiente fricción entre los dos discos, entonces tiende a resbalarse. Por esta razón fue de suma importancia modificar el sistema ya que se afectaban los resultados y se limitaba al motor solo a trabajar a 270RPM.

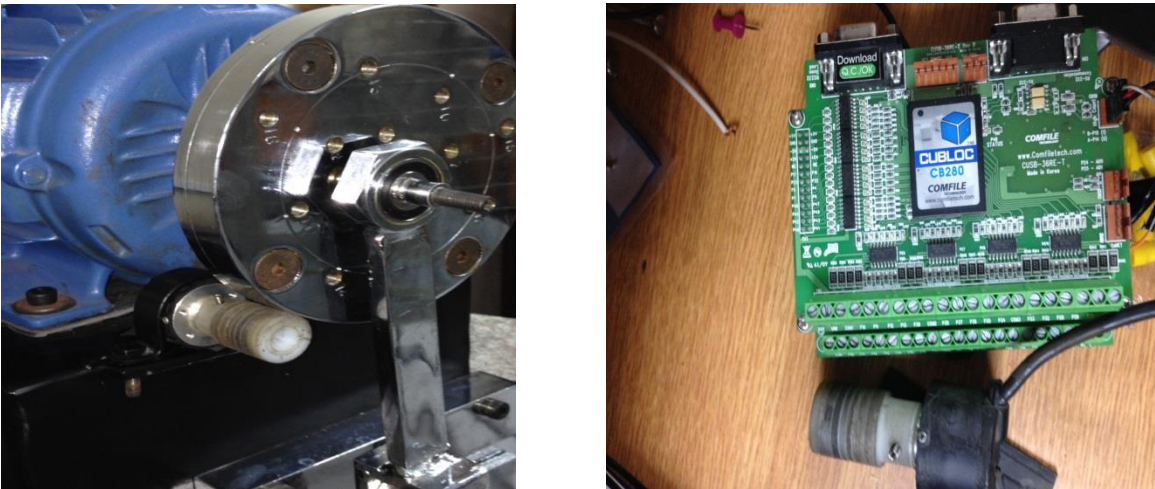


Figura 10: Sistema de control de vueltas máquina de fatiga 2012

Después de haber identificado los problemas se optó por cambiar el disco excéntrico por un sensor láser que envía un pulso por ciclo. Esto se logró instalando una platina en la parte trasera del disco que pasa por la luz del láser. Para no dañar el disco la probeta se sostiene con un perno. Los pulsos del láser van dirigidos directamente a

un contador digital que tiene una capacidad de 6 dígitos y graba el último registro de ciclos. El sensor láser permite regular la distancia a la que va a pasar el objeto, y el contador digital incluye un receptor que inclusive mejora la señal recibida. El contador digital permite que el operador no necesite de un computador para realizar el conteo de ciclos. Usualmente los ensayos de fatiga por flexión duran más de 3 horas y no es práctico que el operador necesite de un computador para realizar el ensayo. Se realizaron algunas pruebas de precisión a diferentes velocidades para saber si todos los ciclos eran contados y el contador satisface la necesidad, mas la máquina empieza a vibrar alrededor de las 550 RPM (considerándose esta la velocidad máxima de rotación). Un aspecto muy importante que se debe tener en cuenta es que el variador de frecuencia al estar conectado a la misma fuente, puede emitir frecuencias que pueden hacer que los otros equipos no funcionen con normalidad. Por esta razón se comprobó que todo funcione acorde, cuando la salida a tierra del variador de frecuencia este haciendo contacto con la caja de metal.



Figura 11: Sensor láser, contador digital y variador de frecuencia correctamente instalados

El segundo objetivo del sistema de control es apagar el motor cuando la probeta se fractura. El Cubloc podía seguir cumpliendo esa tarea, sin embargo el precio y la utilidad que tiene el Cubloc no se justifica para seguir usándolo. Por este motivo se cambió el Cubloc por un relé de 12V, que abre el circuito cuando la probeta se rompe y apaga el motor.

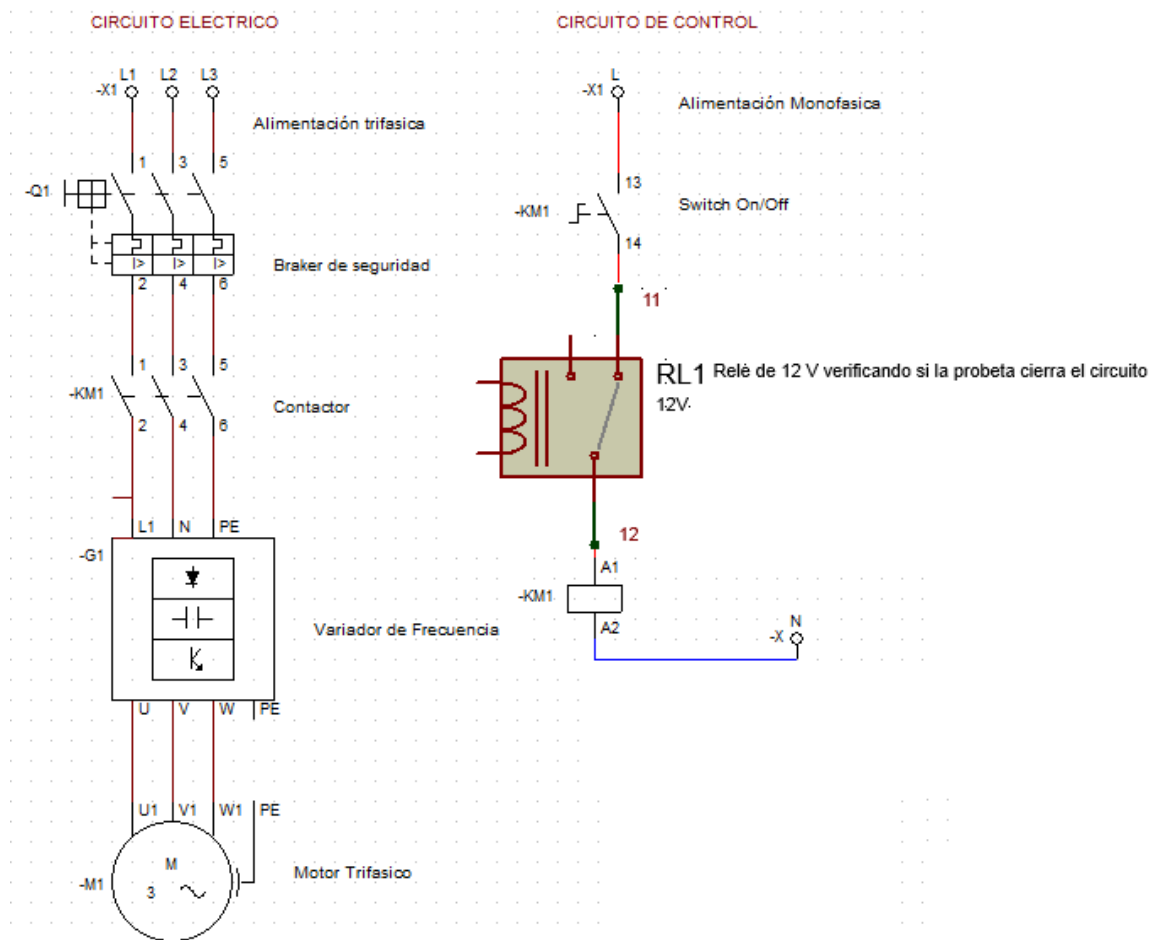
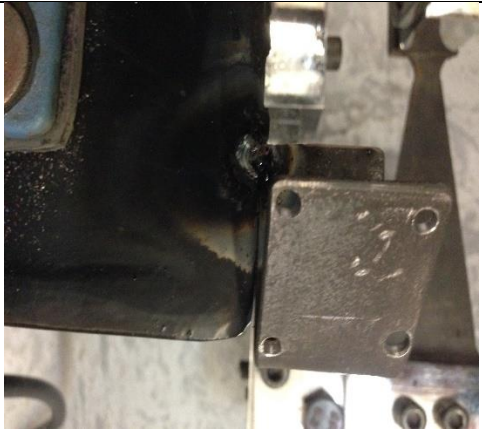


Figura 12: Esquema eléctrico de potencia y control (Mogollón, 2012)

2.6. Sistema mecánico y estética

En el sistema mecánico no se realizaron cambios ya que el diseño del mecanismo es por demás satisfactorio. Lo que se realizó fue un mantenimiento de la máquina. Se maquinó nuevamente piezas que estaban perdidas y se dio un cromado estético final. Se reemplazaron los rodamientos por unos nuevos porque estaban muy gastados. Los pernos que estaban oxidados se cambiaron por unos nuevos, respetando las mismas características calculadas según el esfuerzo cortante al que están sometidos (Mogollón, 2012).

En la parte estética de la máquina se realizaron varios cambios. Se modificó la caja para que todo se situe dentro del compartimiento debidamente distribuido y todos los equipos estén sostenidos por la caja. Se perforaron algunos agujeros para el cableado. Debido a que el sistema eléctrico se alimenta únicamente con la toma trifásica de 5 líneas, la caja fue cerrada con una puerta hecha del mismo material. Se escogió una puerta que permita dar mantenimiento o reparar daños, según sea el caso.

<p>Soporte para el sensor laser</p>		<p>Se dobló una platina de 9 X 3 cm de 1.8 mm de espesor a 45 grados. Se hicieron huecos de 1/8 para los pernos de sensor. Por último la platina fue soldada a la caja.</p>
-------------------------------------	--	---


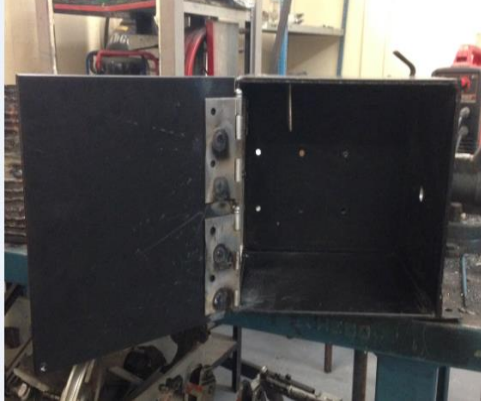

<p>Soporte para el variador de frecuencia</p>		<p>Se perforó un hueco para el variador de frecuencia y se soldó una platina de 14 X 5 cm con 2 orificios de 1/4 cm con 2 orificios de 1/4 separados 10 cm, para que sirva de soporte.</p>
<p>Puerta caja</p>		<p>Se soldaron dos bisagras a los 2 lados de la puerta para mayor resistencia del peso de la plancha de acero.</p>
<p>Proceso de pintura</p>		<p>Se utilizó pintura electrostática para mayor resistencia, duración y estética de la caja. Cortesía de AICO, empresa que realiza tableros de control</p>

Tabla 1: Modificaciones estéticas máquina de fatiga

Una vez realizados todos los cambios, se realizó el ensamble de la máquina y se perforaron nuevamente los huecos para los pernos, ya que la pintura reduce el

diámetro de los huecos. En la figura 13 se puede apreciar el ensamble final de la máquina del lado frontal y lateral.

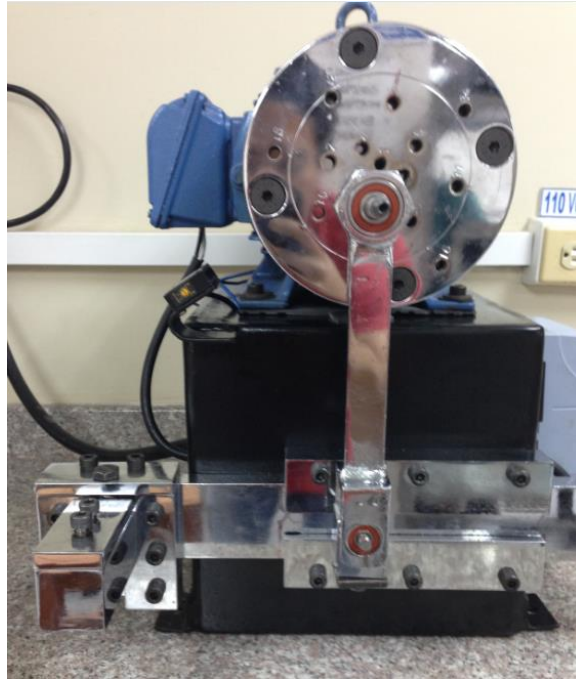


Figura 13: Ensamble final máquina de ensayos de fatiga

Capítulo 3. Materiales y Metodología

En el capítulo 1 se explicó brevemente acerca de la importancia del trabajo previo que se debe aplicar a las probetas, para un ensayo satisfactorio. En consecuencia, es preciso conocer el acero que va a ser utilizado para la manufactura de las probetas. Se escogió acero ASTM A-36 debido al mayor uso que tiene en la industria. Se utilizó también acero inoxidable para el recubrimiento de probetas que se darán detalles más adelante.

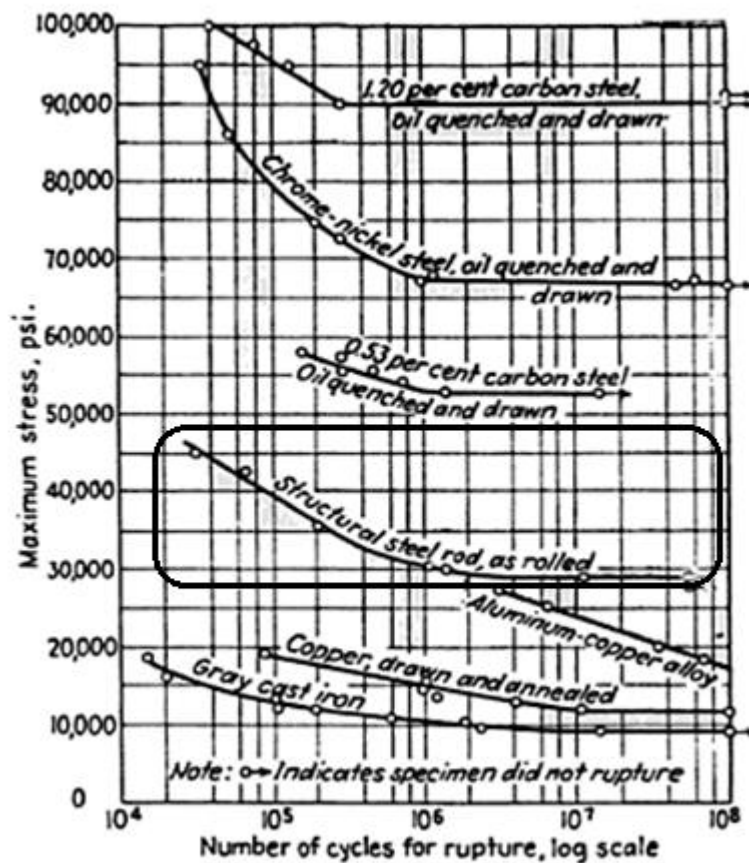
Material	Resistencia última σ_u (MPa)	Cedencia σ_y (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
Acero ASTM A-36	400	250	200
Acero Inoxidable 304	505	215	193

Tabla 2: Propiedades mecánicas acero ASTM A-36 y acero inoxidable 304 unidades SI (Beer, 2010)

“Al reducirse la magnitud del esfuerzo máximo, el número de ciclos requeridos para causar la ruptura aumenta hasta que se alcanza un esfuerzo denominado del límite de resistencia o fatiga. El límite de fatiga es el esfuerzo bajo el cual la falla no ocurre, aun cuando haya un número infinitamente grande de ciclos de carga. Para un acero al bajo carbono, como el acero estructural, el límite de fatiga es aproximadamente la mitad de su resistencia última.” (Beer, 2010)

Como se puede observar en la figura 14, el acero estructural tiene un límite de fatiga alrededor de 200 MPa (30 Ksi), que es aproximadamente el 50% del esfuerzo último del acero ASTM A-36

S-N Diagrams Comparing Endurance Limit for Seven Alloys



Typical S-N diagrams for determining endurance limit of metals under reversed flexural stress.

Figura 14: Diagrama S-N por ensayos de flexión (Boyer, 1986)

Con los resultados de los ensayos experimentales se espera obtener una curva S-N acorde con la curva resaltada en la figura 14.

3.1. Maquinado de Probetas

La manufactura de las probetas es muy importante para lograr el objetivo de la tesis que es el de reproducir la respuesta a la fatiga de un acero A36. La confiabilidad de la máquina depende del resultado de las probetas. Se procedió a trabajar con una plancha de acero ASTM A-36 de 3 mm de espesor por fácil disponibilidad en el mercado. Es fundamental que todas las probetas se obtengan de una misma plancha, ya que se necesita que las propiedades de cada probeta sean las mismas, y así obtener resultados consistentes en ensayos de fatiga. Las probetas inicialmente fueron maquinadas en frío con un disco de corte, los radios fueron maquinados con la fresadora y los 3 orificios fueron perforados con taladro, en el taller mecánico de la USFQ. La ventaja de maquinar las probetas en frío es el bajo costo además que la afectación por temperatura no es muy alta de manera que la probeta no cambie sus propiedades, sin embargo, aquí un tratamiento térmico es un requisito para aliviar tensiones y eliminar posibles concentradores de esfuerzo por el proceso de manufactura. En la figura 15 se observa el maquinado de los radios utilizando la fresadora

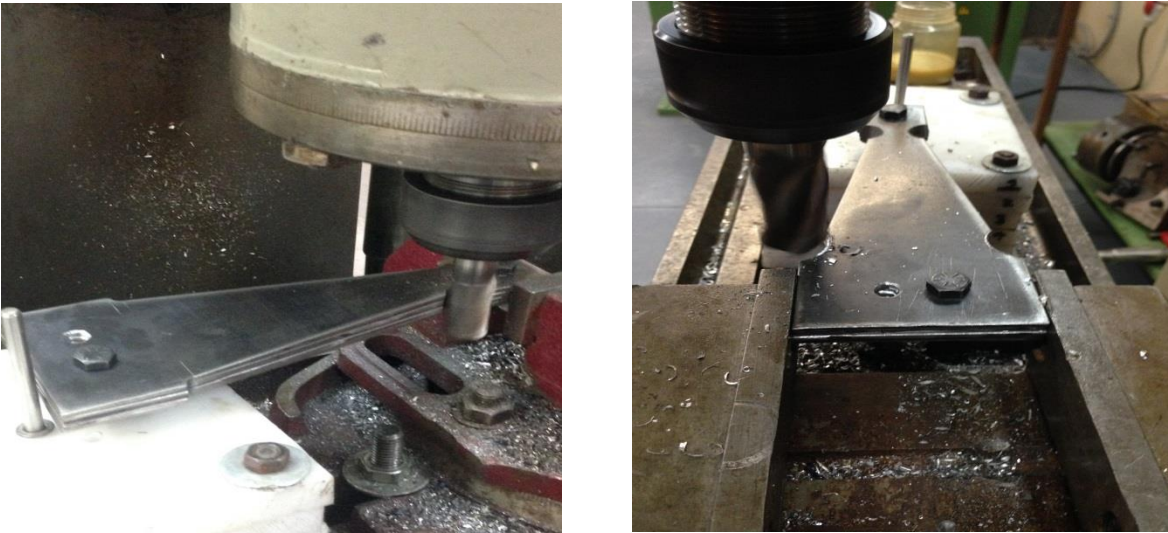


Figura 15: Maquinado de radios con fresas de 8 y 9 mm de radio.

Es muy importante también el acabado superficial para eliminar cualquier tipo de grieta o imperfección que pueda tener el acero inicialmente. El siguiente paso es eliminar las aristas vivas en los bordes de la probeta. Se eliminaron las rebabas y aristas vivas con el esmeril.

“Como la fatiga involucra la propagación de grietas bajo un esfuerzo de tensión impuesto, el número de ciclos hasta la falla se reduce mucho si existen grietas preexistentes” (Schey, 2001). Para finalizar con el maquinado se utilizó la rectificadora para eliminar todas las grietas posibles superficiales. Para esto se colocó la probeta en sentido del movimiento de la mesa y se maquinó los 2 lados de la superficie como se muestra en la figura 16.



Figura 16: Pulido y rectificado de probeta estándar

3.2. Tratamiento Térmico

El acero ASTM A-36, o acero al carbono, tiene una composición química de: 0.25% de carbono, 0.04% de fósforo, 0.05% de azufre y 0.4% de silicio (Arcano, 2014). Los aceros al carbono deben tener un mínimo de 0.2% de carbono (Schey, 2001). Se debe conocer el porcentaje de carbono del acero para poder realizar el tratamiento térmico. Un recocido de relajación o alivio de tensiones mejora la maquinabilidad, disminuye dureza y principalmente reduce o elimina esfuerzos residuales internos. La temperatura de calentamiento es de 550 a 600 °C, se debe mantener la temperatura entre 1 a 2 horas y el enfriamiento debe ser muy lento en el horno (Andrade, 2010). El recocido fue realizado en el laboratorio de ingeniería de materiales, se elevó la

temperatura a 650 °C y se mantuvo esa temperatura por 2 horas y se enfriaron las probetas lentamente en el horno. Se hizo cada tratamiento térmico poniendo 5 probetas al mismo tiempo, y las mismas fueron utilizadas para cada deflexión para no variar los resultados.



Figura 17: Probeta estándar finalizado el recocido

3.3. Probetas con recubrimiento

Es de interés realizar ensayos para nuevos materiales y en este caso, materiales con recubrimiento la motivación desde el punto de vista de investigación es llegar a conocer si el uso de recubrimientos puede afectar significativamente la resistencia a la fatiga del material base. Se tiene por tanto la opción de comparar el mismo ensayo con la misma fuerza aplicada, sobre aceros con recubrimiento y sin recubrimiento. De esta manera, se pueden obtener conclusiones interesantes y observar cómo afecta el recubrimiento a las probetas. El recubrimiento es utilizado para prolongar eficientemente la vida útil de piezas costosas, dar solución permanente a problemas

de desgaste, corrosión, y mejorar las propiedades de un material. El material escogido para el recubrimiento fue acero inoxidable. Se realizó un termorociado con Arc Spray, aplicando 0.25 mm a cada lado de las probetas. Antes de empezar con el proceso del recubrimiento se realizó el mismo tratamiento térmico a las 10 probetas, para aliviar tensiones del maquinado previo. El recubrimiento fue realizado en Imetca, que es una empresa dedicada a los procesos de metalización y termorociado, pionera en el mercado ecuatoriano. El recubrimiento consiste de 2 pasos específicos. El primer paso es limpiar la probeta con un granallado, dejándola libre de impurezas.



Figura 18: Proceso de granallado de recubrimiento de probetas

Al finalizar con el granallado se procede a realizar el termorociado con un equipo de Arco Eléctrico TAFA 8830. El proceso de termorociado consiste en disparar pequeñas partículas a altas velocidades y estas se incrustan adhiriéndose al substrato y entre ellas conformando un recubrimiento denso. El calentamiento y la

fusión ocurren cuando dos electrodos consumibles, cargados eléctricamente con cargas opuestas que se encuentran inicialmente aislados uno del otro, son alimentados conjuntamente y avanzan automáticamente, donde una diferencia de potencial es aplicada a través de los alambres, iniciando un arco eléctrico controlado en su intersección, que funde y pulveriza las puntas de los alambres que funcionan como electrodos. Un gas, usualmente aire, es comprimido y dirigido a través de la zona del arco, atomizando el metal fundido y proyectando las partículas sobre el sustrato previamente preparado.

Revisar Anexo A para detalles del material de recubrimiento y parámetros del proceso. (Moreano, 2012)



Figura 19: Proceso de termorociado recubrimiento de probetas

3.4. Cálculos y metodología

Antes de realizar los cálculos es importante saber el análisis que se va a realizar al material sometido a flexión. Al flexionar la probeta desde el eje neutro, hacia arriba o hacia abajo, la magnitud del esfuerzo depende directamente de la deformación. Cuando la probeta fleja hacia arriba la cara superior estará sometida a compresión,

mientras que la cara inferior estará sometida a tensión, y viceversa. El ciclo de carga del ensayo es sinusoidal. Es decir, cuando se aplica la carga hacia arriba y hacia abajo el disco dará una vuelta, lo que equivale a un ciclo. La figura 20 muestra un esquema de la probeta con sus dimensiones en milímetros.

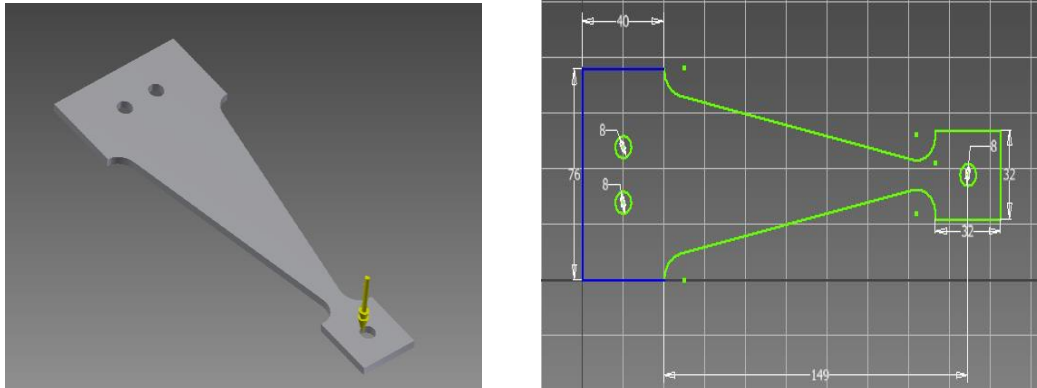


Figura 20: Medidas de la probeta y ubicación de la fuerza

Cálculos de esfuerzo en la probeta en deformación elástica:

Las dimensiones de la longitud se toman desde el punto donde empieza a variar el ancho de la probeta hasta el punto donde se aplica la fuerza.

Datos conocidos, probeta estándar acero ASTM A-36:

$L=149 \text{ mm}$
$t = 3 \text{ mm}$
$b= 76 \text{ mm}$
$E= 200 \text{ GPa}$
$\sigma_u = 400 \text{ MPa}$

Tabla 3: Dimensiones de la probeta estándar en Sistema internacional
 Para determinar el esfuerzo a lo largo de una viga se utiliza la ecuación de flexión
 estática (Beer, 2010):

$$\sigma_{(x)} = \frac{M_{(x)} * c}{I_{(x)}}$$

(Ecuación 1: **Flexión estática a lo largo de una viga**)

Dónde:

$$M_{(x)} = F * x \quad (\text{Momento con respecto a } x)$$

$$c = \frac{t}{2} \quad (\text{Distancia desde el punto neutral al punto de mayor esfuerzo})$$

$$I_{(x)} = \frac{b_{(x)} * t^3}{12} \quad (\text{Momento de inercia que va variando con respecto a } x)$$

Dónde:

F = fuerza aplicada por el brazo conectado al disco excéntrico

t = espesor de la probeta

b_(x) = ancho de la probeta que varía en el eje x.

$$b_{(x)} = \frac{b}{L} * x$$

$$\text{Cuando } x=L \quad b_{(x)} = b$$

Reemplazando:

$$\sigma_{(x)} = \frac{F * x * \frac{t}{2}}{\frac{b_{(x)} * t^3}{12}}$$

$$\sigma_{(x)} = \frac{12 * F * x * t}{2 * \frac{b}{L} * x * t^3}$$

$$\sigma_{(x)} = \frac{6 * F * L}{b * t^2}$$

(Ecuación 2: **Esfuerzo para una viga de deformación constante, espesor constante, ancho variable**)

Con esta ecuación se demuestra que el esfuerzo no depende de la variable x, debido a que el esfuerzo es uniforme a lo largo de la probeta. El esfuerzo solo depende de la fuerza aplicada, largo, ancho y el espesor de la muestra.

Para encontrar la fuerza, que es la última incógnita, se utiliza la ecuación diferencial que gobierna la curva elástica (Beer, 2010):

$$M_{(x)} = EI_{(x)} \frac{d^2y}{dx^2}$$

(Ecuación 3: **Ecuación diferencial que gobierna la curva elástica**)

Dónde:

E= Módulo de Young del material

$\frac{d^2y}{dx^2}$ = diferencial de la curva elástica

Reemplazando términos y acomodando la ecuación se tiene:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI(x)}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{F * x}{E * b(x) * \frac{t^3}{12}}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{F * x}{E * \frac{b}{L} * x * \frac{t^3}{12}}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{12 * F * L}{E * b * t^3}$$

Se integra la ecuación 2 veces para dejar la ecuación en términos de y, en función de x:

$$\int \frac{d^2y}{dx^2} = \int \frac{12 * F * L}{E * b * t^3}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{12 * F * L}{E * b * t^3} * x + c_1$$

$$\int \frac{dy}{dx} = \int \left(\frac{12 * F * L}{E * b * t^3} * x + c_1 \right)$$

$$y(x) = \delta(x) = \left(\frac{12 * F * L}{E * b * t^3} * \frac{x^2}{2} \right) + (c_1 * x) + c_2$$

$$y(x) = \delta(x) = \left(\frac{6 * F * L}{E * b * t^3} * x^2 \right) + (c_1 * x) + c_2$$

Se utilizan las condiciones de borde de una viga empotrada para determinar las constantes. Cuando $x = L$, la pendiente y el desplazamiento son iguales a cero:

$$\frac{dy}{dx} = 0$$

$$\delta_{(x)} = 0$$

Reemplazando:

$$\frac{dy}{dx_{(x=L)}} = 0 = \frac{12 * F * L}{E * b * t^3} * L + c_1$$

$$c_1 = -\frac{12 * F * L^2}{E * b * t^3}$$

$$\delta_{(x=L)} = 0 = \left(\frac{6 * F * L}{E * b * t^3} * L^2 \right) + (c_1 * L) + c_2$$

$$0 = \left(\frac{6 * F * L}{E * b * t^3} * L^2 \right) + \left(-\frac{12 * F * L^2}{E * b * t^3} * L \right) + c_2$$

$$c_2 = \frac{6 * F * L^3}{E * b * t^3}$$

Una vez determinadas las dos constantes se las reemplaza en la ecuación:

$$y(x) = \delta_{(x)} = \left(\frac{6 * F * L}{E * b * t^3} * x^2 \right) + \left(-\frac{12 * F * L^2}{E * b * t^3} * x \right) + \frac{6 * F * L^3}{E * b * t^3}$$

(Ecuación 4: **Deformación de la probeta en función de x**)

La tercera condición de borde, es la que surge del ensayo de fatiga por flexión.

$$\delta_{(x=0)} = \left(\frac{6 * F * L^3}{E * b * t^3} \right)$$

(Ecuación 5: **Deflexión constante máxima por elección de ensayo**)

En la tabla 4 se puede apreciar la flexión que se genera en la esquina de la probeta, variando el número de orificio en el que la máquina se encuentra trabajando. Con

esta información se puede conocer el valor de la fuerza a cada deflexión y por ende el esfuerzo aplicado.

Numeración	Disco 1		Disco 2	
	Distancia al centro [cm]	línea	Distancia al centro [cm]	línea
1	0.5	1	0.7	1
2	0.9	4	1.1	4
3	1.3	7	1.5	7
4	1.7	2	1.9	2
5	2.1	5	2.3	5
6	2.5	8	2.7	8
7	2.9	3	3.1	3
8	3.3	6	3.5	6
9	3.7	1	3.9	1
10	4.1	4	4.3	4
11	4.5	7	4.7	7
12	4.9	2	5.1	2
13	5.3	5	5.5	5
14	5.7	8	5.9	8
15	6.1	3	6.3	3
16	6.5	6	6.7	6

Tabla 4: División de perforaciones por disco y numeración

Las tablas 4 y 5 muestran la fuerza y esfuerzo aplicado a distintas distancias del centro donde la deformación es completamente elástica.

Disco#1				
Numeración	Distancia del centro (cm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Ksi)
1	0.5	103.39	135.13	19.60
2	0.9	186.10	243.23	35.28

Tabla 5: Fuerza y esfuerzo aplicado a diferente distancia del centro del disco 1

Disco#2				
Numeración	Distancia del centro (cm)	Fuerza (N)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Ksi)
1	0.7	144.74	189.18	27.44

Tabla 6: Fuerza y esfuerzo aplicado a diferente distancia del centro del disco 2

Es importante recalcar, como dicta la ecuación 3, que este método solo sirve para calcular los esfuerzos cuando el material se ha deformado elásticamente.

Dependiendo de las propiedades del material se puede saber si es correcto utilizar las ecuaciones en límite elástico. En el caso del acero A 36 el esfuerzo de fluencia es de 250 Mpa, el cual nos indica que la probeta sufrirá deformaciones plásticas a deflexiones mayores a 9mm. Gracias al uso del software de simulación por elementos finitos ABAQUS, se pudo obtener el resultado más preciso del esfuerzo por cada deflexión en el régimen elasto-plástico.

Cálculos de esfuerzos en la probeta en deformación plástica:

Anteriormente se mencionó que cuando un material sobrepasa el límite de fluencia entra en la región plástica, como se puede observar en la figura 21. La mejor manera para calcular el esfuerzo, cuando la probeta se deforma plásticamente, es midiendo la longitud final de la probeta l_f , encontrándose la deformación utilizando la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

(Ecuación 6: **Deformación unitaria**)

Actualmente se cuenta con un atlas de las curvas de esfuerzo-deformación de muchos materiales. Con la deformación se puede ir a la curva de esfuerzo-deformación de acero ASTM A 36 para saber cuál es el esfuerzo aplicado. Sin embargo, debido a que la longitud final no puede ser medida con facilidad, se modeló en ABAQUS utilizando el método de elementos finitos, para encontrar los esfuerzos en la probeta. Se utilizó la figura 21 para ingresar la información del material que necesita el software.

En la figura 21 se muestra el diagrama Esfuerzo vs Deformación a diferentes temperaturas de acero A 36. Para el modelo se utilizó la curva a temperatura ambiente ya que el cambio de temperatura en la probeta durante el ensayo no sobrepasa los 50 °C.

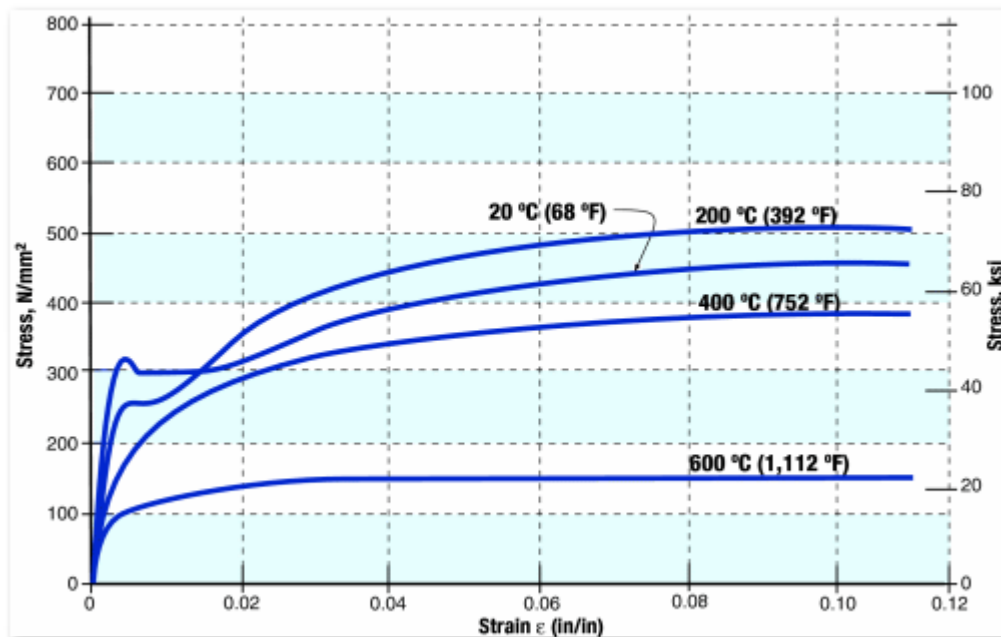


Figura 21: Diagrama Esfuerzo – Deformación a diferentes temperaturas acero A 36

(Milke, 2007)

El método de diferencias finitas es una herramienta matemática muy importante para todas las ciencias en general. Con ayuda de un programa, el ingeniero tiene la oportunidad de obtener información muy precisa y detallada sobre las variables de un problema.

“Muchos problemas de importancia práctica que frecuentemente aparecen en ingeniería, resultan de una complejidad matemática tal que, aunque la deducción de las ecuaciones diferenciales que gobiernan tales problemas no resulta muy difícil, su solución, su solicitud por métodos exactos de análisis, aun después de introducir algunas hipótesis simplificadoras, no se logra sino para ciertos problemas de geometría, condiciones de contorno muy particulares.” (Zeferino, 2011)

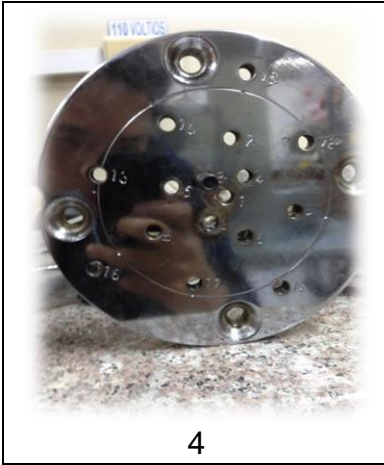
El cálculo del esfuerzo aplicado en la probeta en el rango elasto-plástico es de suma complejidad y por eso es necesario calcularlo utilizando un software de elementos finitos. Los resultados de la deflexión utilizada en los ensayos y su correspondiente esfuerzo máximo en la superficie de las probetas se muestran en el capítulo 4.

3.5. Procedimiento de operación y calibración de la máquina

A continuación se explica el procedimiento de operación y calibración de la máquina

1. Utilizar correctamente el equipo de protección personal de laboratorio: mandil, y gafas de seguridad.
2. Verificar que el switch ON/OFF se encuentre en posición OFF
3. Conectar la máquina de fatiga a la toma 220 V trifásica.
4. Dependiendo de la deflexión que se quiera aplicar a la probeta, utilizando la tabla 3, colocar el perno avellanado, perdiendo la cabeza en el lado avellanado del disco.
5. Colocar los 4 pernos avellanados, sujetando los discos asegurando que los puntos en los 2 en el exterior de los discos coincidan.
6. Asegurar 3 de los pernos con la tuerca, antes de colocar la cuarta tuerca se debe colocar la platina que hace contacto con la luz del láser.
7. Una vez colocadas las tuercas, apretar con la llave por el un lado y con la hexagonal por el otro.

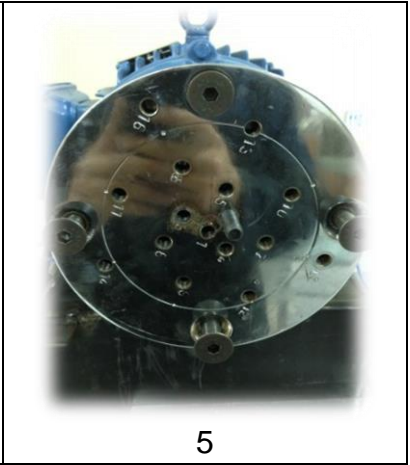
8. Colocar el brazo, ajustando con el bocín al perno que sale del disco y ajustar el otro lado, con el perno sin cabeza.
9. Girar el eje del motor, hasta que la barra se encuentre en la misma altura vertical del centro del eje del disco, para generar la misma deflexión arriba y abajo.
10. Colocar la parte más ancha de la probeta en la agarradera fija de la probeta, y sujetarla con su fijador superior y sus 2 pernos de cabeza redonda.
11. Una vez que se encuentre la posición adecuada de la barra, sostener el disco para que no pueda cambiar su posición y colocar el extremo más delgado de la probeta, haciendo contacto con la parte inferior del sujetador de la barra vertical.
12. Antes de ajustar todo los pernos verificar con el palpador que la deflexión sea la misma arriba y hacia abajo.
13. Ajustar los pernos de los sujetadores de los 2 extremos de la probeta, ingresando el cable de 12 V entre los sujetadores de la probeta y la probeta. Asegurarse de ingresar el cable con la chaqueta, para que no se corte por el movimiento.
14. Girar el switch ON/OFF, a posición ON.
15. Verificar que el variador de frecuencia se encuentre en la pantalla con las letras RDY y las 2 luces verdes prendidas, resetear el contador con la tecla reset.
16. Para iniciar la prueba, aplastar el botón verde del variador de frecuencia. Con la tecla PROG se ubica la pantalla en P002, donde se muestra la frecuencia con la que trabaja el motor. Subir o bajar la frecuencia se realiza con la flecha ascendente o descendente.



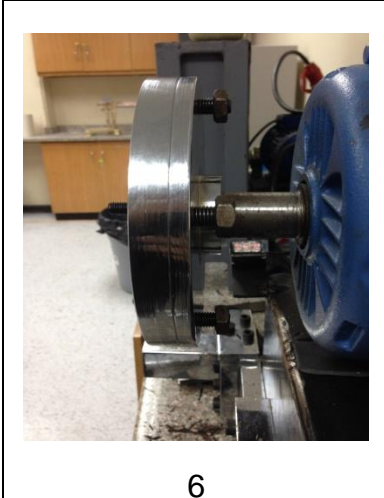
4



4



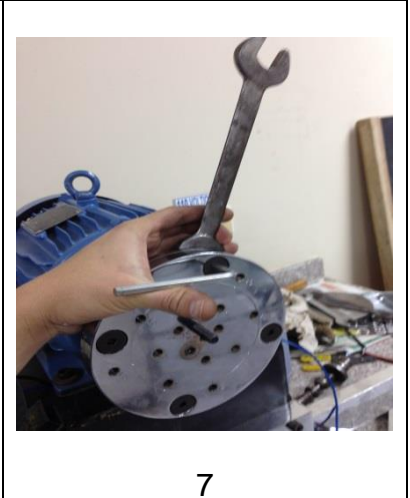
5



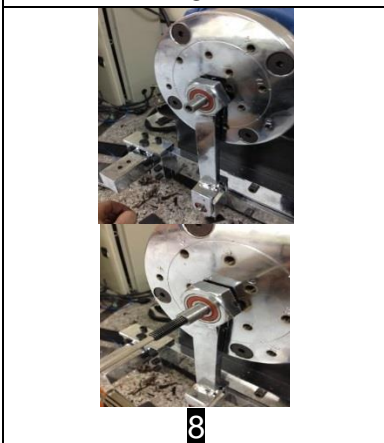
6



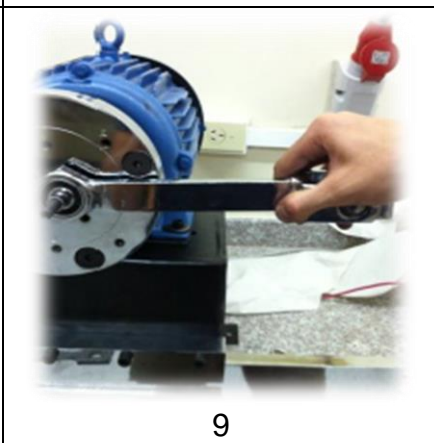
6



7



8



9



10

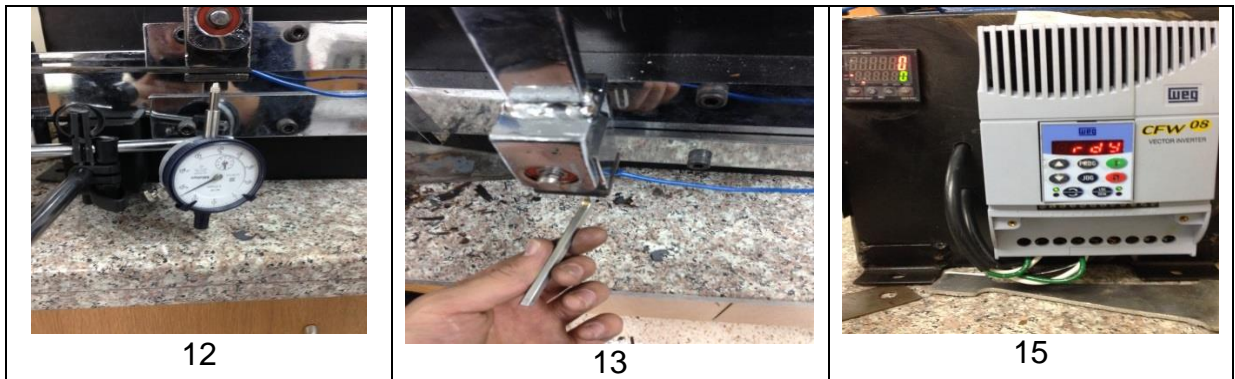


Tabla 7: Procedimiento de ensamblado, máquina de fatiga

3.6. Procedimiento de ensayos para estudiantes

ENSAYO DE FATIGA

OBJETIVO: Medir la resistencia a la fatiga del acero A 36.

INTRODUCCIÓN: En ingeniería y especialmente en la ciencia de los materiales, la fatiga se refiere a un fenómeno por el cual la falla de los materiales, bajo cargas dinámicas cíclicas se produce a menores valores de esfuerzos que bajo cargas estáticas. Un ejemplo de ello se tiene en un alambre: flexionándolo repetidamente se rompe con facilidad. La fatiga es una forma de rotura que ocurre en estructuras sometidas a esfuerzos dinámicos y fluctuantes. Puede ocurrir a un esfuerzo menor que el de la resistencia a la tracción o del límite elástico para una carga estática. Es muy importante su consideración, ya que es la primera causa de rotura de los materiales metálicos (aproximadamente el 90%), aunque también ocurre en polímeros y cerámicos. La fractura por fatiga tiene aspecto frágil aun en metales dúctiles, puesto que apenas hay deformación plástica, asociada a la rotura. El proceso consiste en un inicio y posterior propagación de fisuras. La superficie de fractura es perpendicular a la dirección del esfuerzo. Un ensayo especial es el de fatiga por flexión pura, que consiste en sostener un lado fijo de una probeta triangular, mientras que en el otro extremo se aplica una carga que genera una deflexión escogida por el experimentador. La máquina puede trabajar con diferentes ciclos de carga, pero se acostumbra a trabajar con un ciclo sinusoidal, es decir cuando se aplica la carga hacia arriba y hacia abajo el disco dará una vuelta lo que

equivale a un ciclo. Cuando se aplica la fuerza hacia arriba existe tracción en el lado inferior de la probeta y compresión en el lado superior. En cambio cuando se aplica la carga hacia abajo pasa exactamente lo contrario.

Máquina de Ensayo de Fatiga.

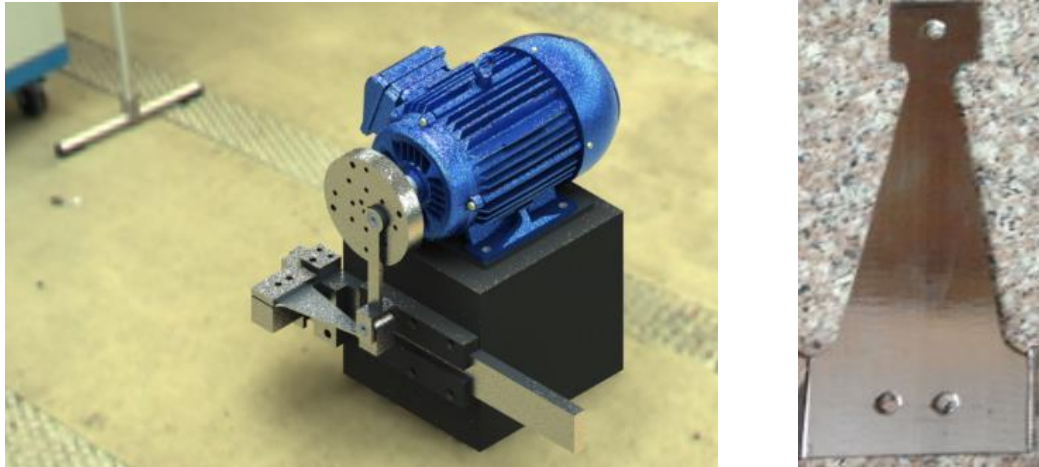


Figura 22: Máquina de fatiga de ensayos por flexión y probeta estándar

Variando la deflexión de la probeta en el ensayo, y anotando la cantidad de ciclos que la probeta resistió antes de romperse, se puede obtener el gráfico S-N siguiente, descrito esquemáticamente en la figura 23:

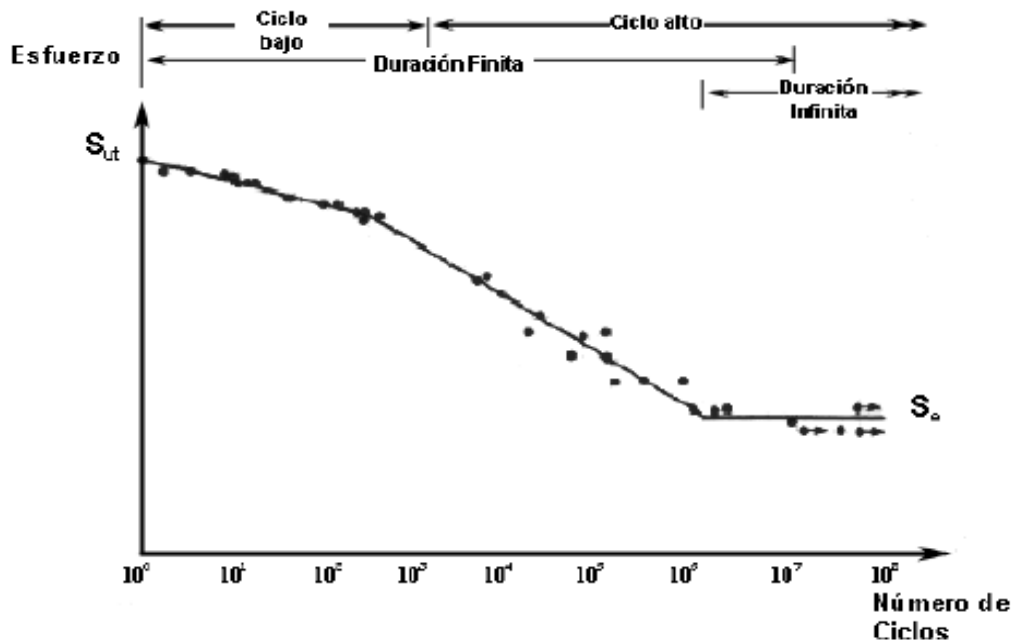


Figura 23: Ejemplo de diagrama de fatiga S-N (Budinas & Nisbett, Eight Edition)

La curva es decreciente hasta el millón de ciclos. Esta carga que no logra romper la probeta, es la carga de vida infinita y el esfuerzo que provoca es el llamado límite de resistencia a la fatiga: S_e .

Este valor S_e se utilizará para diseñar elementos sometidos a cargas fluctuantes, como es el caso ejes, estructuras, cigüeñales, etc.

EQUIPO UTILIZADO

- Máquina de ensayo de fatiga
- Probetas de acero
- Cinta métrica

- Pie de Rey
- Reloj Palpador

DATOS DE LA PRÁCTICA

Material	Esfuerzo de cedencia [Mpa]	Esfuerzo último [MPa]
Acero A 36	250	400

Longitud [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]
149	76	3

Deflexión [mm]	Ciclos hasta rotura [N]	Esfuerzo de la superficie [MPa]
9	481732	240
9	470432	240
9	475562	240
9	393250	240
9	425450	240

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Capítulo 4. Análisis de probetas y resultados

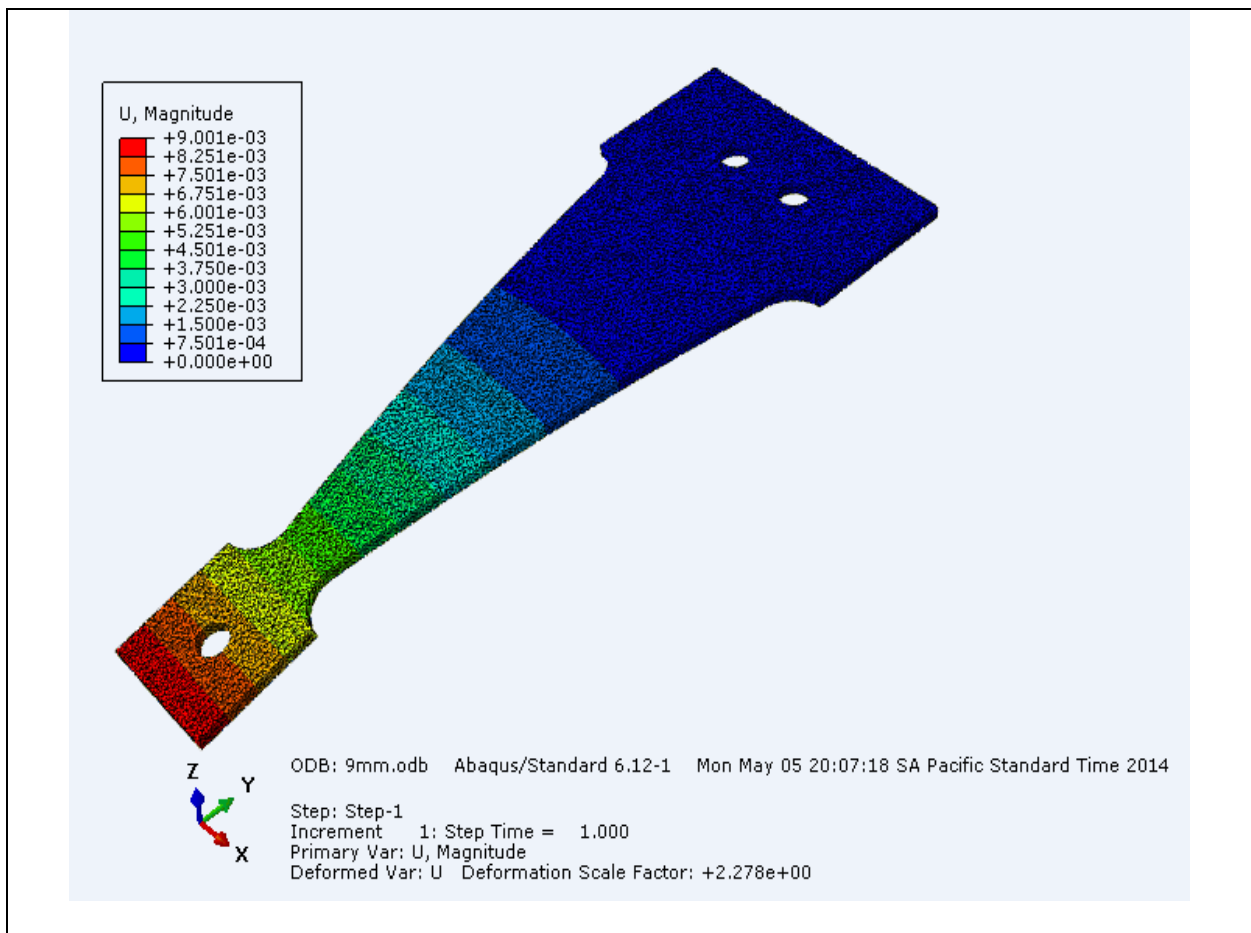
En esta sección se indican los resultados de los ensayos de fatiga por flexión obtenidos experimentalmente. El objetivo en esta sección, es realizar una Curva S-N y compararla con la curva experimental. También se realizó 10 ensayos con recubrimiento de acero inoxidable 304 con deflexión de 17 y 21 mm (5 en cada deflexión), para observar su efecto sobre la vida útil del material de substrato.

4.1. Resultado de las probetas

Para determinar la precisión de la máquina se realizaron veinte ensayos con el mismo material de acero A36 (sin recubrimiento), cinco ensayos por cada deflexión. Según dice la literatura, el límite de fatiga para el acero A 36, es el 50% del esfuerzo último. Por esta razón se utilizó esfuerzo a partir de 240 MPa (deflexión 9 mm) 60% del esfuerzo último, hasta 305 MPa (deflexión 21 mm) 76% del esfuerzo último.

- **Deflexión 9 mm, 240 MPa:**

A continuación se realizó el análisis del sistema con elementos finitos. Las condiciones de borde del sistema se aplican también en el software de Abaqus, es decir, la sección más ancha está empotrada y la sección más delgada se desplaza 9 mm hacia abajo. Con las propiedades del material ingresadas en el programa se obtuvo gráficos de deflexión, esfuerzos en el plano y deformación plástica, de la siguiente manera:



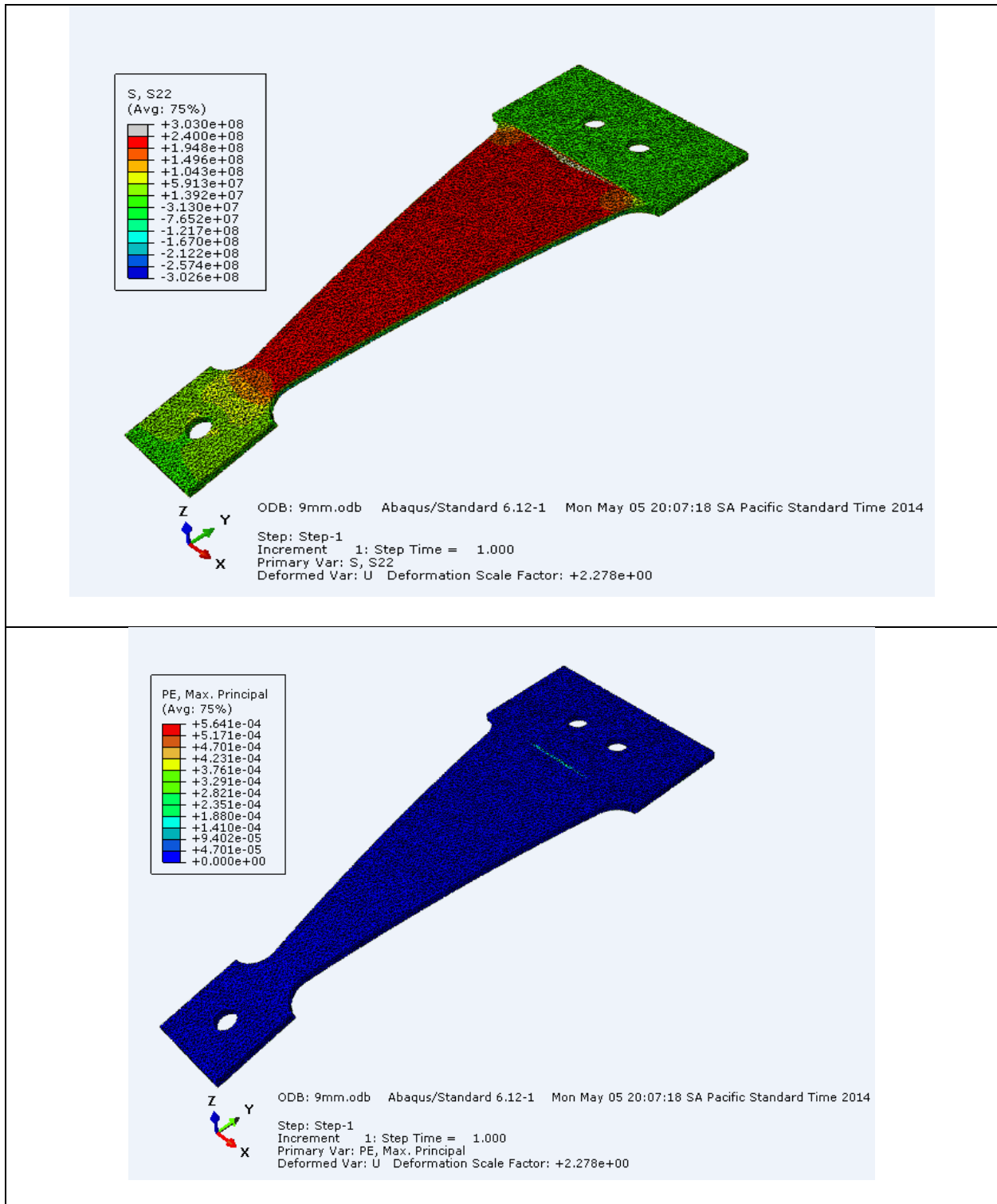


Figura 24: Simulación en Abaqus deflexión, esfuerzo y deformación plástica para deflexión de 9 mm






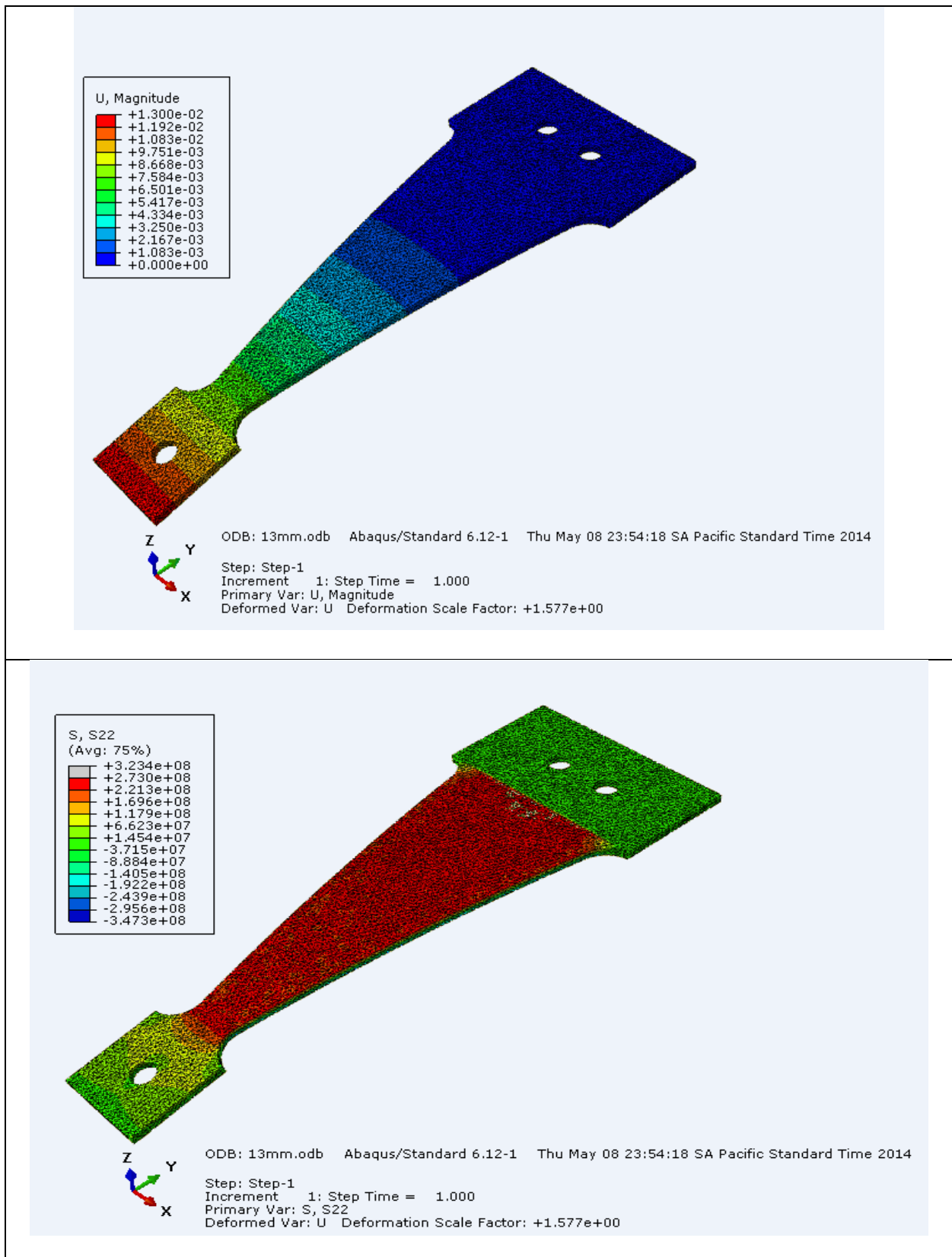
Probeta #	Ciclos hasta rotura	Imagen
1	481732	
2	470432	
3	362450	
4	353250	
5	332574	

Tabla 8: Resultados probetas deflexión 9 mm

En esta condición la deformación es puramente elástica como se observa en la figura 24. El esfuerzo es perfectamente uniforme en la región plana triangular de la probeta y se aproxima al esfuerzo calculado con la ecuación 2. A medida que se acerca al empotramiento, los esfuerzos se reducen. No se aprecia una significativa concentración de esfuerzos en el empotramiento. Las fotografías evidencia una rotura siempre cercana al empotramiento, lo que sugiere una concentración de esfuerzos producto probablemente de imperfecciones en el máquina del radio de acuerdo, o ligeras desviaciones en el paralelismo del montaje que asegura la perfecta carga a flexión. El número de ciclos hasta la rotura oscila con un promedio de 422710 con una desviación estándar de 73320.

- **Deflexión 13 mm, Esfuerzo 273 MPa:**

Se realizó el modelado para determinar el esfuerzo generado por una deflexión de 13 mm.



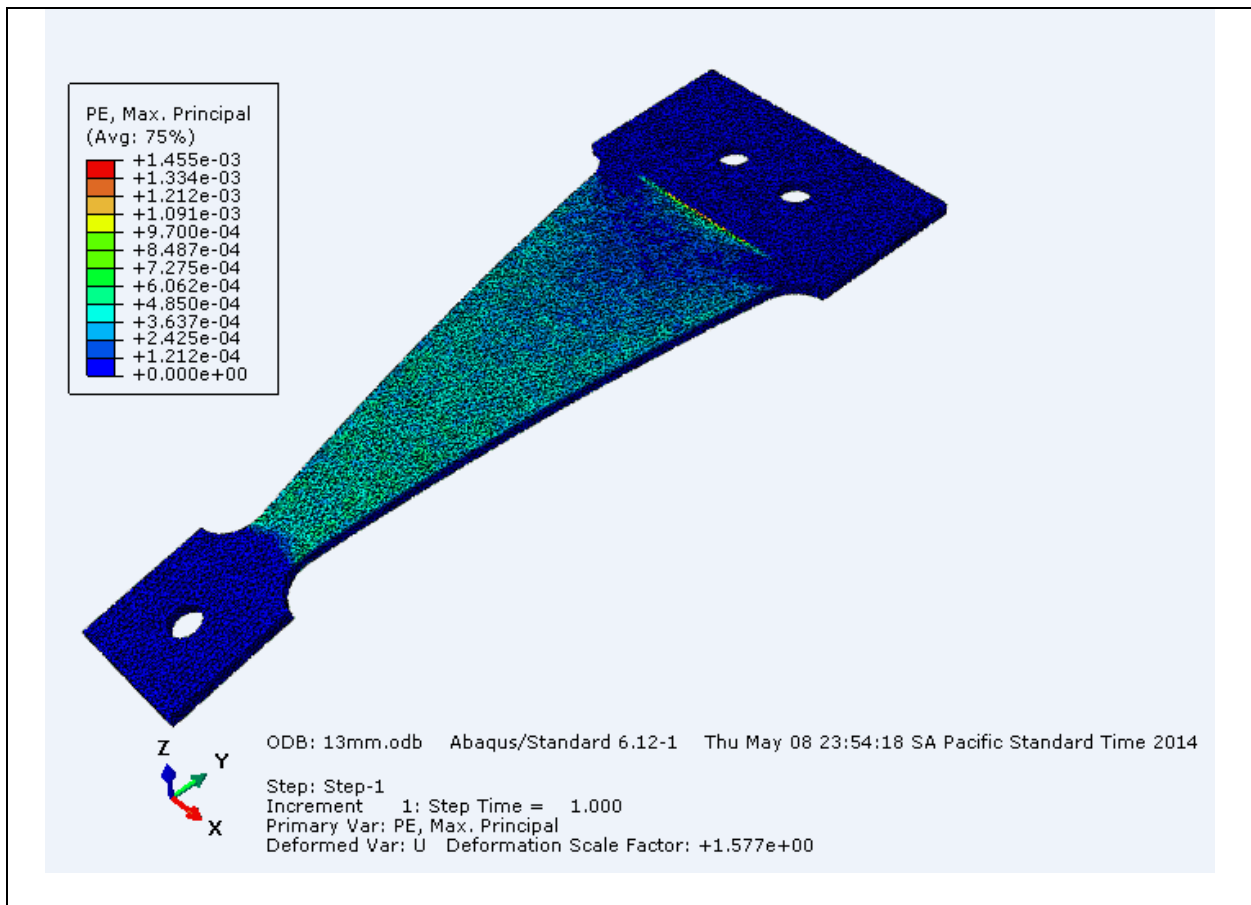



Figura 25: Simulación en Abaqus deflexión, esfuerzo y deformación plástica para deflexión de 13 mm

Probeta #	Ciclos hasta rotura	Imagen
1	101100	





2	123360	
3	117900	
4	105316	
5	121064	

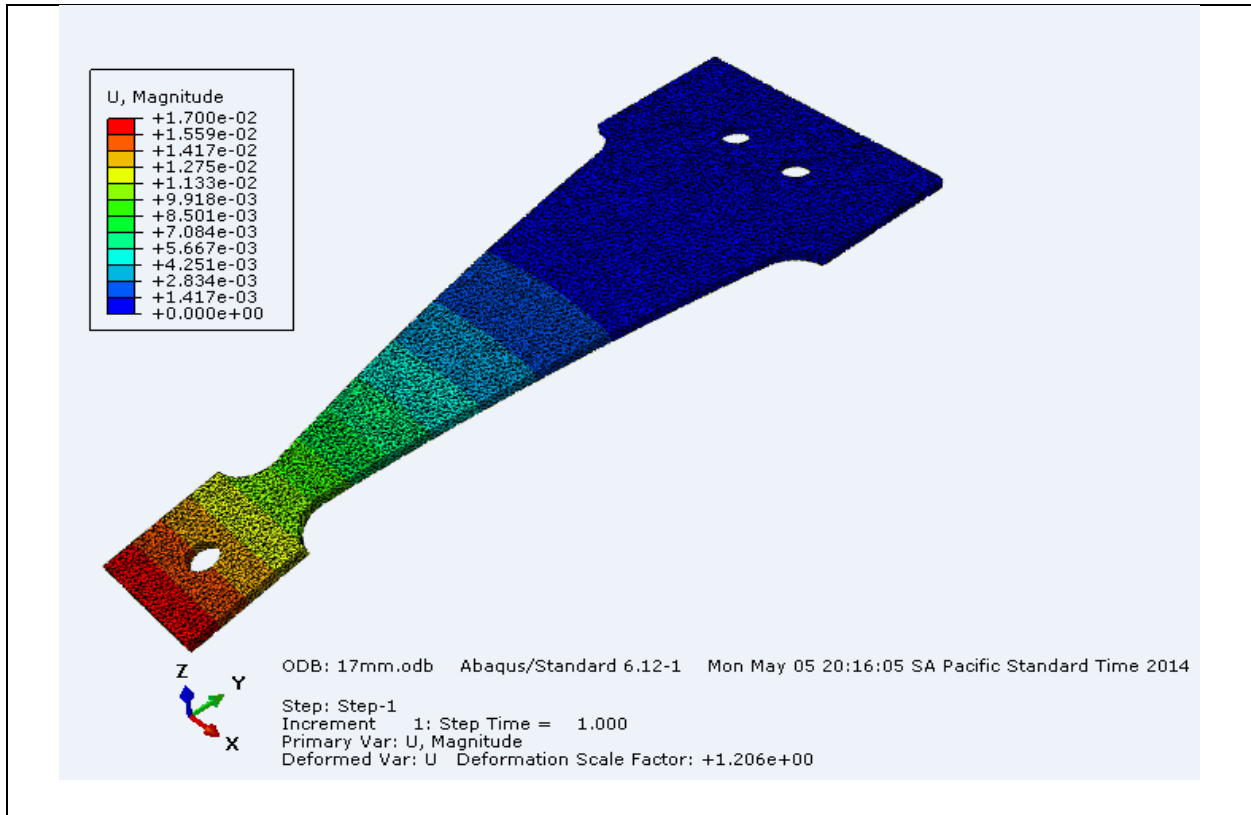
Tabla 9: Resultados probetas deflexión 13 mm

En esta condición la deformación es elasto-plástica como se observa en la figura 25. El esfuerzo es perfectamente uniforme en la región plana triangular de la probeta y se aproxima al esfuerzo calculado con la ecuación 2. A medida que se acerca al empotramiento, los esfuerzos se reducen. Las fotografías evidencia una rotura siempre cercana al empotramiento, lo que sugiere una concentración de esfuerzos producto probablemente de imperfecciones en el máquina del radio de acuerdo, o

ligeras desviaciones en el paralelismo del montaje que asegura la perfecta carga a flexión. El número de ciclos hasta la rotura oscila con un promedio 113728 con una desviación estándar de 9959.

- **Deflexión 17 mm, Esfuerzo 295 MPa**

Se realizó el modelado para determinar el esfuerzo generado por una deflexión de 17 mm.



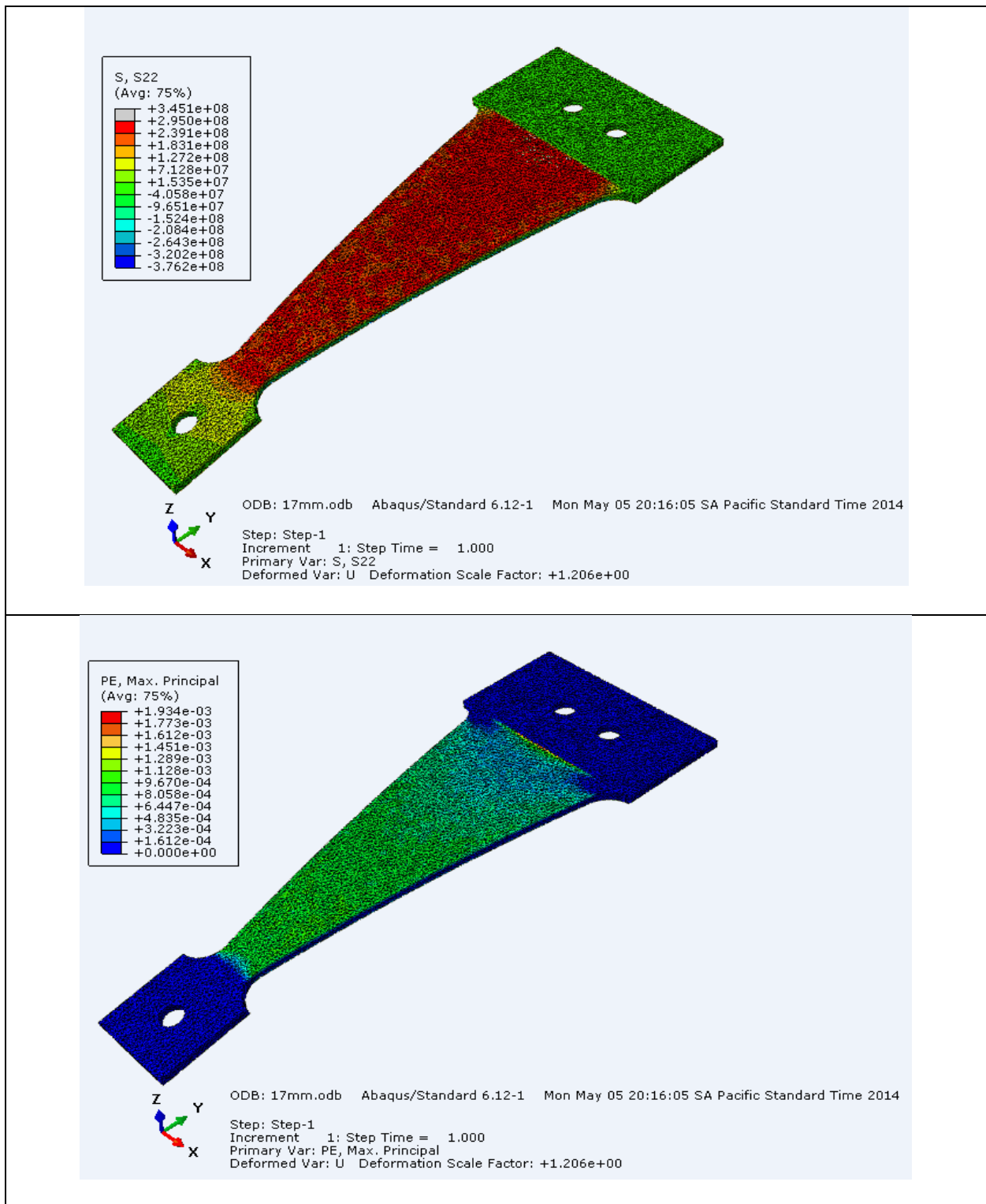


Figura 26: Simulación en Abaqus deflexión, esfuerzo y deformación plástica para deflexión de 17 mm






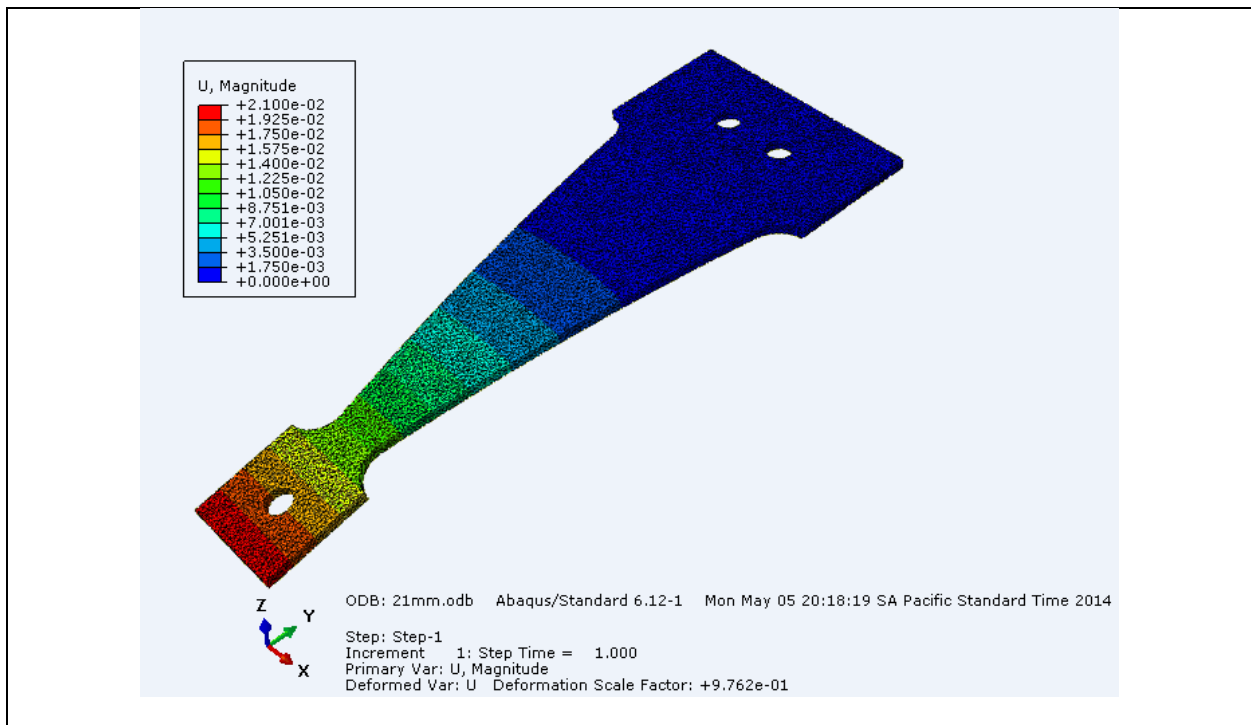
Probeta #	Ciclos hasta rotura	Imagen
1	76375	
2	76074	
3	71556	
4	73330	
5	72440	

Tabla 10: Resultados probetas deflexión 17 mm

En esta condición la deformación es elasto-plástica como se observa en la figura 26. El esfuerzo es perfectamente uniforme en la región plana triangular de la probeta y se aproxima al esfuerzo calculado con la ecuación 2. A medida que se acerca al empotramiento, los esfuerzos se reducen. Las fotografías evidencia una rotura siempre cercana al empotramiento, lo que sugiere una concentración de esfuerzos producto probablemente de imperfecciones en el máquina del radio de acuerdo, o ligeras desviaciones en el paralelismo del montaje que asegura la perfecta carga a flexión. El número de ciclos hasta la rotura oscila con un promedio 73915 con una desviación estándar de 2204.

- **Deflexión 21 mm, Esfuerzo 305 MPa**

Se realizó el modelado para determinar el esfuerzo generado por una deflexión de 21 mm.



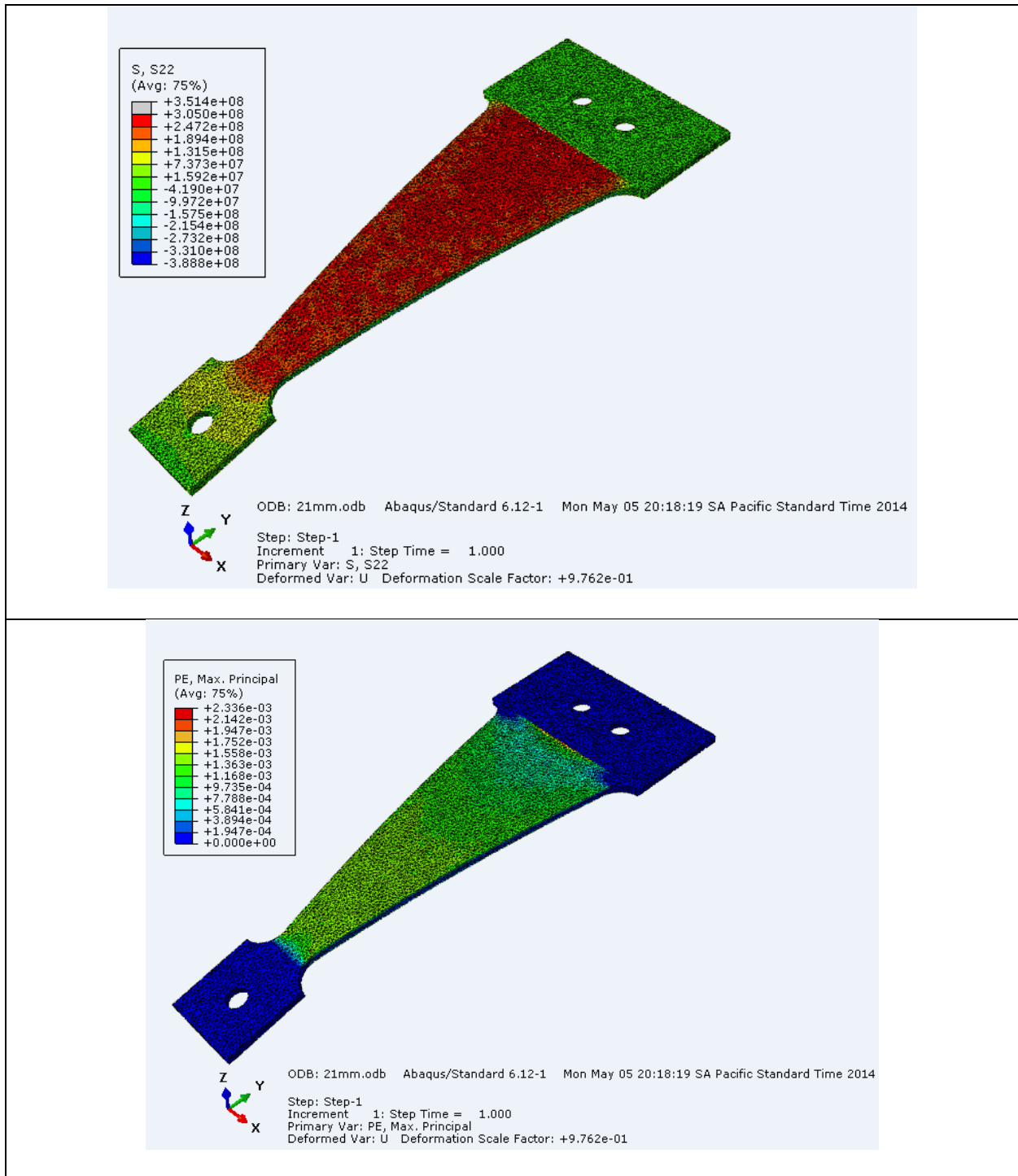


Figura 27: Simulación en Abaqus deflexión, esfuerzo y deformación plástica para deflexión de 21 mm






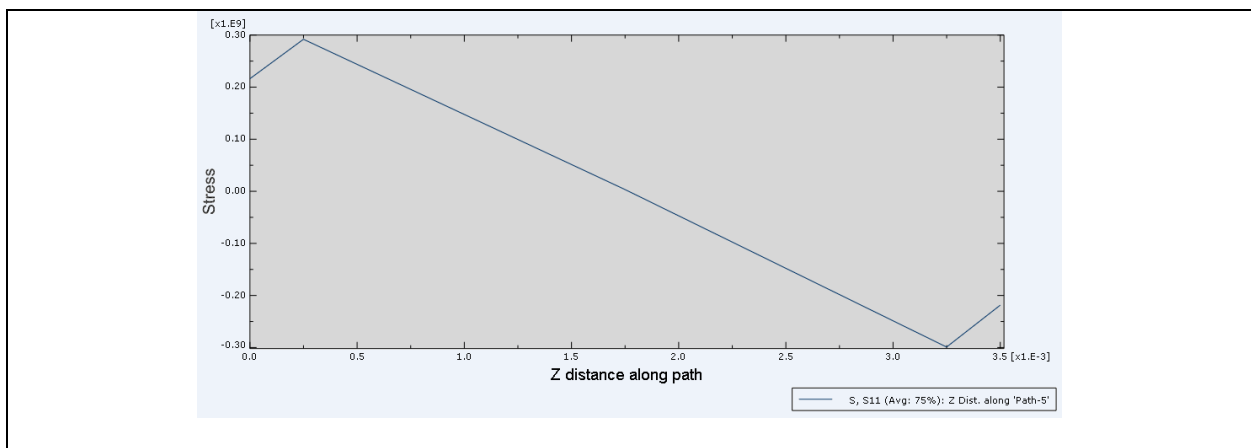
Probeta #	Ciclos hasta rotura	Imagen
1	46485	
2	37500	
3	41029	
4	38440	
5	46770	

Tabla 11: Resultados probetas deflexión 21 mm

En esta condición la deformación es elasto-plástica como se observa en la figura 27. El esfuerzo es perfectamente uniforme en la región plana triangular de la probeta y se aproxima al esfuerzo calculado con la ecuación 2. A medida que se acerca al empotramiento, los esfuerzos se reducen. Las fotografías evidencia una rotura siempre cercana al empotramiento, lo que sugiere una concentración de esfuerzos producto probablemente de imperfecciones en el máquina del radio de acuerdo, o ligeras desviaciones en el paralelismo del montaje que asegura la perfecta carga a flexión. El número de ciclos hasta la rotura oscila con un promedio 42024 con una desviación estándar de 4353.

- **Deflexión 17 mm probeta con recubrimiento**

Para el caso de las probetas con recubrimiento se agregó 2 capas de 0.25 mm a cada lado de acero inoxidable 304 con sus respectivas propiedades mecánicas y se aplicó las condiciones de borde del sistema. En la figura 28 se muestra el esfuerzo distribuido en el espesor de la placa, los esfuerzos S11 en la superficie del recubrimiento y la deformación plástica. El esfuerzo en el recubrimiento tiene un valor de 228 MPa y para el sustrato es de 300 Mpa.



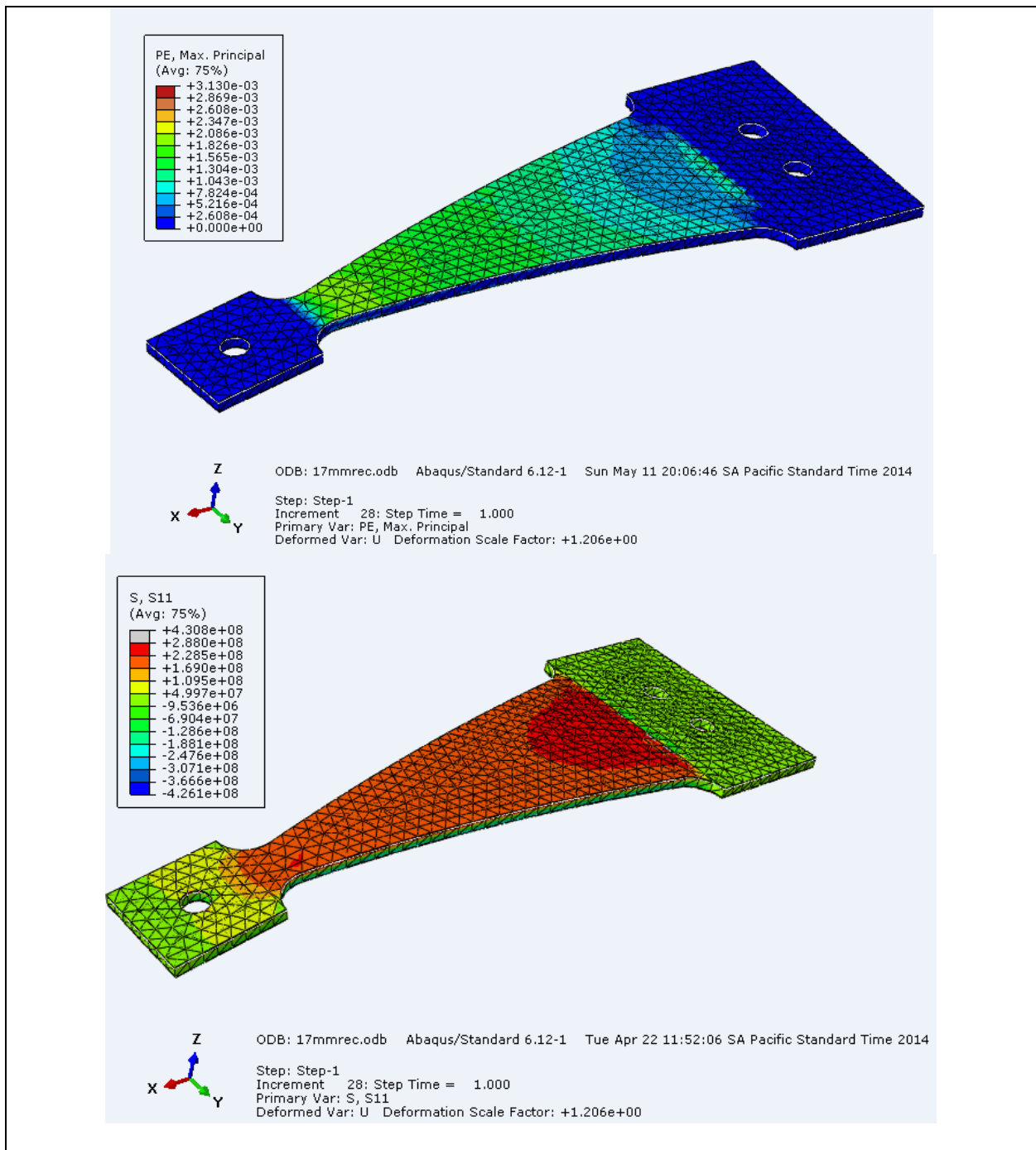


Figura 28: Diagrama S vs espesor deformación plástica y esfuerzo S11 para placa con recubrimiento 17 mm






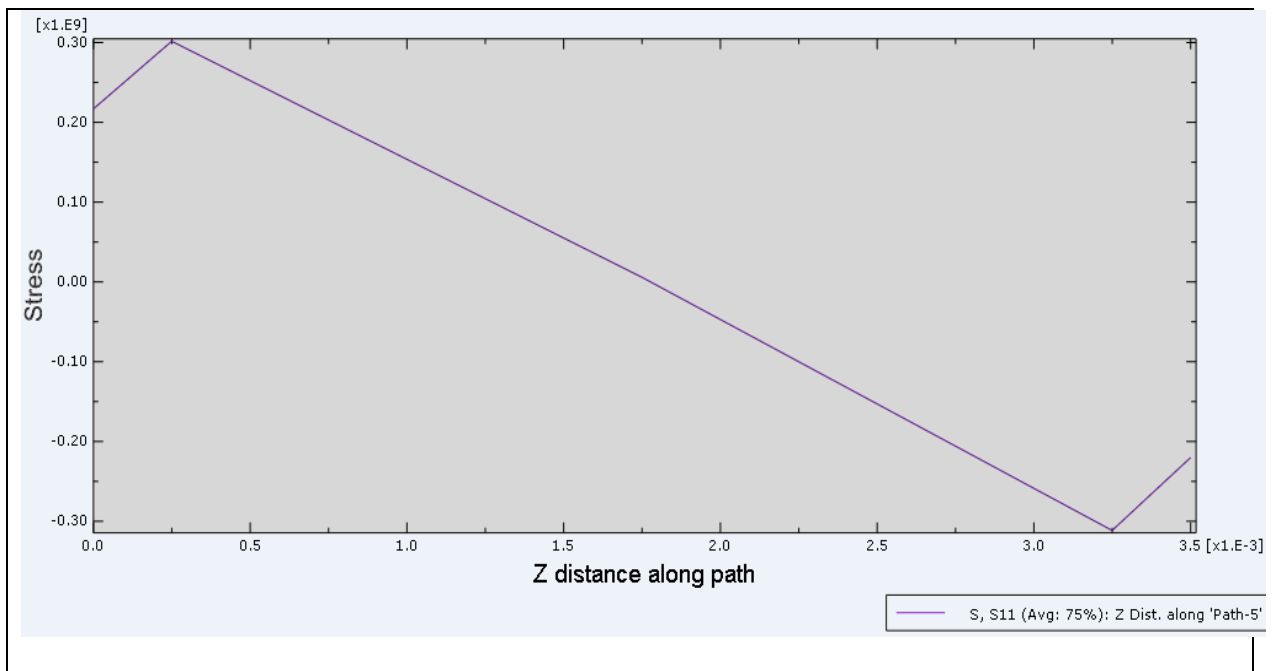
Probeta #	Ciclos hasta rotura	Imagen
1	22055	
2	25862	
3	24352	
4	25563	
5	26565	

Tabla 12: Resultados para probetas de 17 mm con recubrimiento

- **Deflexión 21 mm probeta con recubrimiento**

De igual manera se agregó 2 capas de 0.25 mm a cada lado de acero inoxidable 304 con sus respectivas propiedades mecánicas y se aplicó las condiciones de borde del sistema. En la figura 29 se muestra el esfuerzo distribuido en el espesor de la placa, los esfuerzos S11 en la superficie del recubrimiento y la deformación plástica. El esfuerzo en el recubrimiento tiene un valor de 240 MPa y para el substrato es de 305 Mpa.



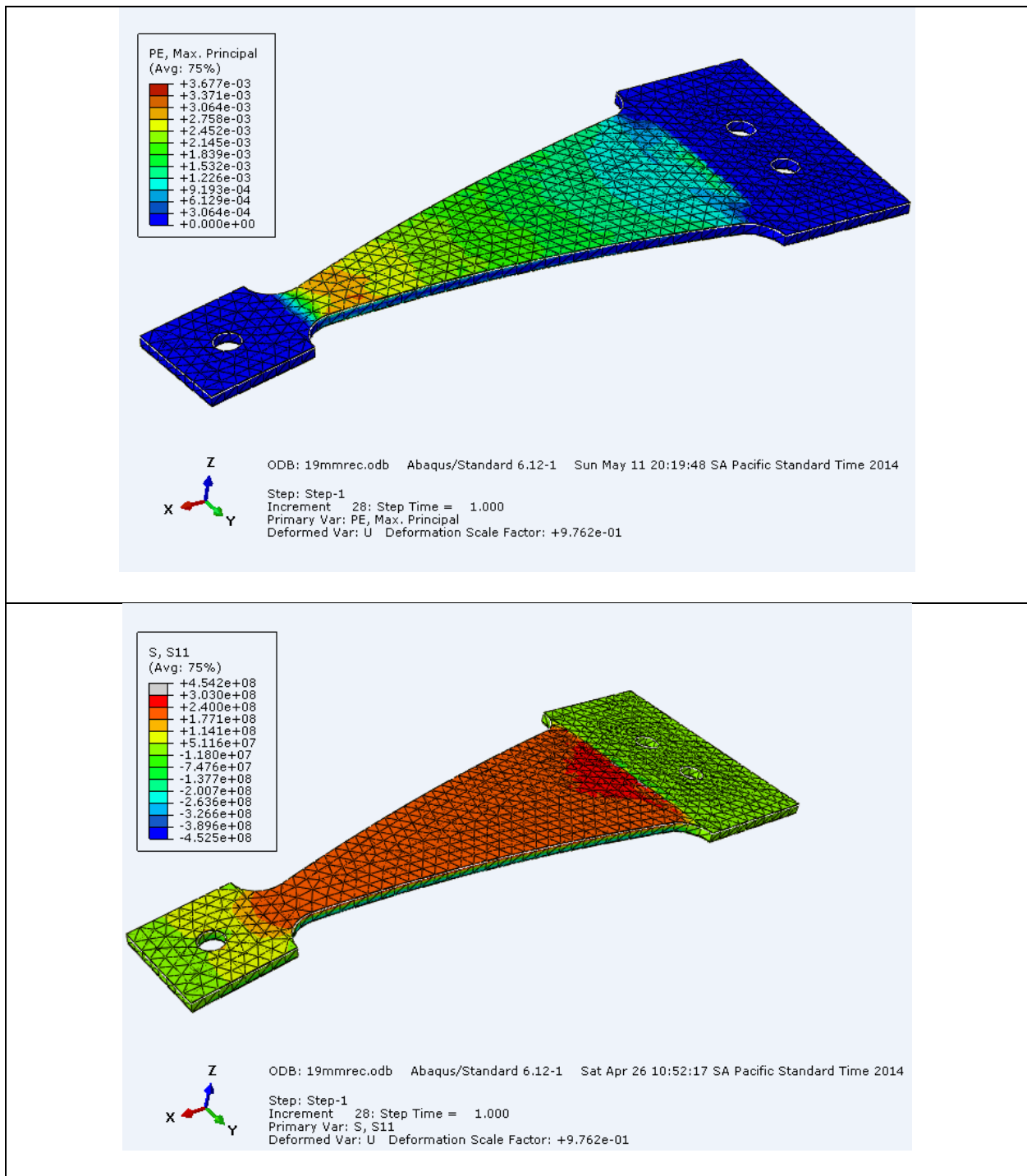


Figura 29: Diagrama S vs espesor deformación plástica y esfuerzo S11 para placa con recubrimiento 21 mm






Probeta #	Ciclos hasta rotura	Imagen
1	13115	
2	11200	
3	13077	
4	13105	
5	13565	

Tabla 13: Resultados para probetas de 21 mm con recubrimiento

Se puede observar que la grieta ya no se encuentra en el extremo en el de deflexión de 21mm y existe delaminación en algunos casos en el de mayor deflexión.

4.2 Análisis de resultados

Es necesario comprobar la repetitividad de los resultados y así también la precisión de la máquina. Para lograr ésto se deben encontrar los errores absolutos y relativos de cada ensayo. Diferencias en el comportamiento a fractura puede generarse por varias razones como diferencias en el material procesado, manufactura, variabilidad natural que los materiales poseen, tratamiento térmico y experimentalmente, una mala calibración de la máquina, o errores en montaje. Por esta razón es comprensible que exista una variabilidad en los ciclos de duración en cada ensayo a una deflexión específica. Sin embargo se aprecia una clara tendencia que mientras más deflexión se aplique, es decir mayor esfuerzo se aplique, el número de ciclos siempre debe ser menor. En las tablas 14, 15, 16 y 17 se puede observar el promedio, la desviación estándar, error absoluto y relativo de cada deflexión utilizada. Para todas las deflexiones sin tomar en cuenta la de 17 mm que fue en la que se identifica menor dispersión de datos, se presentan errores relativos mayores al 10 % que pueden darse por todas las razones dichas anteriormente. Se resalta sin embargo que la máquina cumple con lo más importante; los ciclos disminuyen con el aumento de deflexión aplicada. Para una mejor aproximación y hacer el uso de herramientas estadísticas es preciso tener más datos. Para un estudio de fatiga, donde el número de ciclos está en escala logarítmica, no es de mucha importancia la repetitividad del número de ciclos a la rotura ya que pequeñas diferencias no alteran con peso la gráfica S-N entonces no tiene sentido eliminar uno

de los ensayos que más altere al error relativo. La mejor aproximación de precisión que se puede dar para el acero A 36 es el promedio más menos la desviación estándar de cada deflexión.

Deflexión 9 mm				
Ciclos	Promedio	Std. Dev	Error Absoluto	Error Relativo
481732	422710	73320	59022	12,25
470432			47722	10,14
475562			52852	11,11
353250			-69460	-19,66
332574			-90136	-27,10

Tabla 14: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 9 mm

Deflexión 13 mm				
Ciclos	Promedio	Std. Dev	Error Absoluto	Error Relativo
101000	113728	9959	-12728	-12.60
123360			9632	7.81
117900			4172	3.54
105316			-8412	-7.99
121064			7336	6.06

Tabla 15: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 13 mm

Deflexión 17mm				
Ciclos	Promedio	Std. Dev	Error Absoluto	Error Relativo
76375	73915	2204	2460	3.22
76074			2159	2.84
71556			-2359	-3.30
73330			-585	-0.80
72240			-1675	-2.32

Tabla 16: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 17 mm

Deflexión 21mm				
Ciclos	Promedio	Std. Dev	Error Absoluto	Error Relativo
46485	42024.8	4353	4460	9.59
37500			-4525	-12.07
41029			-996	-2.43
38440			-3585	-9.33
46670			4645	9.95

Tabla 17: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 21 mm

4.3. Diagrama S-N Acero A 36

Para realizar el diagrama S-N se tomó todo los datos de cada deflexión y el esfuerzo obtenido de la simulación en Abaqus. Claramente se puede observar que el esfuerzo no es del todo uniforme en la probeta pero se tomó el esfuerzo promedio en la superficie (región más alejada del eje neutro) de la probeta donde el esfuerzo es uniforme. Para comparar con la teoría se montó también la curva de fatiga de acero estructural de la figura 13 para comparar los datos experimentales con la curva de fatiga teórica. La curva teórica al ser graficada punto por punto, se une linealmente los puntos y se puede observar que los puntos están acorde con la curva teórica y la variación es muy pequeña.

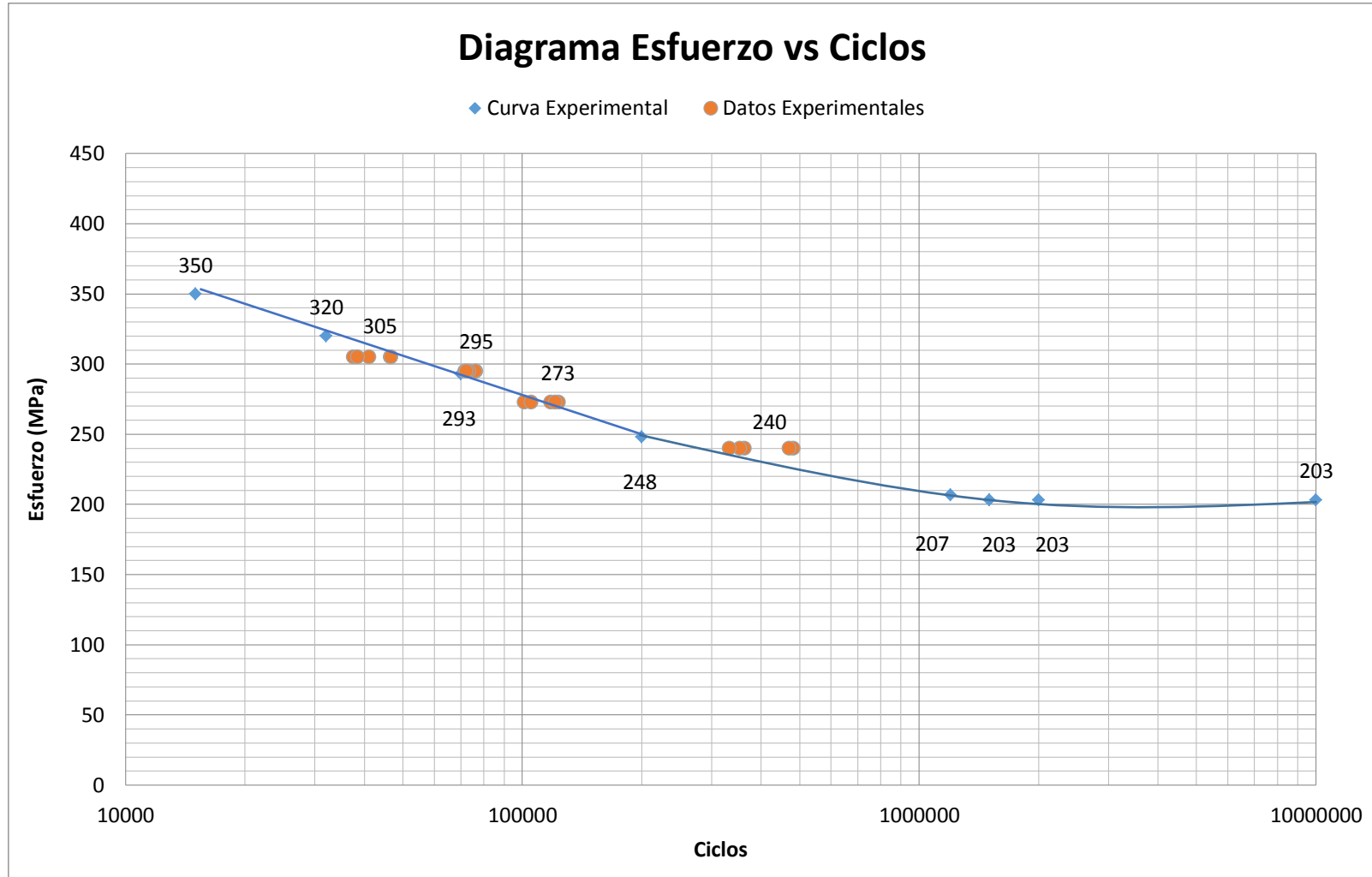


Figura 30: Diagrama S-N Experimental Acero A 36 (Boyer, 1986) y ensayos experimentales

4.4. Resultados de probetas con recubrimiento

Para las probetas de acero inoxidable se trabajó solo con dos deflexiones de probetas por el número limitado de las probetas. Estas deflexiones fueron de 17 y 21 mm que con recubrimiento de 0.25 mm de espesor a cada lado, determinan esfuerzos de 228 y 240 MPa en el recubrimiento. La figura 28 y 29 muestra que el esfuerzo es mayor en el sustrato que en el recubrimiento aun cuando la deflexión es mayor en el recubrimiento. Esto se debe a que el módulo de Young del acero inoxidable 304 es menor que el de acero A 36. El objetivo principal del recubrimiento en el ensayo de fatiga es observar como distintos factores del recubrimiento afectan al material principal en la resistencia a la fatiga.

Deflexión 17 mm con recubrimiento				
Ciclos	Promedio	Std. Dev	Error Absoluto	Error Relativo
22055	24879,4	1770	-2824,4	-12,81
25862			982,6	3,80
24352			-527,4	-2,17
25563			683,6	2,67
26565			1685,6	6,35

Tabla 18: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 17 mm con recubrimiento

Deflexión 21 mm con recubrimiento				
Ciclos	Promedio	Std. Dev	Error Absoluto	Error Relativo
13115	12812,4	924	302,6	2,31
11200			-1612,4	-14,40
13077			264,6	2,02
13105			292,6	2,23
13565			752,6	5,55

Tabla 19: Resultados de los ciclos a la fractura, promedio, desviación estándar, error absoluto y relativo para una deflexión de 17 mm con recubrimiento

Comparando el promedio de ciclos entre las probetas de 17 mm y 21 mm se puede concluir que la resistencia con el recubrimiento disminuye en un 70 %. Se utiliza el mismo esfuerzo que las probetas sin recubrimiento porque no hay cambio significativo.

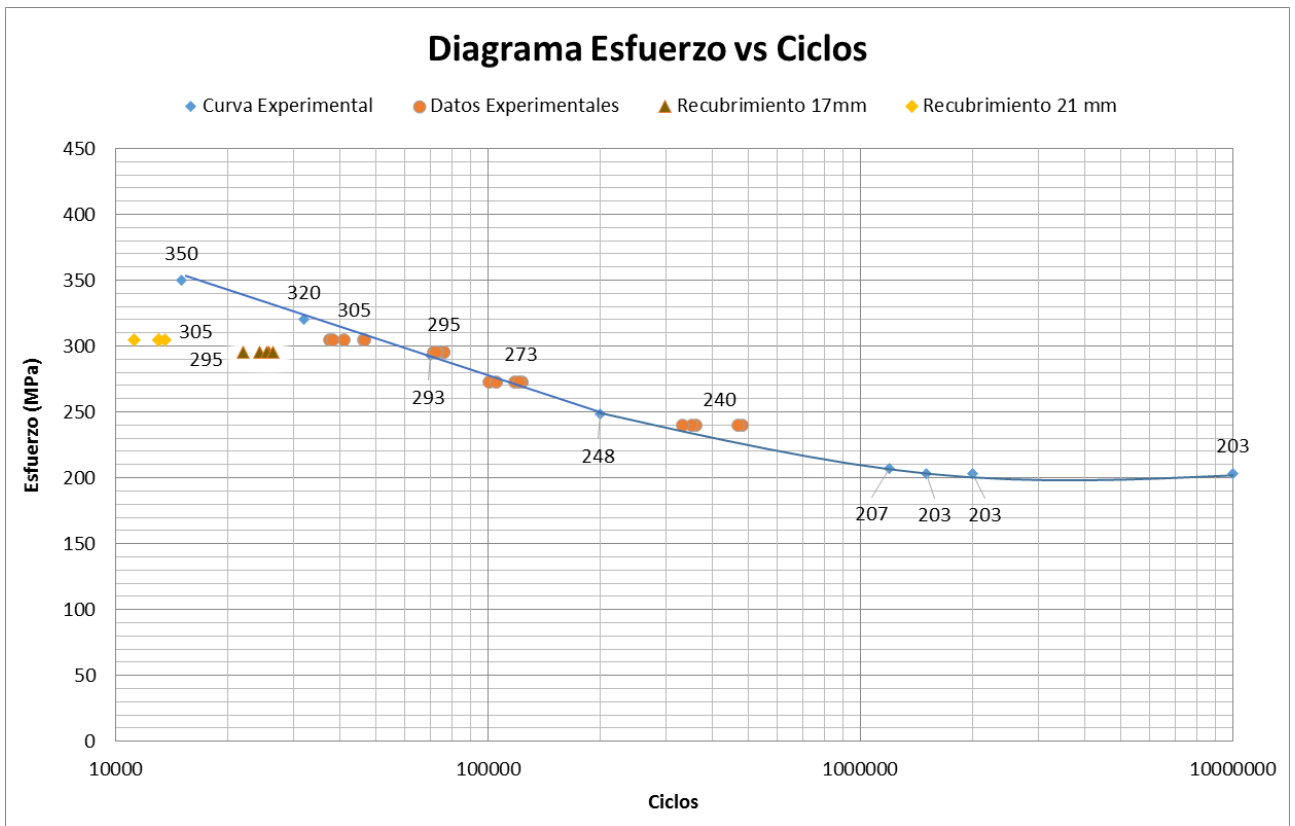


Figura 31: Diagrama S-N experimental Acero A 36 (Boyer, 1986) y probetas con recubrimiento

4.5. Discusión

A continuación, se analizan las variables que afectan a los resultados. Analizando primero solo los datos de Acero A36, el número de ciclos varía con un error relativo mayor al 10% (relativamente a la misma deflexión) en 3 de las 4 condiciones de esfuerzos investigados. Sin embargo, en toda curva de S-N de fatiga el número de ciclos está en escala logarítmica, entonces el error relativo obtenido no es significativo. Para una mejor aproximación sería necesario realizar más ensayos. Para la deflexión de 9mm o esfuerzo 240 MPa, el error relativo es considerable porque es mayor al 20 %. Al ser el ensayo de mayor duración, existe mayor probabilidad de que ocurran errores experimentales, como por ejemplo: el cable de 12 V conectado a la probeta se rompa, o también el perno utilizado para conectar el disco al brazo de palanca. Cual sea de los 2 posibles errores que sucedan, hacen que el ensayo se interrumpa y es un factor de dispersión de datos porque la prueba deja de ser continua.

Se puede observar que la desviación estándar disminuye conforme se va aumentando la deflexión menos en el caso de 17 y 21 mm. El aumento de esfuerzo no tiene influencia en la precisión de los datos, pero si el proceso experimental. Los ensayos de 13 y 9 mm son los que más tiempo necesitan en llegar a la fractura, por esta razón el operador no siempre está presente cuando ocurre la falla. Existen casos en que la probeta está completamente fracturada, pero no se llega a separar completamente y el circuito de 12 V no se abre por lo que el motor sigue corriendo. Este puede ser un factor de dispersión de datos en estos casos.

En la simulación en Abaqus, donde se calculó el esfuerzo se utilizó la curva esfuerzo deformación elasto-plástica para que la simulación sea más precisa.

Para analizar las probetas con recubrimiento se debe conocer un poco más sobre el efecto que tiene el recubrimiento en la probeta. Existen 2 efectos fundamentales que hacen que la probeta resista 70 % menos de una probeta sin recubrimiento. Estos son:

- 1) Los esfuerzos residuales generados por las 2 capas de acero inoxidable que están a tracción haciendo que el material base sufra esfuerzos residuales.
- 2) El segundo efecto es la rugosidad del recubrimiento que hace más fácil la iniciación de grietas.
- 3) Es posible también que la probeta por el calor aplicado en el proceso de recubrimiento se haya enfriado bruscamente, por consiguiente convirtiendo al material a una condición frágil.

Por estos efectos se puede observar en las tablas 12 y 13 el inicio de la grieta y la fractura ocurre en distintos lugares a lo largo de la probeta.

La mayor parte de estudios de fatiga son realizados a tracción-compresión o deformación rotacional, pero la curva teórica utilizada en la figura 14 es de flexión pura. La razón por la cual estos ensayos son más utilizados es porque el tamaño de la probeta facilita observar cómo se formaron las grietas. La fatiga tiene 3 fases que son: La fase I de iniciación o nucleación de grietas, la fase II que consiste en la propagación de las mismas y la fase III que es donde ocurre la fractura. En la figura

31 muestra un ensayo típico de fatiga de flexión rotacional donde la grieta fue iniciada.

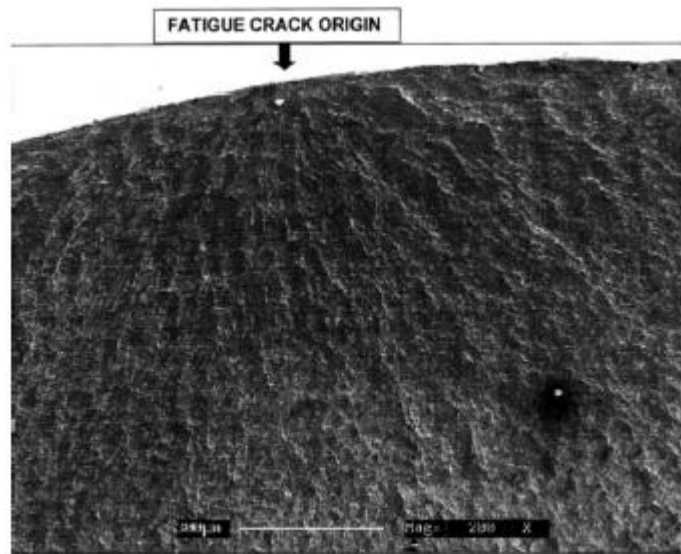


Fig. 7. Typical fracture surface from base metal. Rotating bending fatigue test.

Figura 32: Nucleación de grieta de un ensayo típico de flexión rotacional

(Nascimento, Souza, Miguel, Pigatin, & Voorwald , 1999)

Estudios realizados por Nascimento et. al. comparan dos tipos de recubrimientos utilizados en acero AISI 4340 para ensayos de fatiga. El primero es HVOF (High velocity Oxygen Fuel) con carburo de tungsteno, y el segundo proceso es galvanoplastia de cromo duro. Está comprobado que la resistencia a fatiga puede ser aumentada si los esfuerzos residuales aplicados en la superficie del sustrato son de compresión. Estos esfuerzos a compresión se forman debido a la deformación mecánica en la superficie durante el impacto a gran velocidad de las partículas en el proceso (ejm, proceso de shot peening o granallado). (Nascimento, Souza, Miguel, Pigatin, & Voorwald , 1999)

Como ejemplo se muestra en la figura 32, los esfuerzos residuales a tracción en la superficie del recubrimiento, pero a compresión en la superficie del sustrato.

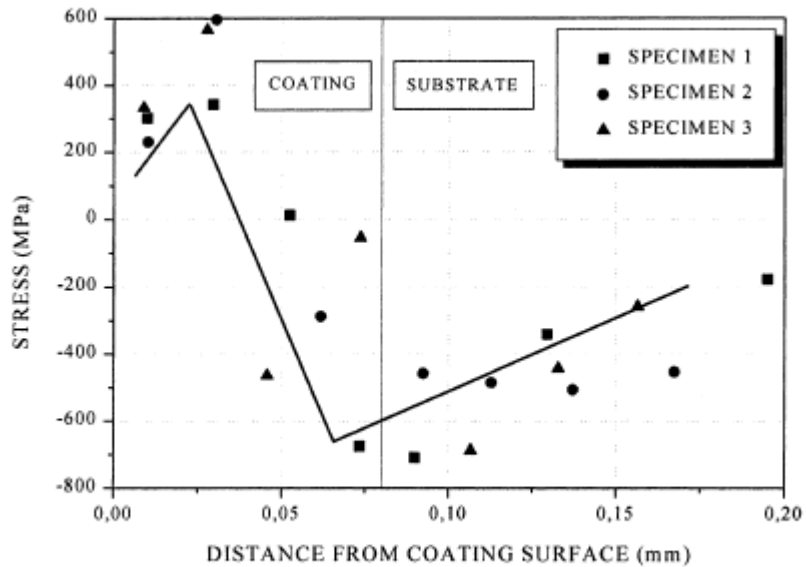


Fig. 5. Through-thickness residual stress distribution for WC HP/HVOF thermal spray coating.

Figura 33: Esfuerzos residuales aplicados en el espesor durante el proceso de HVOF
(Nascimento, Souza, Miguel, Pigatin, & Voorwald, 1999)

Como se puede observar en la figura 30 la resistencia a la fatiga de los dos ensayos con recubrimiento y sin recubrimiento, el proceso de HVOF (proceso que determina esfuerzos residuales de compresión en el acero) aumenta la resistencia a la fatiga significativamente, por otro lado el recubrimiento de cromo duro disminuye.

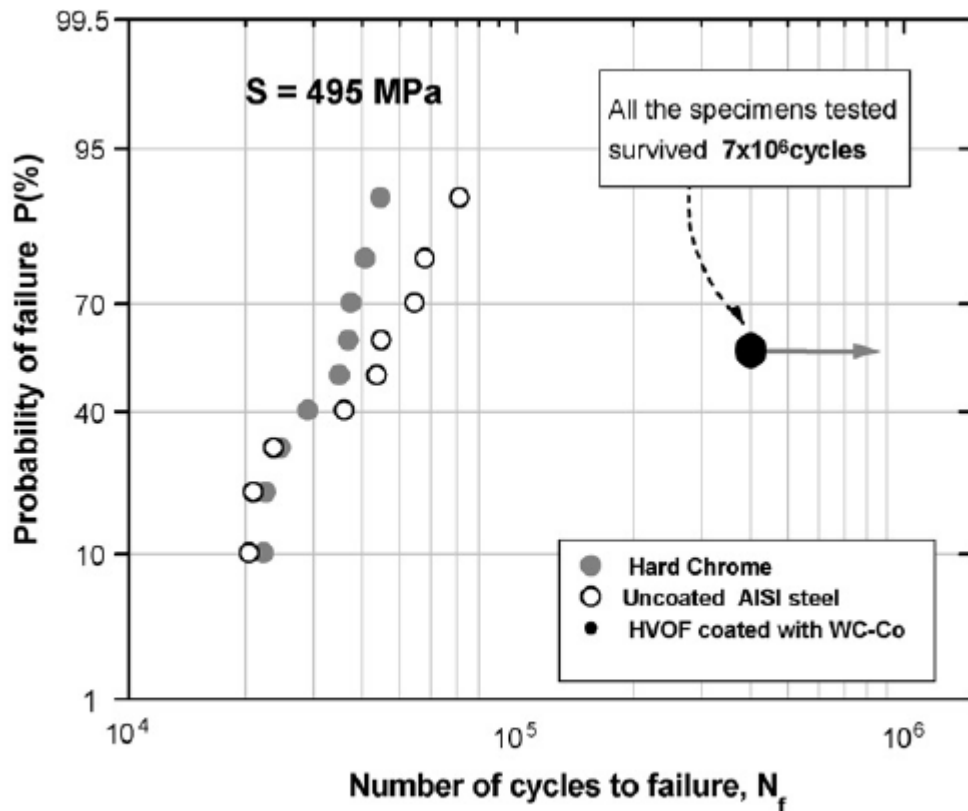


Fig. 1. Fatigue life distributions of AISI 4340 steel.

Figura 34: Distribución de ensayos de fatiga con recubrimientos y sin recubrimiento.

(Ibrahim & Berndt, 2006)

En el caso del recubrimiento de galvanoplastia de cromo duro, se puede observar en la figura 31 como las grietas se forman en el recubrimiento hasta llegar al sustrato. Esto se debe a los esfuerzos residuales a tracción aplicados en la superficie del acero.

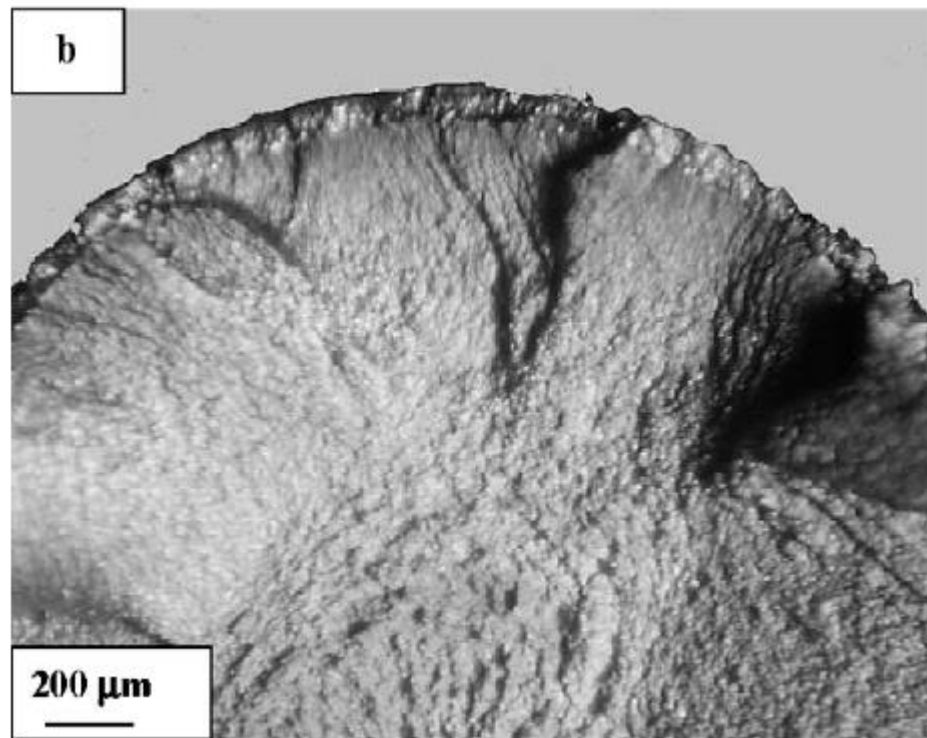


Figura 35: Grietas originadas desde el recubrimiento de cromo hasta el sustrato
(Ibrahim & Berndt, 2006)

En el presente trabajo, los esfuerzos residuales del proceso de termorociado por arco generalmente son de tensión. Por tanto, su efecto sería equivalente al del recubrimiento de cromo duro por galvanoplastia. De aquí que se explica la reducción del tiempo de vida útil a la fatiga de las muestras con recubrimiento de acero inoxidable. Para el caso de las probetas de acero inoxidable el proceso de termorociado también puede aplicarse con esfuerzos residuales a compresión en la superficie del acero, pero depende de variables como la velocidad de las partículas, temperatura.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

Al terminar con el desarrollo de la tesis se muestra que los objetivos propuestos previos al inicio del proyecto, fueron cumplidos. El desarrollo y repotenciación de la máquina consistía en mejorar el sistema eléctrico, control y mecánico.

El sistema eléctrico, que incluye el motor, sus conexiones y elementos de seguridad, fue optimizado para que tenga un funcionamiento apropiado, permitiendo ser una máquina fácil de utilizar y segura para el operador. La máquina solo necesita de un interruptor 220 V trifásico, que energiza a todos los equipos dentro del sistema.

El sistema de control mejoró significativamente con el contador digital, que recibe señales del sensor láser. Ahora se puede trabajar a la velocidad que el operador quiera realizar su ensayo de fatiga y no necesita de un computador para hacerlo. El sistema de control aprovecha el diseño de la máquina para así poder identificar cuando la probeta falla, utilizando la probeta para transmitir 12 V, cerrando el circuito con el relé. El relé tiene un costo de 10 dólares con la base, en cambio el Cubloc tiene un alto costo y su utilidad puede ser mejor aprovechada. Con este nuevo sistema utilizado, para detener la máquina cuando la probeta falla, se evita trabajar con sensores o switches que al ser instalados en lugares comprometedores de la máquina, podrían ser afectados por la vibración o golpes.

La estética de la máquina ha sido mejorada, todos los equipos, desde el motor hasta el variador de frecuencia están sostenidos por la caja y los elementos electrónicos y todos los cables están cubiertos por una puerta. La puerta permite dar mantenimiento al sistema de control y eléctrico cuando sea necesario.

La curva S-N fue obtenida satisfactoriamente. Varias detalles fueron tomados en cuenta como: el acabado superficial, alivio de tensiones, mantener una muestra representativa, etc. Herramientas de modelado con Abaqus se utilizaron para definir el verdadero esfuerzo aplicado en el régimen elástico y en el plástico. Al final se obtuvo una curva experimental muy cercana a la teórica. Para una mejor aproximación de la repetición de los ciclos hasta la rotura, es preciso hacer más ensayos ya que 5 no son suficientes, sin embargo los errores relativos obtenidos no son muy significativos en una escala logarítmica.

Se puede concluir que el recubrimiento utilizado redujo la vida útil del acero con un 70 % debido a los efectos que implica el recubrimiento. Siendo estos rugosidad, esfuerzos residuales, y posible fragilización por temple. Los esfuerzos en el substrato son mayores que los del recubrimiento debido a la diferencia de propiedades mecánicas de los 2 materiales estudiados.

La máquina de ensayos de fatiga por flexión es una importante herramienta para el análisis de las propiedades mecánicas de los materiales. Los resultados que tienen los ensayos de fatiga en procesos de manufactura, tratamientos térmicos, recubrimientos y aleaciones en los materiales tienen mucho valor. Con estos análisis se puede obtener diseños más eficientes, seguridad en la construcción y fabricación determinando si el material utilizado es apropiado para cada situación.

En el ejemplo de aplicación de recubrimientos, se sugiere a los usuarios que el uso de recubrimientos podría afectar significativamente el tiempo de vida de su

componente. Un estudio más detallado debería sugerir estrategias para prevenir este efecto que podría disminuir muy significativamente el desempeño de un componente

5.1. Recomendaciones

Como trabajo a futuro para mejorar el rendimiento de la máquina de ensayos de fatiga sería encontrar la razón de la iniciación de la grieta en el mismo lugar de la probeta.

Realizar la manufactura de probetas con corte con agua o corte con láser, porque estas a pesar del costo más elevado garantizan la simetría de la figura. Además se debería utilizar una plancha de un espesor un poco más grande para poder rectificar adecuadamente, y así asegurar que la plancha este completamente recta. De esta manera la instalación de la probeta en la máquina se vuelve mucho más fácil y garantiza la misma deflexión arriba y abajo.

Se debería empotrar la maquina fija en una mesa o en una plancha gruesa de acero para que al momento de incrementar las RPM del motor no se generen vibraciones en la máquina.

Para el caso de los recubrimientos se puede aplicar una capa mayor para luego poder rectificar dejando la superficie lisa. También se puede controlar la temperatura aplicada para evitar temple o precalentar el sistema para poner el recubrimiento en compresión.

Bibliografía

- (12 de Marzo de 2014). Obtenido de Integrated publishing:
<http://www.tpub.com/steelworker1/2.htm>
- Andrade, D. (2010). *Dimensionamiento y construcción de un horno para baño de sales para el taller de procesos de producción mecánica*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Arcano, R. (25 de Marzo de 2014). *Scribd*. Recuperado el 8 de Abril de 2013, de
<http://es.scribd.com/doc/134698664/Calidad-del-Acero-Norma-ASTM-A-36-A-36M-94>
- Badiola, V. (1 de Marzo de 2014). *Ingeniería Mecánica Aplicada y Computacional*. Obtenido de http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/ asignaturas/maquinas-iti/Apunteak/Cap4.pdf
- Beer, P. F. (2010). *Mecánica de Materiales* (5ta ed.). McGraw-Hill.
- Boyer, H. (1986). *Atlas Of Fatigue Curves*. United States: ASM International.
- Budinas , R., & Nisbett, J. (Eight Edition). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. Mc Graw Hill.
- de Vedia, L., & Svoboda, H. (12 de 12 de 2014). *Universidad de Buenos Aires*. Obtenido de <http://materias.fi.uba.ar/6716/Fatiga.pdf>
- Gere, J. (2008). *Mechanics of Materials*. United States: Cengage Learning.
- Ibrahim, A., & Berndt, C. (2006). *Fatigue and deformation of HVOF sprayed WC-CCCo coatings and hard chrome plating*. Ney York: ELSEVIER.
- Milke, J. (10 de Mayo de 2007). *9-11 Research*. Obtenido de http://911research.wtc7.net/mirrors/guardian2/wtc/WTC_apndxA.htm
- Mogollón, J. (2012). *Diseño y Construcción de una Máquina de Ensayos de Fatiga por Flexión* . Quito : Universidad San Francisco de Quito.
- Moreano, O. (2012). *Reparación de un Eje de Motor Eléctrico Mediante un Proceso de Metalización*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Nascimento, M., Souza, R., Miguel, I., Pigatin, W., & Voorwald, H. (1999). *Effects of tungsten carbide thermal spray coatings by HP/ HVOF and hard chromium electroplating on AISI 4340 high strength steel*. Brasil: ELSEVIER.

Pérez, A. (11 de Julio de 2006). *Enciclopedia Virtual de Ingeniería Mecánica*. Obtenido de Mecapedia: http://www.mecapedia.uji.es/ensayo_de_traccion.htm

Schey, J. (2001). *Procesos de Manufactura* (Tercera ed.). México: McGraw-Hill.

UPC. (12 de Marzo de 2014). *Universidad Politécnica de Cataluña*. Obtenido de <http://www.upc.edu/sct/es/equip/354/maquina-dassajos-mecanics-traccio-compressio-fatiga.html>

Zeferino, A. (2011). *El método de los elementos finitos: una introducción*. Maracaibo: Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta.

Anexo A

Technical Data
Bulletin



Praxair Surface Technologies
 1555 Main Street
 Indianapolis, IN 46224



Praxair Surface Technologies
 TAFE Incorporated
 146 Pembroke Road
 Concord, NH 03301

File:
 1.9.1.2-60T
 Issue:
 010624

Supercedes: K10320

Praxair and TAFE Arc Spray 13% Chrome Steel Wire - 60T

Material Review:

Made exclusively for arc spraying. Characteristics of the coating are its excellent wearing quality and fair resistance to corrosion. It is excellent all-purpose steel for basic machine element work.

Arc Spray 60T Chrome Steel wire can be sprayed with any Praxair and TAFE Arc Spray gun.

Arc Spray 60T Chrome Steel wire meets Department of Defense Specification MIL-W-6712C, Table I, Stainless

Steel, Chrome and Rolls Royce's MSRR 9507/103 Specification.

CAUTION: All Praxair and TAFE wires have been optimized for arc spraying. Use of alternate wires usually cause problems such as excessive tip wear, spitting and feeding problems. We only recommend Praxair and TAFE Certified wires.

Application Review:

This is by far the most widely used reclamation spray wire because of its wear resistance and low shrink. Recommended when a hard coating requiring some corrosion resistance is desired. The high chrome content provides fair high temperature oxidation resistance and provides a fair amount of corrosion protection.

In addition, the chrome steel serves as an electrical resistance coating. Successful shop applications have been resurfaced journal sections, cylinder liners, pistons, crankshaft bearings, hydraulic rams, and numerous other machine elements.

Some electrical power stations use only this steel for repair work.

Composition:	
Carbon	0.3
Phosphorus	Trace
Sulphur	Trace
Manganese	1.0
Nickel	1.0
Chromium	12/14
Silicon	0.08
Iron	Balance
Coating Physical Properties	
Wire Size	1/16" (1.6 mm)
Deposit Efficiency	78 Percent*
Melting Point	2600°F (1427°C) (approx.)
Bond Strength	4730 psi (32.6 MPa)
Coating Texture (as sprayed)	Variable** (see next page)
Finish Texture (ground)	6-15 Microinches aa **
Hardness	R _{15n} 80-82 (R _c 40-43) Converted
Coating Density	6.74 gm/cc**

Coating Weight	0.035 lbs/ft ² /mil
Shrink	0.0018 in/in (cm/cm)
Coefficient of Thermal Expansion	6.6 x 10 ⁻⁷ in/in °F (1000°F)
Spraying (inert chamber with argon):	
Spray Rate	10 lbs/hr/100 amps (4.5 kg/hr/100 amps)
Coverage (wire consumption)	0.8 oz/ft ² /0.001" (0.98 kg/m ² /100 microns)
Spray Pattern****(approximate 8" standoff)	Cross Nozzle/Positioner - 1" (2.5 cm) vertical height x 1-3/4" (4.4 cm) width Slot Nozzle/Positioner - 2" (5 cm)
Length of wire per lb	96 ft. (1/16")

* Depends on air pressure, standoff, nozzle cap and target size.

** 6" standoff, 40 psi - 8830, depends on air pressure - fine with high psi, average with medium psi, and rough with low psi.

*** For higher hardness increase air pressure to 60 psi or higher do this only in final passes where wear will occur.

**** Higher air pressures, smaller wire (1/16), and lower amperage with red nozzle cap gives smallest diameter pattern.

Spraying Procedure:

Coating Type				
	Normal	Arc Jet	Arc Jet	9000
	8830/8835	8830/8835	9000	
Atomizing Air Pressure:Primary	50 ^c	50 ^c	60 ^c	60 ^c
Secondary	---	40 ^c	60 ^c	---
Nozzle Cap	Blue	*	Green	Green
Nozzle/Positioner	Short Cross	**	Long Cross	Long Cross
Arc Load Volts ^a	29-30	29-30	30-32	30-32
Amps ^b	50-300	50-300	50-300	50-300
Standoff Inches	5-7	3-5	3-5	5-7
Coating Thickness/Pass-mils	5	5	5	5
Coating Texture-microinches aa	200-350	150-250	150-250	200-350

Using excessive voltage reduces quality of coating. Voltage should be adjusted to give minimum noise and smooth arc operation. Excessive voltage causes larger particles and poor spray pattern. Too low a voltage will cause popping.

Be sure not to overheat substrate even if this means stopping to allow cooling, use air jet cooling if greater speed is required. Note that on some applications where preheating is tolerable, preheating work to 300°F can improve bond and deposit efficiency.

NOTE: Standard air caps and positioners can be used in 8830, 8835 or 9000 systems.

- * P/N 450729 8830 Arc Jet Air cap
- ** P/N 620074 Arc Jet Modified Short Cross (8830 & 8835)
- a When using power lead extensions other than the normal 12 foot furnished, the voltage must be increased by approximately 3.4 volts per 50 foot extension; i.e. add 3.4 volts to the recommended voltage setting for a given wire if the extension is increased to a 50 foot length.
- b Can vary between 50-300 depending on size of workpiece and traverse speed.
- c For finer finish, raise air pressure at point of finish.

Use of Praxair and TAFA's 75B™ Wire as a Bond Coat:

In most applications Praxair and TAFA's 75B BondArc® wire eliminates the need for surface roughening. The following section outlines steps to be followed when using this material.

Note again that the 75B coating does not self bond on many non-ferrous materials and normal surface preparation must be used.

Clean the surface to a white virgin metal by grit blasting, grinding or polishing clean surface with emery cloth. It must be a clean white metal surface free of grease, oil and handprints.

DO NOT HANDLE AFTER THE SURFACE HAS BEEN PREPARED.

1. Use short nozzle/ positioner and blue nozzle cap.
2. Set spray pressure air at 50-60 psig (do this while air is "ON" or flowing).

3. Run at 150 amps at
30 load volts

4. Gun distance from work
3 to 4 inches.

5. Move gun over surface uniformly to give coverage over
complete surface.

6. Continue buildup with selected material using 50 psig spray pressure on console (this 50 psig is for general metallizing; for coarser coatings decrease 5 psig; for finer coatings increase 5 to 10 psig, depending on the finish required).

Finishing:

The coating is usually best finished by grinding. The user may experiment with carbide tools, which gives only a medium finish. The preferred method of i.d. work is to carbide turn leaving a 0.020" deposit for honing to finish size. If deposit is initially ground, leave 0.005 inches for honing. Grind with silicon or alumina wheel with particle size of 30-50.

Shop Experience:

Spray Parameters	
Amps:	150
Volts:	29
Atomizing Pressure:	60 psi
Nozzle Cap:	Blue
Nozzle/Positioner:	Short Cross

Spraying was done by hand.

The parts were returned to the machine shop for finishing.

Grinding Parameters:	
Machine:	Brown & Sharpe 6" x 18" surface grinder
RPM:	3600
Wheel Size & Type:	Norton 32A46-H8VBE 7" x 1/2" x 1-1/4"
Coolant:	IRMCO (International Refining & Mfg. Co.) #120 Spray Mist
Feed:	Manual
Depth of Cut:	0.0015" roughening 0.0005" finish

Results:

A 32 microinch aa finish was obtained from both wheel face and side. Spray material did not chip from base metal or show cracks from heat in grinding.

Hazards:

All chromium alloys produce hazardous fumes. While spraying, all personnel should be made aware of the need for proper respirator protection. Observe normal spraying practices, and proper air flow patterns. For general spray practices, see AWS Publication AWS C2.1-73, "Recommended Safe Practices for Thermal Spraying" and AWS TSS-85, "Thermal Spraying, Practice, Theory and Application". Thermal spraying is a completely safe process when performed in accordance with proper safety measures. Become familiar with local safety regulations before starting spray operations. DO NOT operate your spraying equipment or use the spray material supplied before you have thoroughly read the Praxair and TAFE Instruction Manual.

A Material Safety Data Sheet will be sent with each initial purchase and updated as required. DISREGARDING THESE INSTRUCTIONS MAY BE DANGEROUS TO YOUR HEALTH.

The Information provided herein is believed to be accurate and reliable; however, results may vary with workpiece preparation and operator technique. Praxair and TAFE warrants only that the wires are free of defects in material and workmanship. No other warranty is expressed or implied.

Anexo B

