



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Rediseño de plato de
calibración para equipo de
celdas ultrasónicas.**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Mauricio Alejandro Morfin Morales

ASESOR DE INFORME

M.C. Francisco Sánchez Pérez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

Agradecimientos

Quiero agradecer muy especialmente a mi madre quien siempre ha sido mi pilar principal y su ejemplo una gran motivación para mí, para lograr siempre mis objetivos y he ir siempre más allá.

Agradezco a mi asesor M.C. Francisco Sánchez por el interés y el apoyo en asesorarme en mi proceso de titulación y ser parte del mismo.

A los ingenieros del Equipo de Sujeciones (*Fasteners Team*) por darme la oportunidad de haber formado parte de su equipo y laborar en una empresa automotriz como lo es FCA. Siempre brindándome apoyo y capacitándome para crecer como profesionista.

Un agradecimiento para el ingeniero M.C. Marco Romero quien de igual manera que mis compañeros de Fasteners trabajó conmigo en este proyecto, asesorándome basado en su amplia experiencia y conocimientos en el Área de Materiales.

Por último, gracias a la UNAM, por hacer posible mi formación como ingeniero y a mis amigos que siempre están presentes.

Índice

Capítulo 1	
1.1 Introducción	4
1.2 Objetivo.....	4
1.3 <i>Fiat Chrysler Automobiles (FCA)</i> , Misión y Valores de la Empresa	5
1.4 El Área de Sujeciones (<i>Fasteners Area</i>)	5
1.5 Organigrama del Área de Sujeciones México (<i>Fasteners Mexico</i>)	6
1.6 Equipo de celdas ultrasónicas	7
Capítulo 2	
2.1 Descripción de las actividades realizadas.....	13
2.2 Descripción de la problemática existente	15
Capítulo 3	
3.1 Antecedentes del Diseño	17
3.2 Metodología planteada.....	18
3.3 Rediseño de plato para pruebas en equipo de ultrasonido.....	18
3.4 Montaje, Análisis y evaluación del plato	28
Capítulo 4	
4.1 Resultados.....	29
4.2 Conclusiones.....	32
Referencias y anexos	34

Capítulo 1

1.1 Introducción.

El proyecto que a continuación se describe fue desarrollado en la empresa automotriz FCA de México S.A de C.V, en el departamento de Ingeniería- México, para el área de Materials Engineering - Fasteners, ante las fallas existentes en uno de los accesorios del equipo de celdas ultrasónicas cuya función es la realización de pruebas mecánicas en el Laboratorio de Sujeciones (*Fasteners Laboratory*) a diversos componentes utilizados en FCA de México.

Dichas pruebas mecánicas son realizadas para obtener el valor de la fuerza de sujeción en una unión. En ocasiones estas pruebas sirven simplemente para verificar el diseño de una unión y otras veces son realizadas para desarrollar estrategias de apriete. En el Laboratorio de Sujeciones se realizan otras pruebas mecánicas a tornillos y tuercas como lo son las pruebas de Torque a Falla, Torque Dinámico y Torque Residual.

En el presente reporte se pretende describir como se logró la mejora de uno de los accesorios del equipo utilizado para medir la fuerza de sujeción. Este reporte organizado a modo de capítulos, habla del funcionamiento del equipo de celdas ultrasónicas, la importancia que tiene para el laboratorio y como es que se presentó la falla. A si mismo se describen algunas posibles causas y la solución que se implementó para resolver dicha problemática.

También se describe el procedimiento seguido para el rediseño del accesorio, haciendo una descripción con mayor detalle en la parte del desarrollo de la solución que fue implementada. Se presentan algunas evidencias de las simulaciones realizadas en NX y la solución teórica del problema sin entrar a detalle en los cálculos.

Finalmente se hablará de los resultados obtenidos del proyecto, los cuales son fundamentados con una prueba realizada en el Laboratorio de Fasteners bajo las mismas condiciones en las que se presentó la ruptura en aquella ocasión.

1.2 Objetivo.

El objetivo es rediseñar e implementar un plato de acero para reemplazo de uno de los platos originales perteneciente al equipo de celdas ultrasónicas, el cual se fracturó de forma intempestiva durante la realización de una prueba en el Laboratorio de Sujeciones de FCA México S.A. de C.V.

El equipo de celdas ultrasónicas tiene como propósito la medición de la fuerza de sujeción en una unión para diferentes medidas de tornillos. Es importante para el área de Fasteners contar con los equipos del laboratorio completos y en óptimas condiciones para poder realizar las pruebas correspondientes cuando sean solicitadas, ya sea que se presente un problema en la producción

o se requiera de la verificación de los valores de la fuerza de unión para poder asegurar la calidad de sus automóviles.

1.3 Fiat Chrysler Automobiles (FCA), Misión y Valores de la empresa.

FCA México inició operaciones en 1938, actualmente su Edificio Corporativo y Centro de Ingeniería Automotriz se ubican en Santa Fe, al poniente de la Ciudad de México. Cuenta con una Red de Distribuidores de las siguientes marcas: Alfa Romeo, Chrysler, Dodge, Fiat, Jeep, Mitsubishi y RAM.

El Grupo diseña, fabrica y comercializa vehículos, piezas y servicios relacionados en todo el mundo. FCA está continuamente innovando para traer soluciones de movilidad de clientes para el futuro. Soluciones que ofrecen seguridad, comodidad, flexibilidad, conectividad y el mejor desempeño de su clase.

La filosofía empresarial de FCA se basa en varios principios claros:

- Ejercer liderazgo.
- Recompensar el mérito.
- Apreciar la competencia.
- Tener el mejor desempeño de su clase.
- Cumplir con las promesas.

1.4 El Área de Sujeciones (*Fasteners Area*).

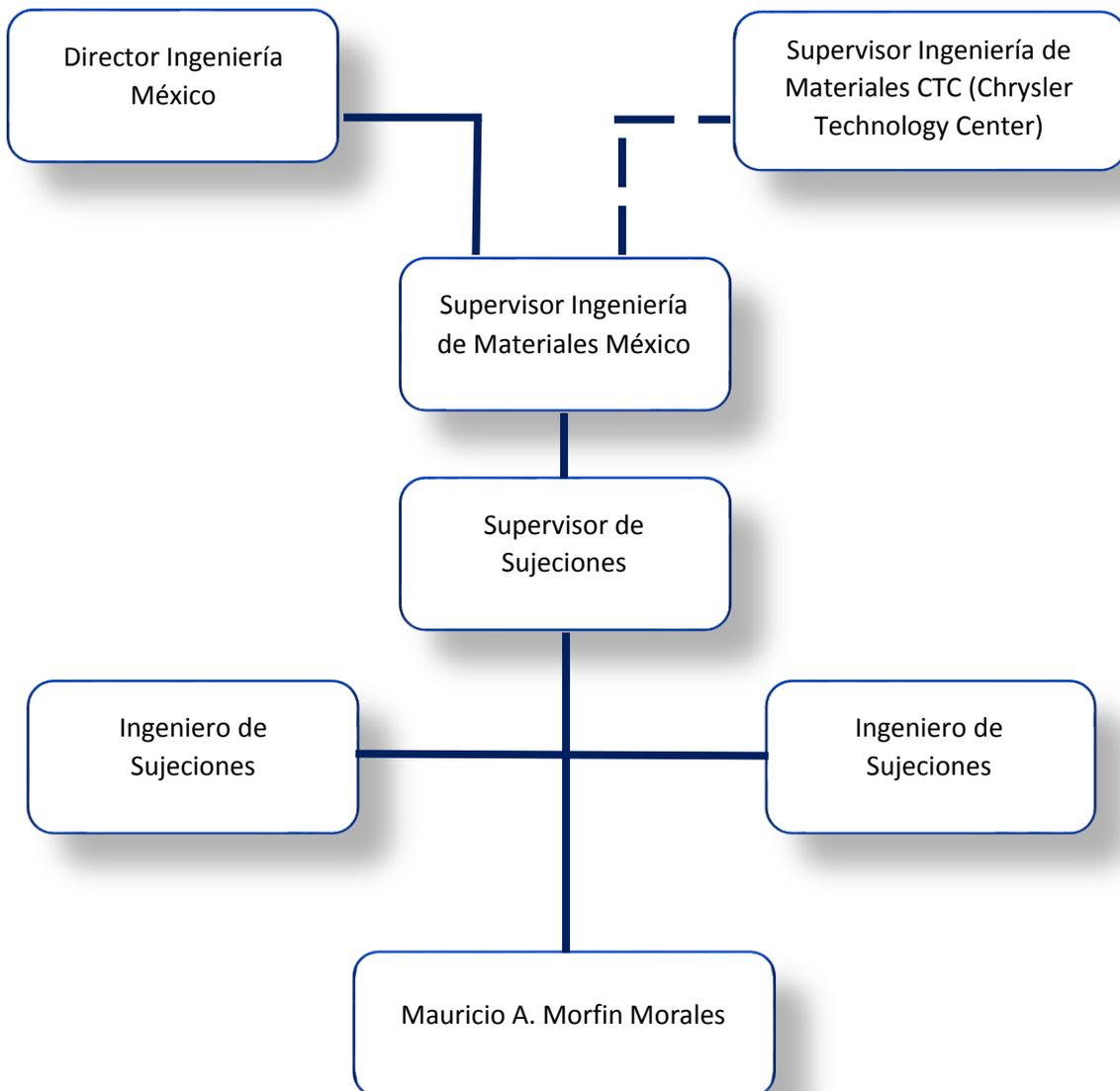
Fasteners- cuya traducción literal en español es “sujetadores”- es un área de Ingeniería de FCA México que se dedica a asegurar la calidad de las uniones de componentes automotrices, a través del desarrollo de pruebas de torque y revisión de las condiciones mecánicas de las uniones.



Figura 1.1. Ejemplos de Sujetadores.

También esta área es dedicada a proporcionar asesorías al momento de la selección o cambio de algún “fastener” (tornillo, tuerca, arandela, pin, remache, etc.), o bien en el cambio de algún valor de torque para una unión en el vehículo. Estos cambios de tornillería en ocasiones pueden representar un riesgo o en todo caso un ahorro para la compañía, es por esto que se tiene un área especializada para analizar dichos casos.

1.5 Organigrama del Área de Sujeciones México (*Fasteners Mexico*).



1.6 Equipo de celdas ultrasónicas.

Durante el diseño de un automóvil, es necesario que las partes que conforman un subsistema del auto (sistema de frenos, sistema de tren motriz, sistema eléctrico, etc.) sean fácilmente desmontables. Estos subsistemas a su vez, deben tener la facilidad de ser desensamblados con la finalidad de facilitar las operaciones de mantenimiento y remplazo de piezas. Siempre que se requiera dotar de esta facilidad a un sistema o pieza automotriz, la opción viable es utilizar uniones atornilladas.

El propósito de un tornillo es sujetar dos o más partes. La carga de sujeción estira o alarga el tornillo; la carga se obtiene haciendo girar la tuerca hasta que el tornillo se alargue casi hasta su límite elástico. En ocasiones se puede aplicar el torque sobre la misma cabeza de el tornillo, pero esto dependerá del tipo de sujetadores que se están utilizando. Si la tuerca no se afloja, la tensión en el tornillo permanece como la precarga o fuerza de sujeción.

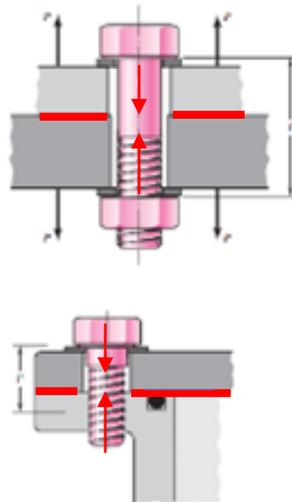


Figura 1.2 Precarga en una unión, generada por el tornillo.

Los tornillos son muy utilizados en la industria automotriz por lo que siempre existe algún tipo de monitoreo al momento de realizar los ensambles, e incluso después de haberlos realizado, para poder asegurar la calidad del producto y la seguridad de los usuarios.

Cuando hablamos de la fuerza de sujeción es de suma importancia asegurarnos que esta tendrá un valor adecuado según los requerimientos de la unión. Se puede pensar que entre más torque se le aplique al tornillo mayor será la fuerza de sujeción de éste, pero es una idea errónea, el torque aplicado se pierde principalmente en la fricción generada en las superficies debajo de la cabeza del tornillo y en las cuerdas.

La fuerza de sujeción es medida esencialmente por las llamadas celdas de carga. Estas celdas de carga en general son transductores de alta precisión que proporcionan un valor de fuerza bajo una amplia gama de condiciones. La celda de carga es un elemento que se encarga de traducir la fuerza en una señal de voltaje o en un valor digital.

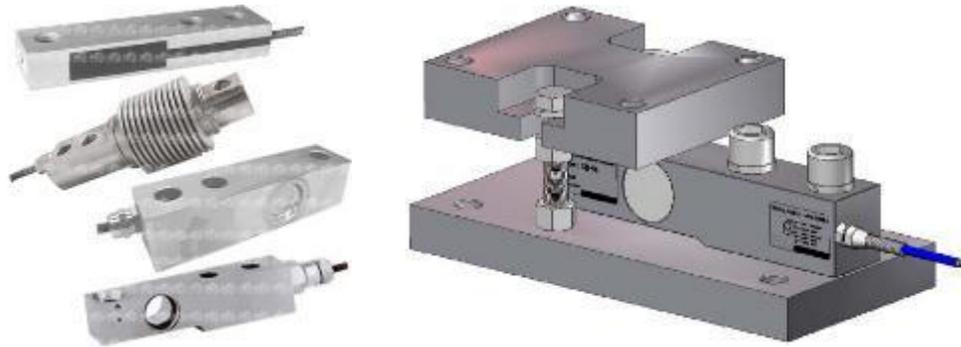


Figura 1.3 Ejemplos de celdas de carga.

El equipo de celdas ultrasónicas con el que cuenta el Laboratorio de Sujeciones (MC900) es un instrumento para medir torque, ángulo, fuerza y desplazamiento lineal de la empresa *Micro Control*.

Este equipo por lo general se utiliza cuando se requiere hacer la medición de la fuerza de sujeción en una unión donde el tornillo debe estar ya en el ensamble en la línea de producción o bien si se encuentran los componentes en el laboratorio y el tornillo es muy corto como para poder utilizar el método de celdas de carga.

El método por celdas de carga es básicamente colocar la celda, la cual tiene forma de roldana, como si esta fuera parte de la unión. Se hace pasar el tornillo por la celda y se ensamblan las piezas dando el torque especificado con lo cual generamos que la cabeza del tornillo ejerza presión sobre esta celda de carga.

La celda, debido a su funcionamiento como un sensor piezoeléctrico, nos genera con ayuda del controlador al que se encuentra conectada un valor correspondiente a la fuerza de sujeción que presenta la unión. Este es el método más utilizado en el laboratorio como ya antes se mencionó, siempre y cuando la longitud del tornillo lo permita.

En ocasiones la longitud del tornillo se vuelve una limitante para poder realizar la prueba de fuerza de sujeción con el método de las celdas de carga. Debido que el espesor de la celda es de $\frac{1}{2}$ " y sumado a que el tornillo deberá también sujetar las demás partes propias del ensamble, es complicado que las alcance a sujetar adecuadamente o pudiera suceder que incluso no alcance ni si quiera a unir las. Es entonces cuando se utiliza este método de celdas ultrasónicas que será descrito con mayor detalle en los siguientes párrafos.

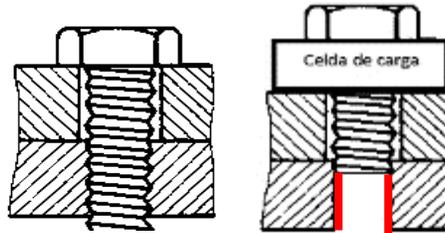


Figura 1.4 Ejemplo de cómo el espesor de la celda de carga evita que el tornillo tenga una buena sujeción en un ensamblaje.

El equipo de celdas ultrasónicas puede ser utilizado tanto en el laboratorio como de manera portátil. Pero para poder utilizarlo en campo como en el laboratorio se requiere obtener una curva patrón propia para cada unión.

Esta curva patrón, llamada también “huella”, es obtenida con ayuda de los diferentes accesorios con los que cuenta el equipo. A continuación, mencionaré a grandes rasgos los elementos con los que cuenta el equipo para poder tener una mejor comprensión de cómo funciona.

El equipo consta de un controlador, que será el encargado de emitir las señales y obtener los resultados para mostrarlos en la computadora.



Figura 1.5. Controlador del MC900.

Por otra parte, se cuenta con transductores que se conectan al controlador para conocer el valor del torque aplicado en la simulación física de la unión.



Figura 1.6. Celdas de carga del equipo MC900.

Consta también de tres celdas de carga de diferentes capacidades, que dependiendo la fuerza de unión esperada es la que se utiliza, junto con una serie de platos de acero de diferentes medidas para utilizar tornillos de diferentes medidas que abarcan desde M6 hasta M20.

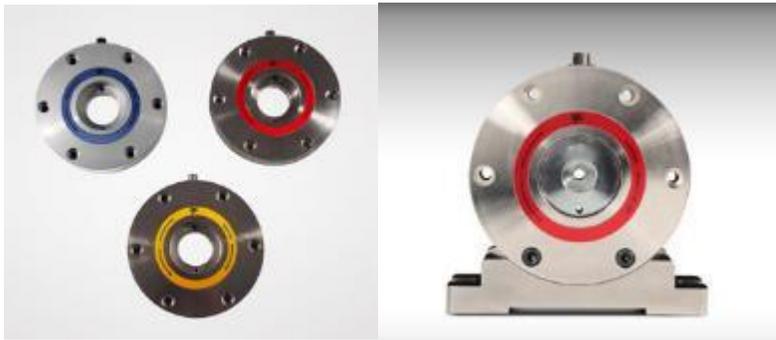


Figura 1.7. Celdas de carga del equipo MC900.



Figura 1.8. Ejemplo de un plato de calibración utilizado en las celdas de carga del equipo MC900.

Un componente más, que conforma el equipo de las celdas ultrasónicas, es la estación portátil. Esta estación contiene un controlador como el del Laboratorio de Sujeciones, pero este se utiliza para hacer las mediciones de la fuerza de sujeción a diferencia del controlador utilizado en el laboratorio que se usa para obtener las curvas patrón.



Figura 1.9. Equipo portátil del MC900.

El equipo de celdas ultrasónicas funciona un poco diferente a las celdas de carga comunes. Básicamente con el equipo portátil es con el que se hacen las mediciones en base a emitir y recibir una señal en la cabeza del tornillo la cual es comparada con la curva patrón (huella) propia del tornillo que se encuentra en la unión y nos arroja un valor determinado de fuerza sujeción.

Esta huella se obtiene simulando la unión a medir haciendo uso de la celda de carga correspondiente a la capacidad que se requiere, así como el plato de calibración de la medida adecuada para el tornillo y aplicando el valor de torque lleva la unión.

Para una mejor comprensión del funcionamiento del equipo haremos uso de la siguiente figura.

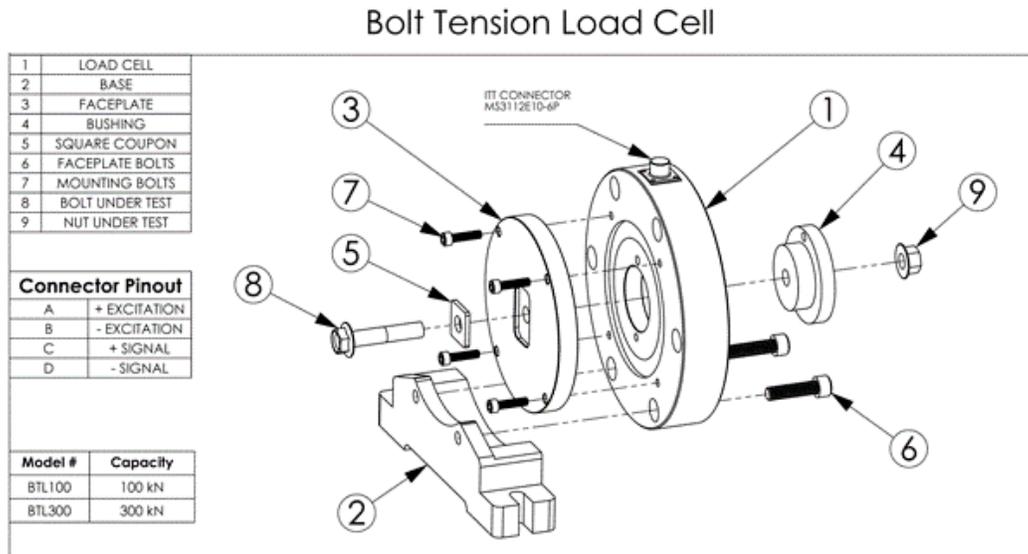


Figura 1.10. Ensamble de la celda de carga del equipo MC900

El tornillo objeto de estudio está marcado por el número 8, es importante mencionar que los tornillos que se utilizan tanto para la obtención de la huella, como para las pruebas, deben de ser especialmente preparados.

La preparación consiste en rectificar los tornillos tanto de la parte superior de la cabeza como de la parte inferior del cuerpo del tornillo y además pegarles un sensor en la cabeza.



Figura 1.11. Ejemplo de un tornillo preparado para la prueba.

El tornillo se coloca en el equipo entre las piezas 3, 1, 4 (de la figura 1.11.), la cuales serían la simulación de la unión. Después de que el tornillo es apretado con el torque correspondiente se le conecta el controlador en el sensor ubicado en la cabeza, con el fin de que este emita la señal para caracterizar la tensión en el tronillo. De la misma forma también se detecta un valor de voltaje en la celda de carga y es así como el equipo obtiene la huella.

Una vez obtenida esta huella ya es posible hacer las mediciones en las uniones solicitadas con el equipo portátil ya sea que los componentes se encuentren en el mismo laboratorio o que se requiera acudir a alguna de las plantas de ensamble. Estas uniones deben haber sido ensambladas con los tornillos igualmente preparados y ya con el sensor colocado en la cabeza. Entonces solo basta con conectar el cable del equipo portátil en la cabeza del tornillo y el software hará una comparación de la curva que obtenga en ese momento contra la huella obtenida en el laboratorio. Es así como se obtiene el resultado.

Capítulo 2

2.1 Descripción de las actividades realizadas.

Básicamente las actividades del ingeniero de Sujeciones son enfocadas al desarrollo y revisión de valores de torque para las uniones nuevas o bien de uniones ya existentes, pero que tuvieron alguna modificación o se requiere comprobar que los valores para el apriete y fuerza de sujeción son correctos.

En primer lugar, se realizan revisiones para ver que el “fastener” cumpla con las características requeridas en la unión. Entiéndase por fastener todo tipo de sujetador como tornillo, tuerca, arandela, remache, perno, grapas, etc.; por poner un ejemplo para un tornillo se debe revisar que cumpla con el paso de la cuerda, la longitud, la resistencia a la corrosión, tipo de cabeza, etc.

Seguido de esto las actividades se enfocan a determinar de manera experimental el valor de torque óptimo, valor que será utilizado en la planta de ensamble para la unión. Para poder llegar a esto se realizan pruebas de Torque a Falla, Torque Dinámico y finalmente Torque Residual.

La prueba de Torque a Falla es para comprobar la máxima resistencia del tornillo y de esta manera poder asegurar que se tendrá un torque adecuado que permita al tornillo trabajar en la zona elástica de su curva esfuerzo deformación. Esta es la primera prueba que se realiza para obtener el valor de la fuerza que se aplicará en el tornillo y servirá como la base para programar el valor que aplicará el controlador en la siguiente prueba de Torque Dinámico.

El torque dinámico es ya el valor con el cual se apretará la unión, ya que se obtuvo de un valor referente al esfuerzo de cedencia del tornillo (con ayuda de la prueba de torque a falla) y este se calculó ya con un margen de seguridad para no estar trabajando en el límite de la zona elástica del tornillo. En esta etapa ya se programa la herramienta eléctrica para que entregue el torque ya sea de manera continua o con alguna estrategia que se quiera, a diferencia del torque a falla donde simplemente se deja programada la herramienta al valor máximo y se detiene cuando el tornillo falla.

Después de la prueba de Torque Dinámico la unión ya fue apretada y con la prueba de Torque Residual se pretende comprobar que el valor de torque se mantiene ya que en ocasiones puede disminuir un poco. Esta prueba consiste en medir con un torquímetro el valor de torque aplicando fuerza en el sentido de apriete y en cuanto el tornillo comienza a girar se deja de aplicar dicha fuerza.

Tuve participación activa en varias de las pruebas realizadas en el laboratorio, estas pruebas se realizaban para las distintas áreas del departamento de Ingeniería-México. Por mencionar algunos ejemplos, se realizaron pruebas con las áreas de Chasis, Interiores, Exteriores, etc.

En muchas de las pruebas se buscaba alguna explicación teórica a cuerdas que se estropeaban durante su ensamble en planta, comprobación en el valor de torque óptimo para la unión, desarrollo de valor óptimo de apriete, entre otras.

Otra de las pruebas más comunes es comprobar el valor de fuerza de sujeción en pro de asegurar la calidad de la unión, asegurar que el diseño es correcto, etc., se realizarán las pruebas para conocer la fuerza de sujeción, por alguno de los métodos celdas de carga o celdas ultrasónicas según sea el caso.

Durante una de las pruebas realizadas para conocer la fuerza de sujeción de un tornillo, uno de los platos de calibración con los que contaba el equipo de celdas ultrasónicas se fracturó al intentar obtener la huella en el laboratorio. Después se intentó obtener la huella con un plato que había sido fabricado anteriormente por los ingenieros del laboratorio, cuando en alguna ocasión requerían una prueba para un birlo y necesitaban un barreno cónico en el centro del plato para poder hacer la prueba, pero también se fracturó en el intento de la obtención de la huella. Entonces me fue asignado un proyecto para resolver esa problemática. El proyecto consistió en el rediseño del plato de calibración.

Este proyecto se llevó a cabo de la manera a continuación descrita y va desde ideas sobre las posibles causas hasta la implementación de una solución en base a las necesidades requeridas.

En el desarrollo de este proyecto utilicé muchos de los conocimientos adquiridos durante mi formación como ingeniero en la facultad.

Cabe aclarar que, aunque tuve a cargo la dirección y ejecución del proyecto, siempre se contó con el apoyo de otras áreas para la ejecución de algunos pasos. Tal es el caso de la manufactura, de los análisis químicos y mediciones de dureza. Dentro de la misma empresa se designan las tareas por departamento a manera de tener una mejor distribución del trabajo, con gente especializada en su área.

La manufactura del plato fue realizada en el Taller de Máquinas. De la misma forma en conjunto con el Área de Materiales fueron realizadas pruebas como determinar la composición química del acero que había sido comprado para asegurar que contara con la composición química adecuada para el fin que se tenía planeado; la obtención de la dureza y el planteamiento de que tratamiento térmico era el adecuado y estaba en nuestras posibilidades, ya fuera que se hiciera en alguno de los laboratorios de FCA o bien con alguno de los proveedores.

Prácticamente me encontré presente en todas las pruebas que se realizaban, con la finalidad de aclarar cualquier duda que surgiera sobre la finalidad de la prueba o en todo caso ser observador de la misma, de esta manera obtener conclusiones adicionales a los resultados de la prueba como tal y utilizar esta información para consideraciones futuras en el proyecto.

Otros de los pasos que en los siguientes capítulos son descritos, fueron ejecutados por mí. En el caso de la simulación, los cálculos, las suposiciones teóricas de falla y pruebas finales realizadas al plato montado, etc. Fueron actividades en las que debía ser mi responsabilidad directa la planeación y la ejecución.

Gran parte del tiempo de este proyecto no lo invertí de manera directa en él, pues considero que gran parte del tiempo invertido va fuertemente ligado con el aprendizaje que tuve sobre la operación y programación de los equipos del Laboratorio. El aprendizaje del manejo de estándares y softwares utilizados en la compañía, así como el comprender los diferentes comportamientos de las uniones dependiendo los materiales, la velocidad de apriete y hasta del tipo de fastener.

2.2 Descripción de la problemática existente

La problemática se presentó cuando se realizaba una prueba para corroborar la fuerza de sujeción de una unión.

Este ensamble era de suma importancia, por lo tanto, en la planta de FCA donde se realiza esta operación, querían asegurarse que se tuviera el valor esperado en la fuerza de sujeción y solicitaron la prueba al Laboratorio de Sujeciones.

La prueba sería llevada a cabo con un tornillo de la medida M16, que es el tornillo que utiliza la unión; este tornillo es de una de las medidas más grandes utilizadas en la industria automotriz para el caso de los autos. De igual forma estos son de los tornillos con mayor resistencia mecánica. Por poner un ejemplo basado en una clasificación de normas ISO (*International Standard Organization*) los grados de resistencia de los tornillos son clasificados como 5.8, 8.8, y 10.9. El tornillo en cuestión es de clase 10.9 que significa que soporta una fuerza de tensión de 900 MPa.

Como he mencionado anteriormente, para poder realizar la medición en la planta de ensamble es necesario obtener la huella en el laboratorio y fue durante este proceso donde uno de los elementos que necesitaba el equipo de celdas ultrasónicas se fracturó.

El llamado plato de calibración es la pieza en cuestión de la que hablamos que se fracturó durante la prueba. Prácticamente su función es la de soportar la fuerza de sujeción que generará el torque aplicado al tornillo y a su vez este permitirá transmitirla a la celda de carga para que se pueda obtener un valor de la fuerza.

El evento ocurrió cuando se estaba aplicando el torque al tornillo con el cuál se estaba haciendo la simulación de la junta. Justo cuando el torque estaba por llegar al valor esperado de 240 N el plato se fractura. Por consecuencia no fue posible obtener una curva característica para el tornillo.



Figura 2.1. Plato de calibración original fracturado.

En alguna ocasión los ingenieros del Laboratorio de Sujeciones habían mandado a manufacturar otro plato de la medida M16 para hacer una prueba con un tornillo cónico y aunque pudo ser adaptado para utilizarse en esta prueba, también se fracturó.



Figura 2.2. Platos de calibración fracturados.

De aquí surge la necesidad de solucionar este inconveniente, pues el no tener el plato imposibilita el realizar la prueba. En esta ocasión se solicitó ayuda al Área de Sujeciones de CTC (*Chrysler Technology Center*), como ayuda provisional, para poder hacer la prueba.

Se debe contar con el equipo listo y en óptimas condiciones para poder realizar pruebas y dar soporte a las plantas que lo necesiten en México. Para ello es necesario reponer este plato de esta medida para el equipo de las celdas ultrasónicas, ya que, aunque esta prueba no se realiza con frecuencia, debido a la medida del tornillo casi siempre estas uniones son de seguridad y en caso de tener alguna duda o necesitar corroborar información sobre algún valor de torque o fuerza de sujeción se debe dar soporte cuanto antes.

Como solución se llega a la implementación de un rediseño para el plato, de la cual se hablará en los siguientes capítulos.

Capítulo 3

3.1 Antecedentes del Diseño

Cuando hablamos de diseño podemos decir que es un concepto bastante amplio, pero principalmente consiste en llevar una idea de manera metódica a la implementación física de la misma o de su documentación conceptual para en un futuro sea utilizada, pudiendo ser implementada o irla mejorando, incluso llegar a materializarla. Teniendo como finalidad solucionar un problema, mejorar algún producto, prototipo, proceso, idea existente o bien de manera innovadora para crear algo nuevo.

El libro de Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley dice: “Diseñar es formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema. Si el plan resulta en la creación de algo físicamente real, entonces el producto debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que pueda fabricarse y comercializarse. El diseño es un proceso innovador y altamente iterativo. También es un proceso de toma de decisiones.”

Como sabemos existen muchos caminos para resolver un problema, en la industria son utilizados algunos métodos ya desarrollados para resolver problemas. Estos métodos pueden ser considerados como métodos de diseño, pues como se menciona en el párrafo anterior el diseño tiene esa finalidad de resolver un problema o una necesidad.

Por mencionar de manera breve algunos ejemplos de las metodologías utilizadas para resolver problemas como TRIZ (Teoría para Resolver Problemas de Inventiva), DFSS (Design for six sigma, Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Verificar). En general estas metodologías buscan de manera organizada y científica en base a hechos, innovar o mejorar un producto o un proceso.

En lo personal creo que no existe un método de diseño, pues las maneras de pensar son muy variadas de persona a persona para resolver un problema, solamente identifico que algunos de los pasos son comunes como el plantear las necesidades o el problema, soluciones y la implementación de la solución. Muy de la mano tenemos el término utilizado de rediseño, el cual por el prefijo de la palabra sabemos que hace referencia a volver a diseñar, como en este caso que ya se tenía un diseño previo. Al tener modificaciones en la geometría como el espesor y un cambio en las propiedades del material podemos considerarlo como un rediseño, no se está partiendo de cero. En este caso se tiene tanto un problema como un diseño que es posible mejorarlo o adaptarlo a nuestras necesidades haciendo modificaciones.

3.2 Metodología planteada

Para este proyecto se propone una metodología, tomando como base los pasos que se consideraron como principales de los métodos para resolver problemas y aplicándolos al diseño original que ya se tenía. Es bastante intuitiva la manera que se hace el planteamiento; simplemente se identifica lo que se necesita para resolverlo sabiendo que lo causa para poder solucionarlo.

Una vez identificado lo que se requiere lograr y que ocasionaba el problema, se plantea una serie de soluciones y se elige la que es más favorable dependiendo de los recursos. Con todo lo anterior llegamos a las especificaciones, pues ya serán características con las que cumplirá el proyecto y que van acorde a las necesidades.

Finalmente se da paso al desarrollo del proyecto ya con todo el conocimiento adquirido durante las etapas anteriores. Los resultados y análisis de los mismos son considerados en la parte del desarrollo.



Diagrama 3.1. Flujo del desarrollo para el rediseño

3.3 Rediseño de plato para pruebas en equipo de ultrasonido.

Con base en la experiencia adquirida en el Área Sujeciones, familiarización con los estándares y equipos del laboratorio; se toma como base los accesorios existentes para el equipo de las celdas ultrasónicas y se llega al rediseño implementado. Estructurando el proyecto, siguiendo la metodología anteriormente planteada, a manera que el equipo llegue a tener el funcionamiento óptimo esperado.

Necesidades:

Se requiere reemplazar este plato de acero por uno que sea más resistente que el de proveedor para que se pueda llevar a cabo las pruebas cubriendo todo el rango de torques definidos en el estándar de la compañía para esa medida de tornillos.

El costo de este plato deberá ser de bajo costo ya que el que viene de proveedor tiene un costo aproximado de \$18,000.

Posibles causas:

Dentro de las posibles causas es difícil pensar que el diseño de estos platos no está considerado para los rangos de fuerza de un tornillo M16, aunque desconocemos bajo qué parámetros fueron diseñados los platos y bajo qué condiciones se probaron. Por tanto, el diseño del plato no es el óptimo para nuestra aplicación y se debe modificar la geometría, el material o ambas. Este equipo tiene 8 años en el laboratorio, tiempo en el cual podría darse el caso de que el material se halla deteriorado.

Una idea más que se tenía es que en el diseño de la celda de carga se presenta un espacio que funciona como concentrador de esfuerzo, se puede apreciar en la siguiente figura, que existe un pequeño escalón y que de no existir podría ser que el plato resista la prueba sin fracturarse.

Posteriormente se consultó a proveedor para saber si este espacio podía ser cubierto para evitar así una concentración de esfuerzos, pero mencionó que este espacio era necesario para que el equipo trabaje de manera óptima.



Figura 3.2. En la imagen se ilustra el escalón de 2.2mm que tiene la celda de carga y cómo afecta al plato.

Otro factor que se sabe que influye bastante en los materiales cuando estos son sometidos a esfuerzos en general, es la dureza del mismo. Es posible pensar que la dureza elevada es factor para ocasionar la fractura del plato.

Soluciones:

Las soluciones que se presentaron cuando se fracturó el plato iban desde lo más sencillo como comprar otro plato directo de proveedor, hasta el rediseño de uno nuevo.

Se debe tener en cuenta que la opción de comprar un nuevo plato de proveedor implica un alto costo y el riesgo de fracturar el plato nuevamente.

Otra manera de resolver el problema es utilizando otro equipo en vez de las celdas ultrasónicas, ya que existe otra forma de obtener la huella y es con una máquina de tensión. Esto conllevaría a la adquisición de la máquina para el laboratorio y espacio disponible para su instalación. Desconozco el método para la obtención del valor de la huella con la máquina de tensión, pero sé que en los laboratorios de la compañía que se encuentran en EUA es la forma en la que lo hacen.

Finalmente me fue asignado un proyecto para realizar el rediseño y manufactura de un nuevo plato que cumpliera con nuestras necesidades y fuera de menor costo. Esta sería la opción más viable. A demás en caso de contar con algún otro plato fracturado, ya se tendría conocimiento de este caso y alguna futura reparación o mejora de bajo costo podría ser propuesta.

Especificaciones:

De las necesidades es como se llegó a las especificaciones de tal forma que se cubrieran las mismas. A continuación, se describen de manera breve las especificaciones y su motivo de considerarse como tal.

- Utilizar acero herramental, Acero O1.

Este acero fue seleccionado principalmente porque ya se tenía algo de conocimiento y manejo del mismo en el laboratorio. Ya había sido utilizado previamente para hacer algunos accesorios faltantes para el equipo.

Seguramente la pregunta latente es del saber porque no se seleccionó otro acero. La respuesta es simple, en base a las características que presenta este acero al ser clasificado como un acero de tipo herramental se sabe que sus propiedades son elevada dureza, resistencia mecánica, resistencia al desgaste, buena templabilidad, además de tener buena reacción ante los tratamientos térmicos pues no se fractura y tampoco existen cambios significativos en su geometría.

- Dureza HRC35.

Se busca disminuir la dureza original de 55 HRC para poder reducir la fragilidad del material y poder obtener una mejor respuesta del plato a la absorción de energía sin presentar deformación o fractura.

- Plato con el barreno de 16mm.

La medida de plato que se rediseñará es para los tornillos de medida M16.

- Espesor mayor a 1/2 inch.

Partimos de esta medida de espesor, pues los platos fracturados son de $\frac{1}{2}$ " y por tanto se pretende tener aporte de material con la finalidad de que resista la fuerza que se le exige en la prueba.

Desarrollo:

Teniendo claro el objetivo de rediseñar el plato con mejores propiedades de acuerdo a nuestras necesidades comenzamos con el desarrollo del proyecto.

Para determinar las fallas de la ruptura consideramos que el espesor del plato no era el adecuado, el esfuerzo al que era sometido era del orden de los 130 N para la primera etapa y para la segunda etapa se debía monitorear el ángulo de giro que era de 90° , lo cual elevaba el torque a un total de 240N. Proporcionalmente aumenta el valor de la fuerza de sujeción, por lo que la cantidad de fuerza que debía soportar el plato era demasiada, si lo vemos en los estándares la fuerza correspondiente a ese torque para un tornillo como el que estaba siendo utilizado es de 111,053N.

Se realizaron las pruebas para conocer la dureza que se tenía en el plato original del equipo que fue de 56HRC y de igual manera para conocer la dureza del plato que había sido manufacturado previamente cuyo valor de dureza 55HRC es coincidente con el original. Estos valores se obtuvieron para tener una idea de qué se podría mejorar en cuanto al material del plato y también hacer una simulación con las propiedades correspondientes al acero.

En este caso las propiedades utilizadas para el análisis FEM de la fractura fueron las del acero O1, ya que el plato que alguna vez se mandó a maquinar era de este tipo de acero. Durante el tiempo que lleva el laboratorio se han tenido que hacer algunos accesorios para complementar el equipo de las celdas ultrasónicas y poder realizar las pruebas con tornillos de distintos pasos a los que contemplan los accesorios del equipo.

Este es un acero herramental que me parece tiene buenas propiedades de templabilidad y que podía llegar a la dureza requerida sin problema alguno, claro que la idea es disminuir un poco la dureza para que de esta manera podamos tener un poco más de resiliencia y que el acero pueda resistir a la prueba. Además de que este tipo de acero generalmente no presenta fracturas al momento de hacerle algún tratamiento térmico y las propiedades mecánicas eran acorde con las necesidades.

Realmente no me enfoque en hacer un análisis para el plato roto original del equipo, pues pensé que, aunque sería un punto de referencia, estaba seguro que, haciendo este mismo plato, pero con el acero O1, modificando la geometría y el tratamiento térmico, se podría alcanzar los resultados esperados.

Se realizó el modelo 3D del plato en el software de NX, para posteriormente hacer un análisis de elemento finito y el 2D para obtener un plano que pudiera ser enviado en un futuro al Taller de Máquinas para su manufactura.

Cabe citar que para hacer el análisis de elemento finito se consideraron todos aquellos parámetros que establece el standard de FCA para tornillería "P.S. 20006". Este standard hace referencia a los valores y estrategias de apriete para las uniones ensambladas en FCA o por sus proveedores.

Para el caso de interés, de los tornillos de medida M16, se tomó en cuenta todo el rango de valores para dicha medida. Con esto se asegura que se podrán satisfacer futuras pruebas.

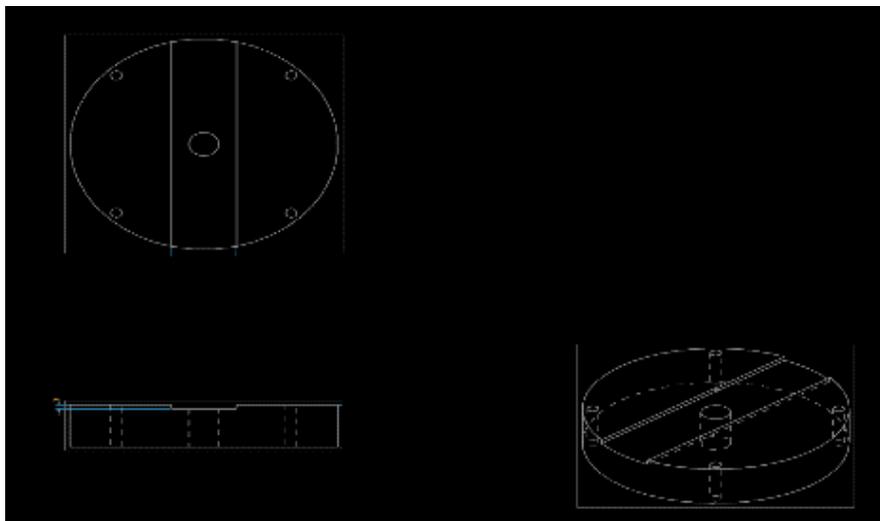


Figura 3.3. Croquis obtenido en el software NX a partir del modelo realizado en 3D.

En análisis FEM también se consideraron las condiciones de apoyo y sujeción para poder hacer la simulación lo más apegado a la realidad.

En el software no se pueden observar las fracturas como tal. Por tanto, se hizo un análisis con los valores del desplazamiento nodal que se obtuvieron en la simulación, de la cual a continuación se presenta una imagen. Los puntos marcados en color rojo son los que tienen un desplazamiento nodal máximo (.117mm). Con estos datos podemos determinar la fractura si hacemos una comparación con el valor de deformación para el cuál el material sobre pasa el punto de cedencia, como se describe en los siguientes párrafos.

De esta manera y siendo coincidente de manera visual con el plato roto, determinamos que esta simulación se llevó a cabo correctamente y será de gran utilidad, pues con esos mismos valores podemos calcular el nuevo espesor que se requiere para hacer un plato más robusto.

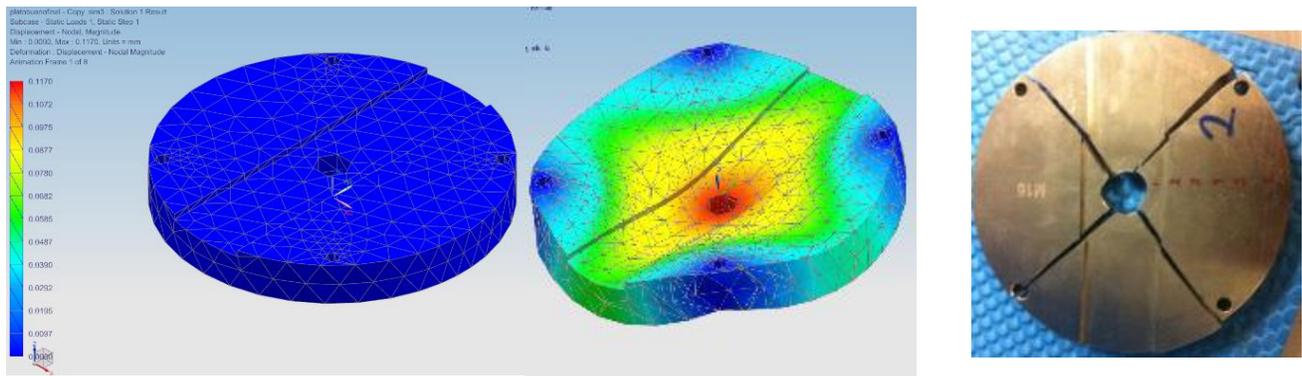


Figura 3.4. Imagen de la simulación de elemento finito realizada en NX.

Como nota adicional el tipo de fractura que se observa es de tipo frágil. Se aprecia un ligero cambio en la geometría cercano al centro de la pieza (indicado con la flecha roja en la figura 3.5), de ahí la fractura se continua de manera frágil. Es mínima la deformación que presenta en donde se generó el inicio de la fractura, que de igual manera que en el análisis de elemento finito a partir del centro del plato.



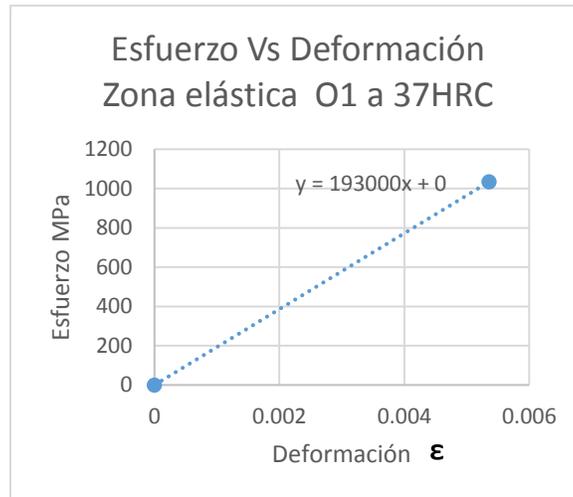
Figura 3.5. Imagen de una sección del plato fracturado.

Para la modificación del plato, me basé en los datos de la tabla siguiente e hice una gráfica teórica de esfuerzo deformación para este acero, considerando la zona elástica.

Tabla 3.1. Composición química del acero O1 y comparación con la muestra de acero que adquirimos. "Metals Handbook Vol.3 Properties and Material Selection for High Performance Alloys".

Condición termo-mecánica	Módulo de Young [MPa]	Relación de Poisson	Esfuerzo de cedencia offset 0.2% [MPa]	Resistencia a la tensión [MPa]	Elongación de la fractura (%)	Dureza (HRC)
Templado en aceite desde 870°C y revenido a 650°C	193,000	0.3	1035	1170	25	37

Gráfica 3.1. Curva esfuerzo deformación sólo de la zona elástica para Acero O1



Basado en este análisis de elemento finito realicé un cálculo para modificar el espesor del nuevo plato con las propiedades de este Acero a la dureza de 37HRC de tal manera que pudiéramos lograr un comportamiento donde el material no fuera tan duro y pudiera absorber una mayor cantidad de energía, pero sin llegar a la ruptura.

Con esta gráfica hice la suposición teórica de que la deformación para la cual se sobrepasaría la región elástica del material es de (0.00536) y con el valor del desplazamiento nodal presentado en el software se obtenía un valor de (0.00614).

Entonces con el espesor y el desplazamiento nodal que obtuve del análisis del NX realice una iteración en la cual modificaba el espesor del plato hasta que logré determinar el espesor mínimo necesario para que el plato pudiera soportar el esfuerzo al que anteriormente se había roto.

Una vez que entendí como se distribuían las fuerzas y tenía el espesor óptimo para que el plato resistiera hicimos la requisición del acero.

Al contar con el acero, se mandó al laboratorio de materiales para un análisis químico de material para corroborar que este acero contaba con la composición química necesaria para poder hacer el plato y darle un tratamiento térmico adecuado para obtener un plato que no se fracture.

La siguiente tabla muestra el análisis hecho por el laboratorio de materiales con la cual comprobamos la composición del acero.

Tabla 3.2. Composición química del acero O1 y comparación con la muestra de acero que adquirimos.

Muestra /Elemento	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%W	%Fe
STD Acero O1	0.95	0.30	1.25	NA	NA	0.5	0.5	NA
Muestra Fasteners	0.93	0.36	1.16	0.03	0.018	0.61	1.5	Balance

Ya teniendo un conocimiento de las propiedades que necesitaremos en el acero procedemos a hacer la manufactura del plato, para lo cual se mandó el plano 2D correspondiente al plato nuevo al taller de máquinas y se proporcionó el material necesario para su manufactura.



Figura 3.6. Nuevo plato manufacturado.

Seguido de esto se seleccionó el tratamiento térmico adecuado en conjunto con el equipo de Materiales con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del plato.

Un tratamiento térmico se define como una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento aplicadas a metales y aleaciones en estado sólido para obtener las condiciones o propiedades deseadas.

Los tratamientos térmicos pueden utilizarse para homogeneizar el fundido de las aleaciones metálicas, para mejorar su ductilidad en caliente, para ablandar los metales antes o durante su procesamiento en frío o en caliente, o para modificar su microestructura con el fin de obtener las propiedades mecánicas deseadas.

También se utiliza el tratamiento térmico de aleaciones metálicas para modificar la estructura química superficial de los materiales. Este objetivo se logra mediante la difusión de carbono, nitrógeno y otros materiales sólidos o gaseosos en la superficie del componente. Estos procesos se utilizan para obtener superficies con una dureza determinada y para mejorar su resistencia al desgaste, la corrosión y la fatiga.

De manera muy general los tratamientos térmicos más comúnmente utilizados son el temple, el normalizado, el recocido y revenido. La principal diferencia radica en el tiempo de enfriamiento de las piezas que son sometidas a calentamiento. Es de suma importancia aclarar que cada uno tiene un propósito distinto.

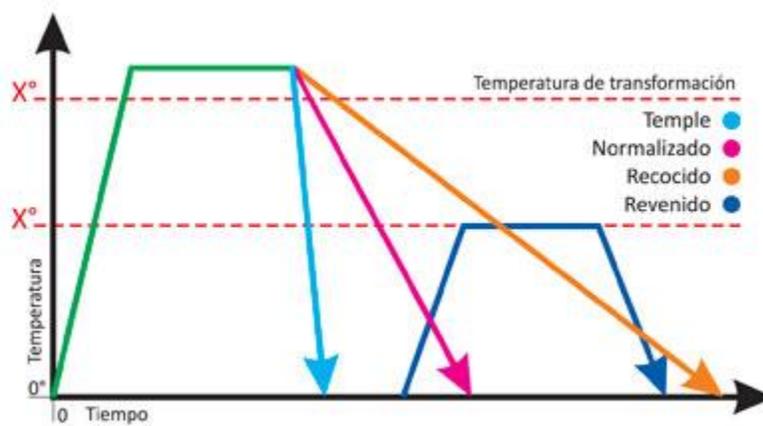


Figura 3.7. Se muestran las velocidades de enfriamiento según el tratamiento térmico.

En este caso se realizó un temple pues se buscaba aumentar la dureza del material y con ello también mejorar las propiedades mecánicas del acero utilizado en el plato.

El análisis del tratamiento termico utilizado fue basado en la curva que muestra a continuación (la figura 3.8.). Finalmente las especificaciones para el tratamiento fueron calentar la pieza a una temperatura de 820°C - 830°C por 2hrs e inmediatamente enfriar en aceite. Esta parte del tratamiento térmico corresponde al temple.

Seguido de esto se le realiza un segundo tratamiento térmico, el revenido. Con el fin de liberar las tensiones generadas durante el temple, debido a la velocidad de enfriamiento subita. El revenido será una temperatura 560°C por 2hrs con esto también lograremos disminuir la dureza

del material. Puede parecer un poco contradictorio el que se quiera disminuir la dureza si en principio lo que se buscaba era aumentarla, pero lo que sucede es que con el temple la dureza es elevada del orden de 50HRC y se busca una dureza menor por lo que necesitamos el revenido.

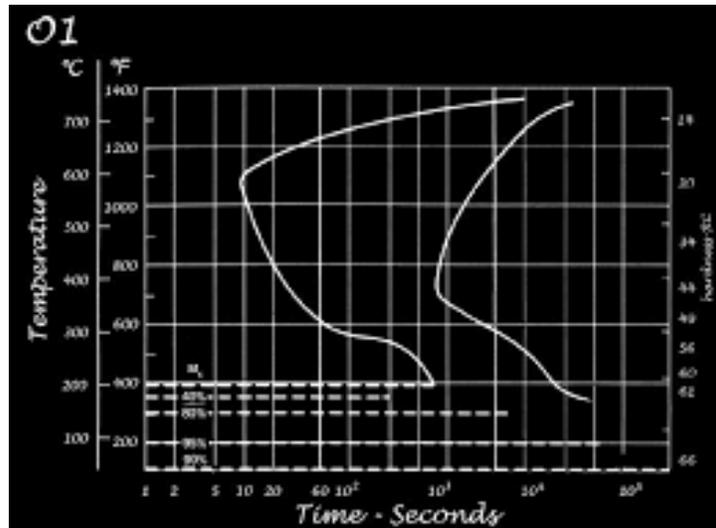


Figura 3.8. Diagrama TTT del Acero O1.

En general esta fue la especificación a la que se llegó para el tratamiento, aún así sabemos que estará sujeta a variaciones dependiendo de la tecnología y el proceso del proveedor.



Figura 3.9. Plato después del tratamiento térmico.

Por último con el plato ya listo se realizó una evaluación funcional en el equipo de las celdas ultrasónicas colocando un tornillo igual al que se colocó en aquella ocasión cuando se presnetó la falla, a continuación se describirá a mayor detalle la prueba realizada y los resultados.

3.4 Montaje, Análisis y evaluación del plato.

El último paso para corroborar que el rediseño es funcional, es la evaluación del plato montado en el equipo de las celdas ultrasónicas. Básicamente se reprodujo la prueba en la misma condición en la que se llevó a cabo la ocasión que se fracturó. Es importante resaltar que en esa ocasión el torque aplicado estaba dentro de los valores máximos permisibles para los tornillos de medida M16.



Figura 3.10. Montaje y prueba al nuevo plato de calibración.

Para la evaluación del plato se empezó por probar aplicando un par torsional al tronillo menor al máximo estipulado en el estandar y se fueron haciendo de manera consecutiva más pruebas aumentando el valor de torque hasta que se llegó al valor deseado de 240N, que es el torque más alto que marca el estandar para ese tornillo.

Puede darse el caso de que en algunas uniones para esta medida de tornillos sobrepasen el valor dado por el estandar, aunque esto no es muy reomendable. Se debe hacer una análisis previo por parte del diseñador y por el ngeniero de fasteners. En ocasiones si se presenta esta condición es mejor modificar el diseño.

Capítulo 4

Resultados.

El resultado de este proyecto fue muy satisfactorio ya que se logró reponer el plato por uno que soportó los 240 N sin problema alguno.

Este plato también fue de bajo costo, pues se hizo una inversión aproximada de \$1,000, contando la materia prima, el tratamiento térmico utilizado y no considerando las horas hombre, tiempo de las simulaciones y el desarrollo conceptual, pero en comparación con el plato original de proveedor, con un costo de \$18,000, se puede ver como un ahorro. Aunado a esto se debe considerar que aún comprado el plato nuevo de proveedor este podía ser susceptible a la falla, generando un gasto adicional.

Como se citó, se le realizó una prueba al plato reproduciendo las condiciones de la anterior prueba donde se fracturó el plato. Durante la prueba no se observó problema alguno, el plato resistió e incluso llegó un momento en donde el tornillo sujeto de prueba comenzó a deformarse de la roldana, que es parte del mismo tornillo.

La siguiente figura 4.1.1 nos muestra una gráfica obtenida del controlador de torque de cuando se está apretando el tornillo. Se observa como aumenta el torque conforme aumenta el ángulo hasta llegar al valor de 240Nm.

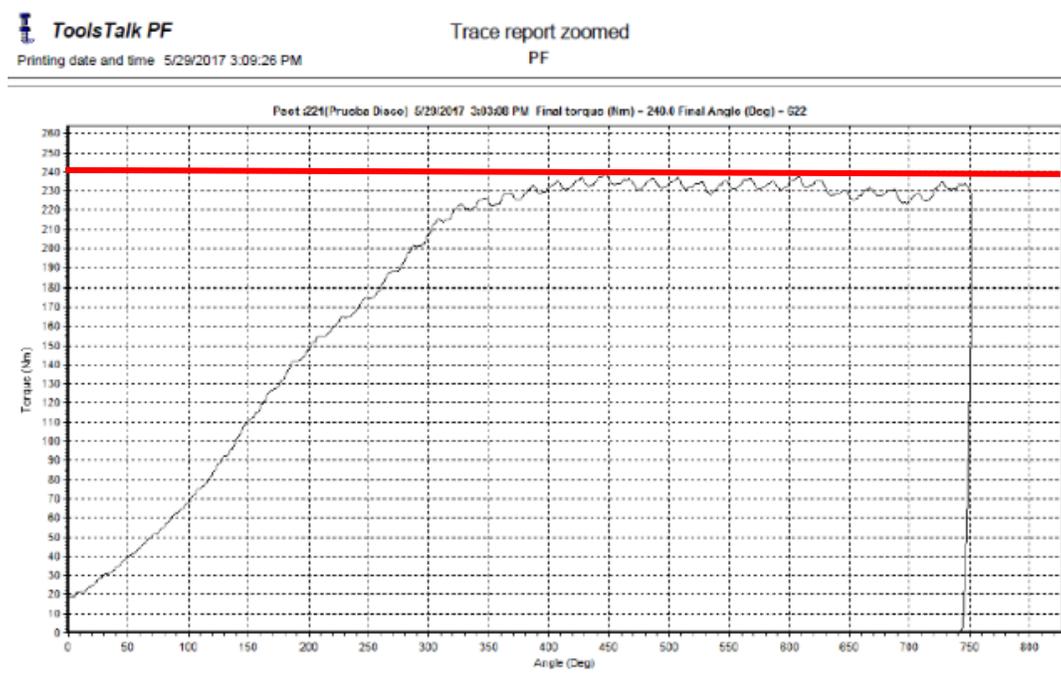


Figura 4.1. Gráfica obtenida durante las evaluaciones finales al plato (a 240 N.m).

En la gráfica podemos ver como el valor de torque llega a un punto en el que ya no sube más y el valor solo presenta pequeñas oscilaciones, es posible considerarlo como que se volviera una constante. De

manera física es porque ya está fallando el tornillo, más específico para este caso la roldana. Al presentar deformación es porque ya no están trabajando dentro del límite elástico donde deberían por tanto dejan de cumplir del todo su función y llegan al punto donde ya no pueden tensarse más y que si se sigue aplicando fuerza solo ocasionará la ruptura del elemento en cuestión.

La deformación en la roldana del tornillo es suficiente para considerarlo como una falla. Como menciono en el capítulo anterior, en general para este tipo de tornillo se recomienda seguir el estándar y aplicar un torque que no exceda este valor de 240N. En ocasiones se puede presentar el caso de que se aplique un valor más alto de torque, aunque esto no nos va a asegurar que el valor de la fuerza de sujeción realmente este incrementando. Incluso se puede dar el caso de que el tornillo se esté deformando y presentando una elongación en el cuerpo.

Generalmente se realizan pruebas llamadas de Torque a Falla en donde se determinan los valores de apriete óptimos para las uniones y también en ellas se puede conocer el torque al cual el tornillo presenta una falla. Entendiendo por falla que se barran las cuerdas, elongación o deformación en su geometría o que se presente alguna deformación o daño en los componentes de la unión. Por esta misma razón y por seguridad del equipo de las celdas ultrasónicas no se realizan pruebas donde el torque exceda el estándar.



Figura 4.2. Tornillo M16 con acercamiento a la deformación que le ocasionó la prueba.

En general podemos decir que el espesor del plato y cambio en el material fueron factores para poder lograr que este soportara el rango de fuerzas marcado por el estándar y requerido para la prueba. Pienso que en su momento el proveedor hizo las consideraciones para probar los tornillos hasta un cierto rango de fuerzas, pero por tratarse de la industria automotriz la gama de tornillería que se maneja es muy variada e incluso existirán casos especiales en la tornillería utilizada.



Figura 4.3. Plato fracturado y plato nuevo.

Considero que, al reducir la dureza, el plato se vuelve capaz de absorber mayor cantidad de energía antes de presentar alguna deformación. El tratamiento térmico adecuado fue un paso importante que nos lleva a obtener el resultado deseado.

Este nuevo plato resistió a una prueba en iguales condiciones a las que el plato original había sido sometido, sin presentar deformación o fractura. Como tal no es posible que este material presente deformación perceptible al ojo, en mi punto de vista la fractura se presenta al mínimo de la deformación que es de 0.005, por ser un material de elevada dureza, que si lo traducimos a milímetros es aproximadamente 0.01mm. Como no se fracturó en esta prueba se puede asegurar de que el rediseño fue favorable y resistirá pruebas futuras.



Figura 4.4. Resultado final, plato nuevo montado en el equipo.

Conclusiones.

Quisiera abarcar en mis conclusiones no solo las del proyecto sino las que me dejó esta experiencia de trabajar en la industria y de hacer uso de mis conocimientos adquiridos durante la carrera.

En este proyecto se logró mejorar las propiedades el plato que se había fracturado durante la prueba. El uso del software del Nx fue fundamental para lograr el objetivo, aunque en ocasiones puede diferir un poco de la realidad para este proyecto no presentó problema alguno.

Pienso que la modificación del espesor, así como mejora en la propiedad como “dureza” fue lo que logró hacer un plato más resistente. Como lo vemos en las curvas de esfuerzo deformación que cuando se tiene un material menos resistente, se logra obtener un poco más de área bajo la curva del material lo cual es significado de aumentar la cantidad de energía que va a soportar el material por debajo de la región elástica (resiliencia), sin presentar deformación plástica. Lo anterior, dependiendo el caso de la aplicación, se puede modificar a conveniencia.

Fue un poco difícil el darle el tratamiento térmico a la pieza pues en los hornos con los que cuenta el laboratorio de material de Ingeniería Santa Fe no cabía la pieza. Se tuvo que mandar a hacer con un proveedor lo cual lleva más tiempo e implica el tener que estar sujeto a la disponibilidad de los medios con los que cuente y el tiempo que el requerirá según la demanda de trabajo que tenga. Este fue otro de los pasos importantes ya que de este dependería las propiedades mecánicas del plato.

Algo clave para lograr cumplir el objetivo del proyecto considero que fue el estar totalmente inmerso en el área de Fasteners, tener conocimiento del uso de los equipos y su funcionamiento, así como de las pruebas y su finalidad. Otros conocimientos que adquirí durante mi estancia en esta área y que son parte del trabajo que se llevó a cabo es muy probable que no pueda ser plasmados en este escrito, pero sé que no hubiera sido igual llevar a cabo este proyecto sin tener tanto del conocimiento que adquirí. Posiblemente el objetivo se hubiera logrado, pero sin tener un conocimiento de todo lo que implica, pues hubiera sido para mí hacer un simple plato de acero sin ningún motivo aparente.

A través de este trabajo se puede ver como es aplicado el conocimiento adquirido en la Facultad para resolver problemas ingenieriles, aunque estos se llevan a cabo de una manera más práctica al final es importante reconocer la importancia de conocer la teoría.

La formación que tengo como Ingeniero Mecatrónico siento que me da una visión muy amplia de la ingeniería, aunque general. Para el caso de este proyecto fue necesario hacer uso de algunos conocimientos de asignaturas como la instrumentación, mecánica de sólidos, ingeniería de materiales, CAD CAM, Temas selectos de manufactura, esto para entender cómo funcionaba el equipo y el papel del plato que desempeña en el equipo de las celdas ultrasónicas, saber qué es lo que provoca la falla, cómo corregirla, que hacer para mejorar el plato y poder así realizar el rediseño con éxito.

En realidad, considero bastante generosa la formación que se brinda en la UNAM para esta carrera. Bien es cierto que no soy experto en todo, pero con una visión tan amplia que se tiene al cursar una ingeniería de este tipo relacionas diseño, selección de materiales, funcionamiento de sensores y equipos, tratamientos térmicos, análisis con softwares y todo esto en conjunto te vuelve un ingeniero que puede desenvolverse con éxito en muchas áreas de la industria. De esta manera te es posible llevar a cabo un proyecto en su totalidad, apoyándote de expertos en el área y su experiencia que han tenido como profesionistas.

El laborar para una empresa automotriz me hace ver la versatilidad que debe tener un ingeniero y como debe saber relacionar sus conocimientos no solo para su área, pues el conocimiento que adquiere en la misma se va ligando con las demás y es de esa manera como se llega al éxito en un proyecto.

Referencias y anexos.

1. Shigley, J.E. Diseño en Ingeniería Mecánica. México, Edit. Mc Graw Hill
2. Molera Sola, Perú. Tratamientos Térmicos.
3. Apraiz Barreiro. Tratamientos Térmicos de los Metales.
4. Metals Handbook Vol.3 Properties and Material Selection for High Performance Alloys.
5. <http://www.cashenblades.com/steel/o1.html>
6. <http://celdadecarga.com/>
7. <http://www.mcrcs.com/products/transducers/transducers2.aspx>
8. <http://www.basculaspoise.com/Soporte/Celdas de Carga.html>
9. <http://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/torquimetro>
10. <http://www.mcrcs.com/products/TransientRecorders/standardMC900.aspx>
11. <http://www.sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%2001.pdf>
12. https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/140249/mod_resource/content/1/ACEROS%20PARA%20HERRAMIENTAS%202016.pdf
13. <http://www.mcrcs.com/products/TransientRecorders/desktopMC900.aspx>
14. <https://rafaelramirezr.files.wordpress.com/2015/03/disenio-en-ingenieria-mecanica-de-shigley-8th-hd.pdf>
15. <http://www.enerpac.com/es/apriete-con-torque>
16. http://www.fcanorthamerica.com/sites/mex/Nuestra_Empresa/Pages/Presentaci%C3%B3n.aspx
17. <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6837/05Jcb05de16.pdf>
18. http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/aceros%20estructuras%20y%20tratamientos%20termicos.pdf
19. <http://www.eurotherm.es/metallic-alloys>
20. <http://explicaciones-simples.com/2014/10/15/templado-revenido-normalizado-y-recocido/>
21. <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8732.pdf>
22. http://www.caletec.com/blog/tag/green_belt_6_sigma/
23. [http://www.manufacturingterms.com/Spanish/Design-for-Six-Sigma-\(DFSS\)-Definition.html](http://www.manufacturingterms.com/Spanish/Design-for-Six-Sigma-(DFSS)-Definition.html)
24. Matweb.com
25. Apuntes personales.