

**SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE ACEROS INOXIDABLES EMPLEADOS EN
LA FABRICACION DE PUNTAS DE FIJACIÓN PARA IMPLANTES DENTALES**

JAIME JOSÉ BATISTA DE LUQUE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO- QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2009**

**SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE ACEROS INOXIDABLES EMPLEADOS EN
LA FABRICACION DE PUNTAS DE FIJACIÓN PARA IMPLANTES DENTALES**

JAIME JOSÉ BATISTA DE LUQUE

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico**

**Director:
Universidad Industrial de Santander, UIS
Ph. D. C. M. Sc. Ing. LUIS EMILIO FORERO GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO- QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

DEDICATORIA.

A Dios por guiarme durante todo el transcurso de mi carrera,

A mis padres por orientarme apoyarme y darme confianza durante los momentos difíciles por los que pase en esta universidad

A mi querida hermana maría yose por decirme las palabras adecuadas en el momento apropiado

A maria valentina por ser tan especial

Jaime José Batista De Luque

AGRADECIMIENTOS.

Le agradezco a Dios por estar siempre presente en mi vida, por su guía y protección a través de todas las personas que me rodearon

A mis padres por su paciencia apoyo, confianza, y por ser dignos ejemplos a seguir en mi vida

Al profesor Luis Emilio Forero por su valiosa colaboración, orientación, y paciencia para la culminación de mis objetivos

A todos mis compañeros del grupo de biomateriales por enseñarme cada uno a su manera diversas formas de solucionar los problemas.

Al Sr Joao Reis y a la empresa Sandinox por su muy valiosa colaboración durante la realización del proyecto

Al Sr Jim Martin y a la empresa Carpenter por su ayuda oportuna.

A todos mis amigos y familiares por estar conmigo y ayudarme siempre para la consecución de mis objetivos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. ASPECTOS GENERALES	3
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 OBJETIVO GENERAL	5
1.4 OBJETIVO ESPECÍFICOS	5
2. MARCO TEÓRIO	6
2.1 BIOMATERIALES	6
2.2 GENERALIDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES	7
2.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES	8
2.2.2 GENERALIDADES SOBRE LA ALEACIÓN TIPO 420	17
2.2.3 GENERALIDADES SOBRE LA ALEACIÓN CUSTOM 455	19
2.3 MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE PUNTAS UTILIZADAS EN LA FIJACIÓN DE IMPLANTES DENTALES	20
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	22
3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	22
3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	24
3.2.1 ESTADO INICIAL DE LOS MATERIALES	24
3.2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS MATERIALES	24
3.2.3 ANÁLISIS METALOGRÁFICO	27
3.2.4 ENSAYO DE DUREZA	30
3.2.5 ENSAYO DE TORSIÓN	32
3.2.5.1 DISEÑO DE LAS PROBETAS	32
3.2.5.2 EQUIPOS PARA EL ENSAYO DE TORSIÓN	33
3.2.5.3 REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE TORSIÓN	34
3.2.6 ENSAYO DE FLEXIÓN	37

3.2.6.1 DISEÑO DE PROBETAS	37
3.2.6.2 EQUIPO	38
3.2.6.3 REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE FLEXIÓN.....	39
3.3 TRATAMIENTO TERMICO	40
3.3.1 FABRICACIÓN DEL HORNO Y SU FUNCIONAMIENTO.	40
3.3.2 TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE LA ALEACIÓN CUSTOM 455.....	48
3.3.3 TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE LA ALEACIÓN TIPO 420.....	49
3.3.4 ANALISIS METALOGRÁFICO PROBETAS TRATADAS TERMICAMENTE.....	50
3.3.5 ENSAYO DE FLEXIÓN SOBRE PROBETAS TRATADAS TERMICAMENTE.....	50
3.3.6 ENSAYO DE TORSIÓN SOBRE PROBETAS TRATADAS TERMICAMENTE.....	51
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	52
4.1 ANÁLISIS METALOGRÁFICO.....	52
4.1.1 ANÁLISIS METALOGRAFICO ESTADO DE ENTREGA TIPO 420.....	52
4.1.2 ANÁLISIS METALOGRÁFICO CUSTOM 455 EN ESTADO DE ENTREGA.....	55
4.2 RESULTADOS ENSAYO DE .DUREZA PARA PROBETAS EN ESTADO COMO SE RECIBIÓ	58
4.3 RESULTADOS ENSAYO DE TORSIÓN PARA LAS PROBETAS EN ESTADO COMO SE RECIBIÓ	60
4.3.1 ENSAYO DE TORSIÓN <i>CUSTOM 455</i> EN ESTADO COMO SE RECIBIÓ.....	60
4.3.2. ENSAYO DE TORSIÓN TIPO 420 EN ESTADO DE ENTREGA.....	63
4.4 RESULTADOS ENSAYO DE FLEXIÓN PARA LAS PROBETAS EN ESTADO DE ENTREGA.....	65

4.5 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO.....	67
4.5.1 RESULTADOS TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE EL ACERO TIPO 420	69
4.5.2 RESULTADOS TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE LA ALEACIÓN CUSTOM 455.....	72
4.6 ANÁLISIS METALOGRÁFICO SOBRE PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.....	76
4.6.1 ANÁLISIS METALOGRÁFICO TIPO 420 TRATADO TÉRMICAMENTE.....	76
4.6.2 ANÁLISIS METALOGRÁFICO CUSTOM 455 TRATADO TÉRMICAMENTE.....	79
4.7 RESULTADOS ENSAYO DE TORSIÓN PARA PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.....	82
4.7.1 RESULTADOS ENSAYO DE TORSIÓN TIPO 420 PARA PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.....	82
4.7.2 RESULTADOS ENSAYO DE TORSIÓN CUSTOM 455 PARA PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.....	84
4.7.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS ENSAYOS DE TORSIÓN ENTRE LAS PROBETAS QUE FUERON TRATADAS TÉRMICAMENTE.....	86
4.8 RESULTADOS ENSAYO DE FLEXIÓN PARA PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.....	88
4.8.1 RESULTADOS ENSAYO DE FLEXIÓN TIPO 420 TRATADO TÉRMICAMENTE.....	88
4.8.2 RESULTADOS ENSAYO DE FLEXIÓN CUSTOM 455 TRATADO TÉRMICAMENTE.....	90
4.8.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN ENTRE LAS PROBETAS QUE FUERON TRATADAS TÉRMICAMENTE.....	92
5. CONCLUSIONES	94

6. RECOMENDACIONES.....	97
BIBLIOGRAFÍA.....	98
ANEXO A ENSAYOS DE FLEXIÓN PARA LAS PROBETAS EN ESTADO COMO SE RECIBIO.....	101
ANEXO B ENSAYOS DE TORSIÓN Y FLEXIÓN PARA LAS PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.....	103

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Resumen de descubrimientos importantes en la historia de los biomateriales.....	6
Tabla 2. Composición estándar de algunos aceros inoxidables martensíticos.....	14
Tabla 3. Composición química del acero Tipo 420.....	17
Tabla 4. Composición química del acero Custom 455 ®.....	19
Tabla 5. Composición química del acero inoxidable Tipo 420.....	25
Tabla 6. Composición química del acero inoxidable Custom 455 ®.....	26
Tabla 7. Ensayo de dureza para la aleación Tipo 420 en estado como se recibió.	58
Tabla 8. Ensayo de dureza para la aleación Custom 455 en estado como se recibió.....	59
Tabla 9. Resultados ensayos de torsión Custom 455 en estado como se recibió.	61
Tabla 10. Resultados ensayo de torsión para el acero Tipo 420 en estado como se recibió.....	64
Tabla 11. Resultados ensayo de flexión Tipo 420 y Custom 455.....	66
Tabla 12. Ensayo de dureza Tipo 420 templado al aire 1000 °C.....	69
Tabla 13. Ensayo de dureza Tipo 420 templado a 980° C al aire.....	69
Tabla 14. Ensayo de dureza Tipo 420 templado a 1000 °C y Revenido durante dos horas a 570°C.....	69
Tabla 15. Ensayo de dureza Tipo 420 templado a 1000°C y Revenido a 570°C durante dos horas media.....	70
Tabla 16. Ensayo de dureza Custom 455 Solubilizado a 850°C durante una 1 h.....	72

Tabla 17. Ensayo de dureza <i>Custom 455</i> sobre probetas envejecidas a distintos tiempos	72
Tabla 18. Comparación entre Durezas Rockwell A y C.....	72
Tabla 19. Resultados ensayo de torsión Tipo 420.....	82
Tabla 20. Resultados ensayo de torsión <i>Custom 455</i>	84
Tabla 21. Resultados ensayo de flexión Tipo 420.....	88
Tabla 22. Resultados ensayo de flexión <i>Custom 455</i>	90

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Partes de un implante.	2
Figura 2. Torcometro , puntas para la fijación de implantes ,tornillo e implante dental.....	2
Figura 3. Sistema Fe –Cr	12
Figura 4. Influencia del carbono en el bucle austenítico	13
Figura 5. Diseño de experimentos para el ensayo de flexión Muestra (M), Contramuestra (C) y Testigo (T).....	23
Figura 6. Diseño de experimentos para el ensayo de torsión. Muestra (M), Contramuestra(C) y Testigo (T).....	23
Figura 7. Medidas del material recibido.	24
Figura 8. Corte de las probetas a) Probetas transversales b) Probetas longitudinales	27
Figura 9. Cortadora metaserv	28
Figura 10. Limpiador ultrasónico	28
Figura 11. Probetas montadas en bakelita.....	28
Figura 12. Maquina metaserv para el montaje de las probetas en bakelita.	29
Figura 13 .lijas carbimet	29
Figura 14. Pulidora marca metasindex, Paños Microcloth buehler y Redcloth buehler.....	30
Figura 15 .Durometro Clarck.....	31
Figura 16. Diseño de las probetas y sus partes	32
Figura 17. Dispositivo para la fijación del torque.....	33

Figura 18 . Medidor de ángulo	33
Figura 19. Torcometro.....	34
Figura 20. Esquema del montaje de torsión.....	36
Figura 21. Ensayo de torsión.	36
Figura 22. Ensayo de flexión.....	37
Figura 23. Diseño de probeta, a) corte lateral y b) Frontal de las probetas de flexión.....	38
Figura 24. Maquina universal de ensayos.....	38
Figura 25. Montaje de las probetas de flexión	40
Figura 26. Carcaza del horno.....	41
Figura 27. Corte lateral del horno.....	42
Figura 28. Dispositivos del horno	44
Figura 29. Circuito eléctrico del horno.....	45
Figura 30. Panel de control del horno	47
Figura 31. Interior del panel de control.....	47
Figura 32. Probetas tratadas térmicamente ensayadas a flexión.....	50
Figura 33. Probetas tratadas térmicamente ensayadas a torsión	51
Figura 34. La Microestructura del acero inoxidable Tipo 420 en estado recocido corte longitudinal a 1400 x, atacada con solución Vilella´s. los círculos rojos y azules denotan la fase ferrita y los carburos respectivamente.....	53
Figura 35. Microestructura del acero inoxidable Tipo 420 corte transversal en estado recocido a 1400 x, atacada con solución Vilella´s.. Los círculos rojos y azules denotan la fase ferrita y los carburos respectivamente.....	54

Figura 36. Sección isotérmica Fe-Cr-C a 870 °C. El círculo rojo marca los carburos que se forman para el acero Tipo 420 en estado recocido.....	54
Figura 37. Microestructura del acero inoxidable Custom 455 corte transversal, en estado de entrega a 1400 aumentos, atacada con solución Vilella´s.	56
Figura 38. Microestructura del acero inoxidable Custom 455 corte longitudinal, en estado de entrega a 1400 x, atacada con solución Vilella´s.	56
Figura 39. Diagrama ternario Fe-Cr-Ni.....	57
Figura 40. Precipitados presentes en el acero inoxidable <i>Custom 455</i> corte transversal en estado de entrega, a 2800 aumentos sin ataque.....	57
Figura 41. Precipitado presente en el acero inoxidable Custom 455 longitudinal en estado de entrega, a 2800 aumentos sin ataque.....	58
Figura 42. Grafica Torque – Angulo <i>Custom 455</i>	60
Figura 43. Grafica Torque – Angulo <i>Custom 455</i>	60
Figura 44. Grafica Torque – Angulo para acero Tipo 420	63
Figura 45. Grafica Torque – Angulo para el acero Tipo 420	63
Figura 46. Curva de comparación entre el acero Tipo 420 y <i>Custom 455</i>	65
Figura 47. Modulo de flexión para probetas en estado como se recibió.	66
Figura 48. Diagrama de Dureza – temperatura de revenido para el acero Tipo 420	71
Figura 49. Grafica de Dureza - tiempo de envejecido para el acero	73
Figura 50. Esquema de la curva de envejecimiento (resistencia o dureza frente al tiempo) a una temperatura determinada para una aleación endurecible por precipitación.....	73

Figura 51. Microestructura del acero Tipo 420 templado a 1000°C y revenido durante dos horas a 570°C, a 1400x corte longitudinal atacado con reactivo villeda's, círculo rojo carburos, círculos amarillo martensita fina y círculo azul martensita gruesa	76
Figura 52. Microestructura del acero Tipo 420 templado a 1000°C y revenido durante dos horas a 570°C, a 1400x corte transversal atacado con reactivo villeda's, círculo rojo carburos, círculo amarillo martensita fina y círculo azul martensita gruesa	76
Figura 53. Microestructura del acero Tipo 420 templado a 1000°C y revenido durante dos horas y media 570°C, a 1400x corte longitudinal atacado con reactivo villeda's, círculo rojo carburos y círculo azul martensita gruesa.	77
Figura 54. Microestructura del acero Tipo 420 templado a 1000°C y revenido durante dos horas y media 570°C, a 1400x corte longitudinal atacado con reactivo villeda's. círculo rojo carburos, círculo amarillo martensita fina y círculo azul martensita gruesa	77
Figura 55. Microestructura del acero <i>Custom 455</i> solubilizado a 850°C durante 1 hora ,enfriado en agua, envejecido a 480°C durante 2 horas , a 1400x corte transversal atacado con reactivo Villeda's. Círculo amarillo martensita, círculo rojo precipitados y círculo azul carbonitruros.	79
Figura 56. Microestructura del acero <i>Custom 455</i> solubilizado a 850°C durante 1 hora enfriado en agua, envejecido a 480°C durante 2 horas , a 1400x corte longitudinal atacado con reactivo Villeda's. Círculo amarillo martensita, círculo rojo precipitados y círculo azul carbonitruros.....	79
Figura 57. Microestructura del acero <i>Custom 455</i> solubilizado a 850°C durante 1 hora enfriamiento en agua, envejecido a 480°C durante 5 horas , a 1400x corte transversal atacado con reactivo Villeda's. Círculo amarillo martensita, círculo rojo precipitados y círculo azul carbonitruros.....	80
Figura 58. Microestructura del acero <i>Custom 455</i> solubilizado a 850°C durante 1 hora enfriamiento en agua, envejecido a 480°C durante 5 horas , a 1400x corte longitudinal atacado con reactivo Villeda's. Círculo amarillo martensita y círculo rojo precipitados	80
Figura 59. Grafica torque-ángulo Tipo 420 tratado térmicamente y en estado como se recibió.	82

Figura 60. Grafica torque-ángulo <i>Custom 455</i> tratado térmicamente y en estado de entrega.	84
Figura 61. Torque-ángulo, comparación entre las probetas que fueron tratadas térmicamente	86
Figura 62. Grafica esfuerzo-deformación unitaria Tipo 420	88
Figura 63. Grafica esfuerzo deformación unitaria Custom 455	90
Figura 64. Esfuerzo- deformación. Comparación entre probetas tratadas térmicamente.	92

LISTA DE ANEXOS.

**ANEXO A ENSAYOS DE FLEXIÓN PARA LAS PROBETAS EN
ESTADO COMO SE RECIBIO.....101**

**ANEXO B ENSAYOS DE TORSIÓN Y FLEXIÓN PARA LAS
PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.....103**

RESUMEN

TITULO: “SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE ACEROS INOXIDABLES EMPLEADOS EN LA FABRICACION DE PUNTAS DE FIJACIÓN PARA IMPLANTES DENTALES”*

AUTOR: Jaime José Batista De luque**

PALABRAS CLAVES: Puntas de fijación, Temple, revenido, solubilización, envejecido, flexión y torsión.

CONTENIDO:

En la fabricación de puntas para la fijación de implantes dentales se emplean aceros inoxidable, puesto que posee una alta resistencia a la corrosión y puede lograr algunos mediante tratamientos térmicos mejorar sus resistencias mecánicas a torsión y flexión, En este proyecto se utilizo un acero inoxidable martensítico (Tipo 420) y un acero inoxidable endurecible por precipitación martensítico (Custom 455), con la finalidad de aumentar su resistencia mecánicas al tipo de cargas mencionadas anteriormente, mediante tratamientos térmicos para su aplicación como punta atornilladora de implantes dentales. Para poder llevar a cabo los tratamientos térmicos se construyo y diseño un horno de atmosfera controlada, debido a que estos aceros tiene una alta tendencia a la decarburización cuando se trabaja a las temperaturas de tratamiento térmico

Se realizaron tratamientos térmicos de temple y revenido para el acero Tipo 420 mientras que para el Custom 455 se realizo un tratamiento de solubilización y envejecimiento. La efectividad del tratamiento se evaluó inicialmente mediante ensayo de dureza y posteriormente por medio de ensayos de flexión y torsión, con el fin de simular las cargas y esfuerzos a los cuales van a estar sometidas las puntas fijadoras de implantes dentales. Ambos aceros tratados térmicamente mejoraron su resistencia a cargas de torsión y flexión con respecto al material como fue entregado. Sin embargo, el acero Custom 455 solubilizado a 850°C y envejecido durante 5 horas presento las mayores resistencia a cargas torsionales y a esfuerzos deflectantes.

*Trabajo de Investigación.

**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería metalúrgica y ciencia de los materiales.

Director: Ph.D.C.M.SC. Luis Emilio Forero Gómez

TITLE: "STAINLESS STEELS SELECTION AND EVALUATION FOR MAKING FIXATION TIPS FOR DENTAL IMPLANT" *

AUTHOR: Jaime José Batista De Luque **

KEY WORDS: Fixations Tips, hardening, solution treatment, aging, flexion and torsion.

CONTENT:

The fixation tips for adjusting dental implant are fabricated on stainless steel, because they have high corrosion resistance and some of these can increase his torsion and flexion strength with a heat treatment like hardened ,tempered, annealed and aged . In this project was used a martensitic stainless steel (Type 420) and a precipitation hardening stainless steel (Custom 455) , both have high corrosion resistance. These steels was heat treated for increasing theirs torsion and flexion strength for fixing tip implant application. For making heat treatment, the atmosphere controller furnace was designed due to these steel can be decarburized with the heat treatment temperature. This furnace use temperature controller and rele solid stage and a resistance of 3960 W

The Type 420 stainless was hardened and tempered and the other custom 455 stainless steel was annealed and aged. With a hardness test was evaluated the heat treatment effective. Torsion and flexion test did over the heat treated materials for simulating force applied in fixation dental tip application , the steels heat treated improve his flexion and torsion resistance from the as received steels, the Custom 455 heat treated at 850°C and aged during five hours had better torsion and flexion strength.

*Investigation work

** Physical-Chemical Faculty, metallurgical Engineering Department,

Director: Luis Emilio Forero Gómez Ph.D.C.M SC

INTRODUCCIÓN.

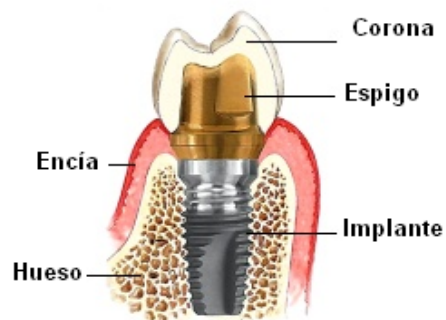
La odontología moderna ha presentado diversos avances en los procedimientos quirúrgicos, específicamente en la rama de la implantología dental, mediante la cual se realiza el reemplazo de un diente o varios. La mayoría de los procesos implantológicos son cada vez más complejos, por lo tanto se hace necesario el desarrollo de herramientas diseñadas en materiales apropiados, que puedan resistir tanto los esfuerzos mecánicos, así como medios altamente corrosivos como por ejemplo saliva y sangre.

Los implantes dentales se utilizan con el fin de reemplazar la raíz de un diente ver (**Figura 1**). Posterior a la colocación del implante en la encía se procede a fijar la corona al implante por medio de un tornillo, para la fijación del tornillo se aplica un par torsor mediante un torcometro, este instrumento posee puntas insertables (**Figura 2**) conocidas como puntas para la fijación de implantes dentales que es el objeto de estudio de este proyecto.

En la fabricación de puntas para fijación de implantes dentales se emplean aceros inoxidable, debido a que se necesita una combinación de buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. En este proyecto se trabajaron con dos clases de aceros inoxidables un acero inoxidable martensítico AISI 420 y otro acero inoxidable endurecible por precipitación AISI 455, ambos aceros son tratables térmicamente, lo cual quiere decir que es posible mejorar sus propiedades mecánicas por medio de calentamientos cíclicos en medios de enfriamientos adecuados.

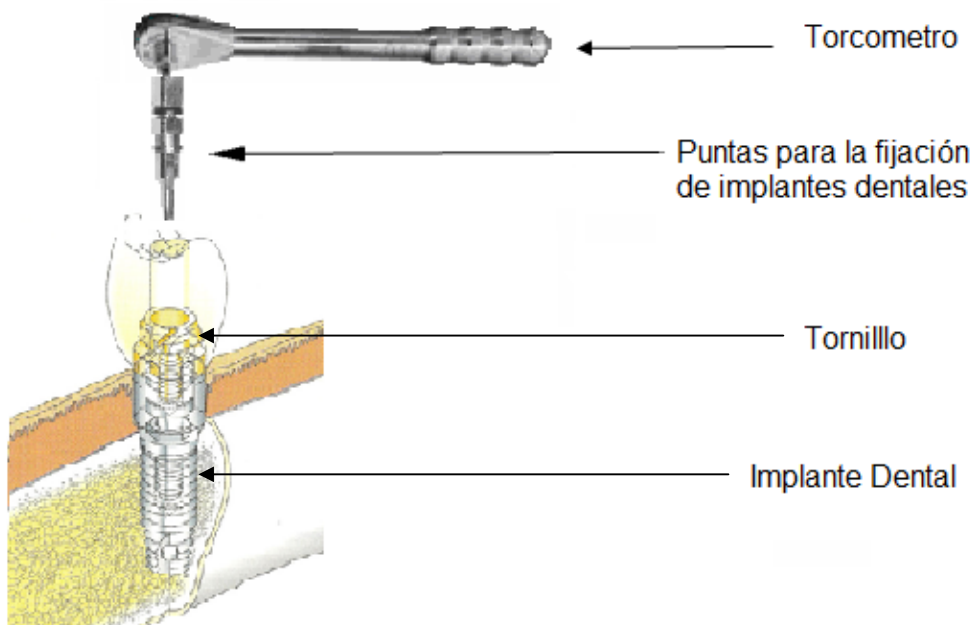
En el presente trabajo se diseñó el tratamiento térmico sobre los aceros inoxidables AISI 420 y AISI 455, y se evaluaron las propiedades mecánicas y metalográficas, por medio de ensayos de: Dureza, torsión y flexión, con el fin de seleccionar el material con las propiedades mecánicas apropiadas para la fabricación de las puntas atornilladoras de implantes dentales.

Figura 1. Partes de un implante.



www.dentistabroad.co.uk

Figura 2 . Torcometro , puntas para la fijación de implantes ,tornillo e implante dental



Modificación .www.nobelbiocare.com y www.proclinic.com

1. ASPECTOS GENERALES.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Los avances en el área de la odontología han generado el desarrollo de procesos quirúrgicos cada vez más complejos, por lo tanto las exigencias para el desarrollo del instrumental son cada vez mayores. Se requiere de instrumentos fabricados en materiales que tenga un comportamiento químico y mecánico adecuado durante el procedimiento quirúrgico, y no produzcan ningún tipo de complicación en el paciente. Otras características que deben cumplir estos instrumentos es que las propiedades mecánicas no disminuyan considerablemente, durante la manipulación y limpieza tanto en el pre como en el post operatorio, como consecuencia de ambientes corrosivos como: fluidos corporales, soluciones y procesos de esterilización.

En la fabricación de puntas para fijación de implantes dentales se emplean diversos tipos de aleaciones, pero debido a la alta corrosividad de los fluidos corporales del cuerpo humano se han utilizado principalmente aceros inoxidable. Los aceros inoxidable austeníticos a pesar de su alta resistencia a la corrosión no poseen las propiedades mecánicas adecuadas para este tipo de aplicaciones, generalmente se utilizan aceros inoxidable martensíticos debido a su alta resistencia al desgaste y alafilamiento, pero poseen una baja resistencia a tenacidad y fatiga, por lo que su empleo en las puntas atornilladoras de implantes dentales no es apropiado.

Es necesario utilizar materiales con mejores propiedades mecánicas. Dentro de este grupo los aceros inoxidable endurecibles por precipitación son una muy

buena alternativa, con estos aceros se pueden alcanzar las resistencias mecánicas adecuadas por medio de un sencillo tratamiento térmico.

Por consiguiente se hace necesario estudiar y establecer el tratamiento térmico de los aceros inoxidable AISI 420 y AISI 455. Con la finalidad de fabricar las puntas para la fijación de implantes dentales.

Otro problema es el costo que representa para la industria odontológica colombiana la importación de estos instrumentos. Estos costos podrían ser reducidos si este tipo de instrumental es fabricado en Colombia. En la medida en que se reduzca el costo en el instrumental también se disminuye el costo del tratamiento odontológico.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El campo de la Implantología dental ha tenido un notable crecimiento en nuestro país y en el mundo. Por lo tanto se ha creado la necesidad de fabricar instrumentos que faciliten la colocación y fijación de los implantes dentales. También, se debe realizar estudios de diversos materiales y de sus respectivos tratamientos térmicos para la fabricación de estos instrumentos.

Lo anterior, nos permitirá obtener información sobre el comportamiento mecánico de los materiales bajo las condiciones mecánicas de sollicitación. Esta información, podrá ser utilizada para el diseño de las puntas de fijación de los implantes, sus dimensiones, esfuerzos a los que puede estar sometido y las deformaciones que se pueden producir.

El estudio de los aceros inoxidables AISI 420 y AISI 455, que se plantea en este trabajo es importante para establecer la posibilidad de fabricar este tipo de instrumental en nuestro país. De esta manera se podría expandir el campo de la odontología y ortodoncia en nuestro medio. Adicionalmente, se estaría beneficiando indirectamente a la comunidad dado que si se bajan los costos en los instrumentos empleados, esto repercute en el costo del procedimiento medico disminuyendo su precio.

El proyecto tiene como finalidad el estudio concerniente de los aceros inoxidables AISI 420 y AISI 455, y sus tratamientos térmicos apropiados, con miras a la utilización de estos aceros inoxidables para la fabricación de puntas de fijación de los implantes dentales.

1.3 OBJETIVO GENERAL.

Caracterizar y realizar tratamientos térmicos en aceros inoxidables AISI 420 y 455, para obtener las condiciones mecánicas requeridas en las puntas atornilladoras de implantes dentales.

1.4 OBJETIVO ESPECÍFICOS.

- Evaluar la dureza y la resistencia mecánica a la flexión y torsión en los aceros inoxidables AISI 420 y 455, en estado recocido y tratados térmicamente.
- Seleccionar y establecer las condiciones de tratamiento térmico, bajo las cuales se obtienen las propiedades mecánicas de sollicitación de las puntas de fijación de los implantes dentales.
- Identificar las fases y precipitados presentes en la microestructura de los aceros inoxidables AISI 420 y 455 en estado recocido y tratados térmicamente

2. MARCO TEÓRICO

2.1 BIOMATERIALES

El origen de los biomateriales se remonta a civilizaciones antiguas como los egipcios, aztecas y romanos, quienes utilizaron diversos tipos de materiales como oro, madera, marfil o hueso para reemplazar dientes.

Con el transcurrir de los tiempos los tipos de biomateriales han ido evolucionando, la siguiente tabla relaciona los primeros usos de biomateriales: cerámicos, metálicos y poliméricos

Tabla 1. Resumen de descubrimientos importantes en la historia de los biomateriales.

Descubrimiento	Fecha
Utilizó marfil como material de implante	1880
Uso de platos metálicos para fijar fracturas	1900.
Polimetilmetacrilato (PMMA) empleado para reemplazar dientes	1937

[1]

El desarrollo de la medicina ocurrió simultáneamente con el descubrimiento y fabricación de los materiales. La implementación de materiales en un comienzo para funciones biológicas no se hizo sobre una base científica. Por ejemplo: el descubrimiento de polimetilmetacrilato (PMMA) en 1937 y su uso para reemplazar dientes fue de manera accidental, al darse cuenta, que pedacitos de este material incrustados en los ojos de soldados, ocasionaban una respuesta inmunológica en el organismo. El uso del acero inoxidable por James Charnley como reemplazo de

una cadera, dio impulso para lanzar los materiales en un primer plano de usos biomédicos.

El uso de un biomaterial esta determinado por su biocompatibilidad, la cual se define como la capacidad que tiene el material de funcionar con una respuesta adecuada del sistema biológico en el cual fue implantado para una aplicación especial.

2.2 GENERALIDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES.

Los aceros inoxidable son aleaciones ferrosas cuya principal característica es su resistencia a la corrosión en diversos ambientes químicos. La resistencia a la corrosión se debe a la incorporación del cromo en una cantidad mínima de 10.5% de acuerdo a la norma EN 10088. La adición de el cromo en el acero le permite formar una película muy delgada ([2 a 3] nm espesor) pasivante, como resultado de la combinación del cromo con el oxígeno del aire o en cualquier condición oxidante, aislando el acero del medio agresivo circundante.

Los aceros inoxidable logran resistir a la corrosión debido a la generación de una capa fina de óxido hidratado de cromo que pasiva la superficie. La capa posee características como son: Baja porosidad, continuidad, insolubilidad, adherencia, tenacidad, impermeabilidad y autoregenerabilidad; que impide el contacto del acero con el medio oxidante.

La autoregenerabilidad de la capa le brinda la posibilidad a el acero de autorepararse en presencia de oxígeno [2], si la capa o la película de óxido en la superficie sufre algún daño mecánico o químico

La composición de la capa puede variar dependiendo del tipo de acero y con el tratamiento del mismo como laminado, decapado o tratamiento térmico, la película formada es transparente y brillante, y confiere al acero su apariencia agradable a la vista.

Los aceros inoxidable pueden contener otros elementos como son: Níquel, cobre, aluminio, silicio, molibdeno y niobio, los cuales aumenta su resistencia a la corrosión directa e indirectamente bajo condiciones especiales. Como resultado de la amplia variedad de elementos que se pueden adicionar a los aceros se pueden encontrar distintas clases de aceros inoxidable, algunos se pueden endurecer por tratamientos térmicos y otros por trabajado en frío, dependiendo de los elementos que se adicione.

2.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES.

En forma general se consideran 5 tipos o clases de aceros inoxidable:

- Ferríticos,
- Austeníticos
- Austenoferríticos (Duplex)
- Martensíticos
- Endurecibles por precipitación

Aceros Inoxidables Ferríticos

Son aleaciones de hierro, cromo y carbono, con contenidos de carbono menor al 0.10%, cromo entre (10,5%-30%) y un contenido de níquel bajo. Estos aceros inoxidable pertenecen a la serie AISI 400, mantienen su estructura ferrítica estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión, esto se logra gracias a su alto contenido de cromo, el cromo inhibe la formación de

austenita y promueve la formación de ferrita. El hecho de mantener su estructura ferrítica (BCC) limita al acero ya que no se puede endurecer por medio de un tratamiento térmico únicamente por deformación en frío.

Las características de esta aleación son:

- Posee una resistencia a la corrosión moderada, esta resistencia aumenta proporcionalmente con el contenido de cromo
- Estas aleaciones son magnéticas.
- La soldabilidad que presentan estos aceros es baja, se limita a soldadura de calibres delgados.
- Generalmente se les realiza tratamientos de recocido con lo que se obtienen propiedades como: mayor ductilidad y resistencia a la corrosión.
- Debido a su baja dureza, su uso se restringe generalmente a procesos de conformado en frío.

Aceros inoxidable Austeníticos

Son aleaciones de hierro, cromo, níquel y carbono. Como su nombre lo indica, tienen configuración metalográfica austenítica (fcc). Su popularidad se debe a su excelente formabilidad y alta resistencia a la corrosión. Para lograr la estabilización de la fase austenita se agregan elementos estabilizadores como: Níquel, manganeso y nitrógeno; estos elementos también inhiben la formación de la fase ferrítica. Además se agrega cromo en un rango entre 16 y 26 %, con el fin de aumentar la resistencia a la corrosión hasta temperaturas aproximadas de 650 °C en una amplia variedad de ambientes químicos.

Otro de los elementos contienen es carbono un rango entre 0,03 y 0,08% su contenido es bajo con el fin de prevenir la formación de carburos de cromo sobre todo en el límite de grano, previniendo que se produzca la corrosión intergranular.

Los aceros austeníticos se subdividen en dos familias la serie 200 y la serie 300 en ambas se adiciona cromo, lo que las diferencia es que la serie 200 se adiciona manganeso y nitrógeno mientras que en la serie 300 se adiciona un alto contenido de níquel

Características principales de estos aceros son las siguientes:

- Alta resistencia a la corrosión.
- Se aumenta su dureza por medio de un trabajado en frío.
- Excelente factor de higiene y limpieza.
- Poseen la capacidad de trabajar bien a temperaturas extremas, bajas temperaturas (criogénicas) previniendo la fragilización, y altas temperaturas (hasta 925 °C).

Aceros inoxidable Austenoferríticos (Duplex).

Los aceros inoxidable dúplex llevan su nombre debido a que están constituidos microestructuralmente por dos fases, en cantidades aproximadamente iguales fase ferrítica y austenítica, los elementos de aleación que se agregan son cromo entre un 18 y 26 % aproximadamente, y níquel en un rango entre 4,5 y 6,5 %, la cantidad de níquel no es suficiente para estabilizar por completo la fase austenítica, esto permite la coexistencia de las dos fases. También se agregan otros elementos que facilitan el control en la configuración metalográfica y mejoran la resistencia a la corrosión. Como son: nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno.

Sus características principales son las siguientes:

- Son magnéticos.
- La estructura dúplex aumenta la resistencia a la corrosión bajo esfuerzos en ambientes con iones de cloruro.

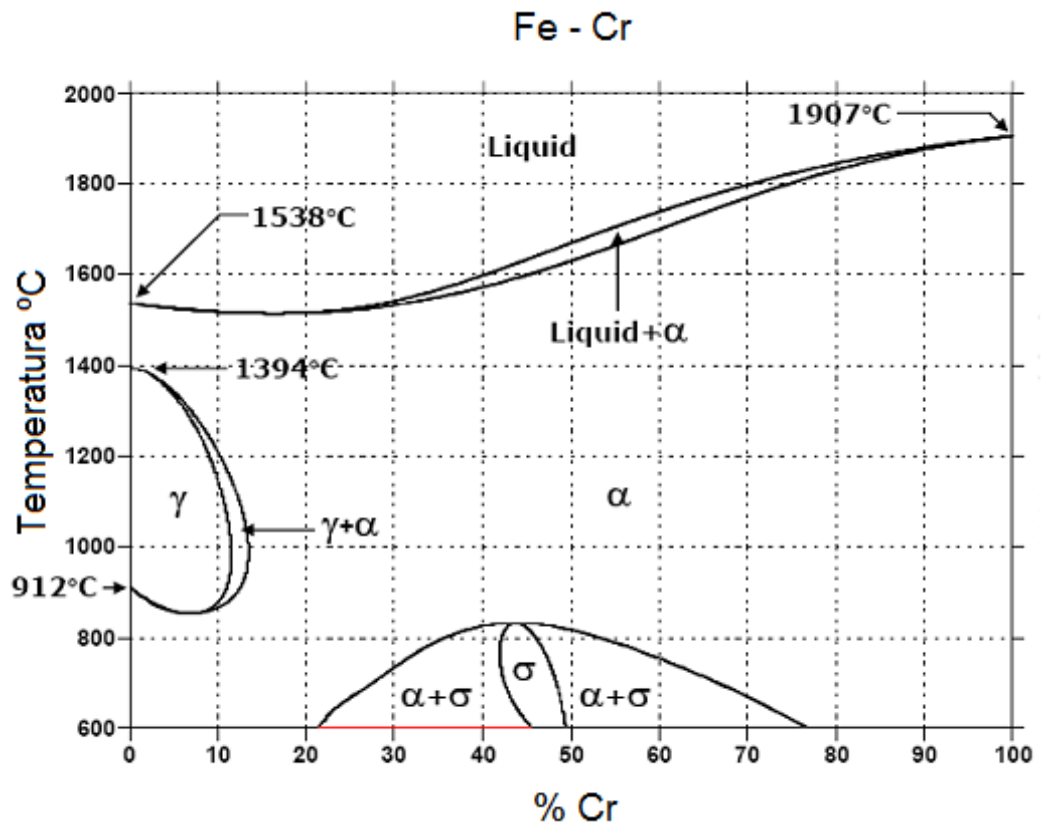
- Poseen una elevada resistencia mecánica alcanzando valores de límite elástico entre 700-900 MPa (el doble de límite elástico que los aceros inoxidables austeníticos) lo que representa en muchos casos un ahorro significativo en costos de material.

Aceros inoxidables martensíticos.

Estas aleaciones pertenecen a la serie 400, fueron desarrolladas con el fin de obtener aceros inoxidables resistentes a la corrosión y endurecibles por tratamiento térmico, son aceros inoxidables capaces de lograr una amplia variedad de durezas y resistencia mecánicas por medio de un tratamiento de temple y revenido.

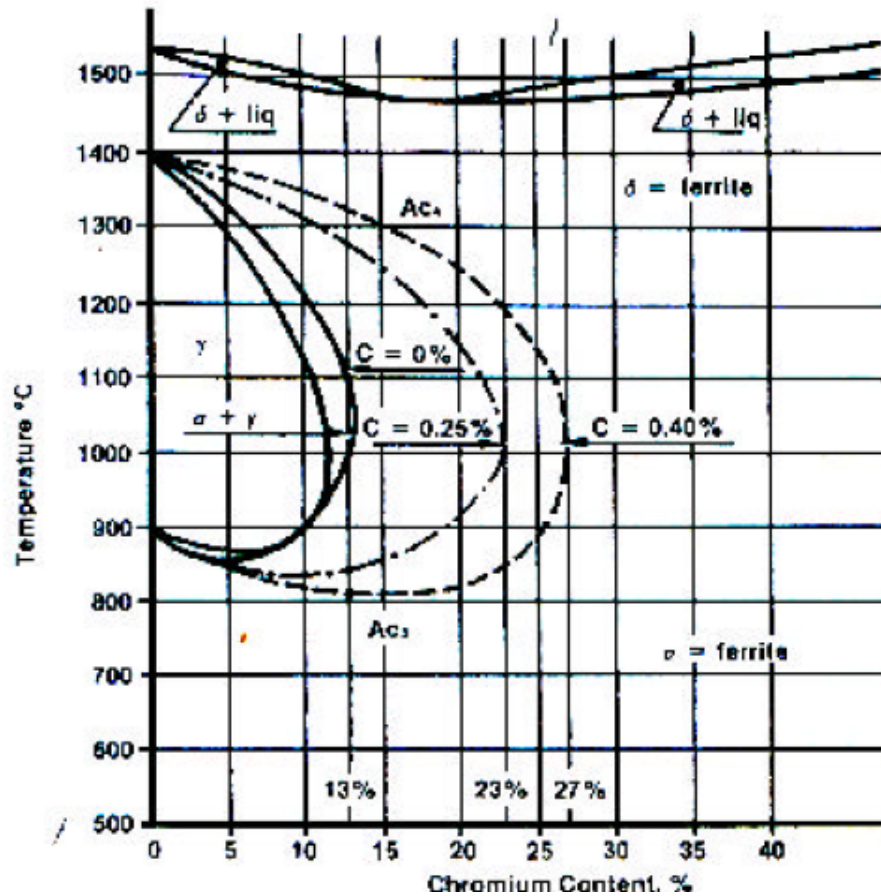
Los aceros inoxidables martensíticos tiene cromo como principal aleante en cantidades que varían entre 11% y 18%, carbono hasta 1.2% y en algunos casos pequeñas cantidades de otros elementos, especialmente azufre, aluminio y níquel. Estas aleaciones son templables por que al aumentar el contenido de carbono al sistema Fe-Cr (ver **Figura 3**), la austenita se vuelve más estable, esto se puede observar en la **Figura 4**, haciendo posible la transformación martensítica por medio un calentamiento hasta austenización completa y de un enfriamiento rápido en diversos medios de enfriamiento (aceite, agua y aire) bajo condiciones específicas de temperatura que van a depender de la composición química del acero inoxidable.

Figura 3. Sistema Fe -Cr



Modificación www.calphad.com

Figura 4. Influencia del carbono en el bucle austenítico



www.fi.net.ar

Sus características principales son:

- Tiene la capacidad de adquirir gran dureza después de ser enfriados rápidamente una vez austenizados

- Bajo contenido de aleantes por consiguiente son menos costosos dentro del grupo de aceros inoxidable
- Los aceros martensíticos de 16 a 18% de cromo y contenido de carbono de 0,60 a 1,20 % adquieren por temple durezas elevadas y son resistentes tanto a la corrosión como al desgaste.

Tabla 2 Composición estándar de algunos aceros inoxidable martensíticos.

AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
410	0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50-13.50
414	0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50- 13.50	1.25-2.50	...
416	0.15	1.25	0.060	0.150 min	1.00	12.00.-14.00	...	0.60
420	Sobre 0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	12.00-14.00
440 ^a	0.6 - 0.75	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-18.00	...	0.75
440B	0.75 - 0.95	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-18.00	...	0.75
440C	0.95 -1.20	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-18.00	...	0.75

Modificada Heat Treater's guide: Standard Practices and Procedures for steel, p 402

Aceros inoxidable endurecibles por precipitación

Los aceros inoxidable austeníticos no se pueden endurecer por medio de un tratamiento térmico, por lo cual pierden resistencia mecánica con el fin de obtener una excelente resistencia a la corrosión, mientras que los aceros inoxidable martensíticos tienen mejores propiedades mecánicas pero menor resistencia a la corrosión. Con el fin de combinar propiedades como son una alta resistencia mecánica así como una elevada resistencia a la corrosión, fueron desarrollados los aceros inoxidable endurecibles por precipitación. Estos aceros se diferencian de los aceros inoxidable anteriormente mencionados debido, a que contienen elementos (Nitrógeno, aluminio, cobalto, boro, titanio, cobre, niobio, fósforo), que forman compuestos intermetálicos con el resto de elementos de aleación.

El tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación para estas aleaciones se lleva a cabo de la siguiente manera; Realizando una disolución a altas temperaturas de los compuestos intermetálicos con el fin de obtener una solución sólida, posteriormente se somete a un enfriamiento rápido obteniendo así una disolución sobresaturada (estado metaestable). Finalmente mediante un tratamiento de envejecimiento se forman fases intermetálicas.

El endurecimiento por precipitación para los aceros inoxidable se logra mediante la reintroducción de carbono en la matriz y el desarrollo de matrices martensíticas de bajo carbono [3]. Con el transcurrir del tiempo estas aleaciones se fueron desarrollando hasta formar distintas clases como son: Austeníticas, semiausteníticas y martensíticas.

Aceros inoxidable endurecibles por precipitación martensíticas

Estos aceros se fabricaron con base en la composición del acero austenítico (18Cr-8Ni), con ciertas diferencias como son: la adición de pequeñas cantidades de carbono y una pequeña reducción en las cantidades de Cr, Mn y Ni.

El tratamiento térmico para estos materiales consiste en realizar una disolución en un intervalo de temperatura entre 1000 y 1060 °C, posteriormente se enfría al aire, formándose martensita por encima de la temperatura ambiente en un rango de 121°C y 38 °C, esta martensita es blanda aproximadamente de 30 HRC, finalmente se envejece entre 460°C y 650°C con el fin de precipitar compuestos de Niquel con aluminio, titanio, y columbio. Los tres últimos elementos

mencionados pueden encontrarse solos o en combinación y también se pueden formar carburos complejos. Después del tratamiento de envejecido sobre el material se logran durezas entre 40 HRC y 45 HRC, además se pueden conseguir una resistencia máxima a tensión de 1400 MPa. Cabe mencionar que la aleación AISI 455 que es la aleación que se investigó en este proyecto pertenece a este grupo de aleaciones endurecibles por precipitación.

Aceros inoxidables endurecibles por precipitación semi-austeníticos

Para estas aleaciones la temperatura de inicio de la transformación martensítica (M_s) se encuentra por debajo de la temperatura ambiente. Cuando estas aleaciones se enfrían desde 1060°C conservan su estructura austenítica la cual es blanda, dúctil y deformable.

En el caso de que la aleación contenga una cantidad suficiente de carbono, se logra la precipitación de los carburos de cromo aumentando la temperatura hasta 1000°C, esto empobrece la matriz y se produce martensita al enfriarse, debido a la disminución de cromo se eleva M_s de -18°C hasta una temperatura superior a la temperatura ambiente. Finalmente los ciclos de endurecimiento por precipitación, permiten desarrollar las propiedades finales para estos materiales.

Existen otros tratamientos térmicos para estas aleaciones lo cual demuestra su versatilidad en su tratamiento térmico. El primero consiste en enfriarlas por debajo de la temperatura de inicio de la transformación martensítica, posteriormente se realiza el envejecido. El segundo consiste en obtener martensita por medio de la aplicación de deformación mecánica, esto se puede mejorar o completar con refrigeración, seguida de envejecimiento; al final se consiguen resistencias mecánicas 15 % superiores que para el resto de aceros inoxidables.

Aceros inoxidables endurecibles por precipitación austeníticos

Son esencialmente aceros inoxidables de la serie 300, pero modificados en cuanto a que poseen contenidos más altos de Ni, Al y Ti para generar precipitados. Se pueden utilizar a temperaturas de servicio mas altas, y su estructura es una matriz austenítica sobresaturada.

2.2.2 GENERALIDADES SOBRE LA ALEACIÓN Tipo 420

Identificación:
Numero UNS: S42000

Tabla 3. Composición química del acero Tipo 420

Carbono (mínimo)	0.15 %
Fósforo (Máximo)	0.040 %
Silicio (Máximo)	1.00 %
Manganeso (Máximo)	1.00 %
Azufre (Máximo)	0.030 %
Cromo	12.00 a 14.00 %
Hierro	Balance

Modificada www.carttech.com

El acero Tipo 420 es un acero inoxidable martensítico, al realizar un temple y un revenido se obtiene una estructura martensítica revenida, la cual posee una alta resistencia tanto mecánica como al desgaste. La aleación es utilizada en diversas

aplicaciones como: cuchillería, válvulas, balineras, engranajes, herramientas dentales y quirúrgicas.

Tratamientos térmicos

Recocido

El recocido se realiza calentando la aleación a una temperatura uniforme en un rango entre (843 / 900 °C) y se enfría lentamente en el horno, se obtiene una dureza Brinell aproximada de 179 HB

Endurecimiento

El endurecimiento se lleva a cabo calentando el acero y sosteniendo la temperatura en un rango entre (1010/1066 °C), luego se enfría en aceite tibio o aire

Revenido

Revenido se logra incrementando la temperatura del acero inoxidable y sosteniéndole en un rango comprendido entre (179/600 °C), posteriormente se enfría al aire.

2.2.3 GENERALIDADES SOBRE LA ALEACIÓN CUSTOM 455

Identificación.

Numero UNS : S45500

Tabla 4 Composición química del acero Custom 455 ®.

Carbono (Máximo)	0.05 %
Fósforo (Máximo)	0.040 %
Silicio (Máximo)	0.5 %
Níquel	7.5 a 9.5 %
Cobre	1.5 a 2.5 %
Columbio + Tantaló	0.1 a 0.5 %
Manganeso (Máximo)	0.5 %
Azufre (Máximo)	0.030 %
Cromo	11.00 a 12.50 %
Molibdeno (Máximo)	0.5 %
Titanio	0.8 a 1.4%
Hierro	Balance

Modificada www.cratech.com

Reconociendo la necesidad de aleaciones con excelentes propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión en diversos ambientes atmosféricos, la empresa Carpenter desarrollo el acero inoxidable Custom 455 ®, un acero inoxidable endurecible por precipitación martensítico, en condición recocida esta aleación es relativamente blanda y conformable. Con un tratamiento sencillo de envejecimiento aumenta excepcionalmente la resistencia a la fluencia con una adecuada ductilidad y tenacidad.

Tratamiento térmico.

Tratamiento de solubilización

Se realiza elevando la temperatura de la aleación en un rango entre (816/843 °C), posteriormente se enfría rápidamente, bien sea en agua o al aire

Envejecido

La alta resistencia mecánica de la aleación Custom 455 ® se logra mediante el tratamiento de envejecido consiste en calentar el acero inoxidable en un rango entre (482/566 °C), se mantiene durante 4 horas y se enfría al aire.

2.3 MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE PUNTAS UTILIZADAS EN LA FIJACIÓN DE IMPLANTES DENTALES

Se han encontrado diversas aleaciones para la fabricación de puntas de fijación de implantes, pero como consecuencia de las condiciones de alta corrosividad se prefieren los aceros inoxidables. El acero inoxidable AISI 304 posee una excelente resistencia a la corrosión y adicionalmente presentó un comportamiento adecuado en los Instrumentos que trabajan en espacios reducidos [4]. Sin embargo, tiene ciertas desventajas como son: Baja resistencia al desgaste y poca retención de filo. Por los anteriores inconvenientes presentados se dejó de utilizar para la fabricación de las puntas de fijación de los implantes.

La aleación AISI 420 soluciona el inconveniente de la resistencia al desgaste y la retención del filo con la formación de una estructura martensítica. Es una aleación que tiene una excelente resistencia al desgaste y una buena resistencia a la corrosión, pero tiene una pobre tenacidad y resistencia a la fatiga. Sin embargo,

es posible modificar estas propiedades con ciertas condiciones en el tratamiento térmico. Con el propósito de solucionar los inconvenientes presentados por las aleaciones anteriores se propone la aleación endurecible por precipitación Custom 455, la cual posee una buena resistencia al desgaste, a la corrosión y una buena retención de filo.

Por consiguiente se hace necesario estudiar y establecer el tratamiento térmico de los aceros inoxidables AISI 420 y AISI 455. Con la finalidad de fabricar las puntas para la fijación de implantes dentales

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos se realizó fijando dos valores de durezas, esto se asumió teniendo en cuenta que la dureza de la aleación Ti6Al4V, en el caso de ser utilizado en tornillos hexagonales que fijan la corona a el implante es de 32 HRC, por consiguiente la punta de fijación del tornillo debe ser más dura con el fin de que la herramienta no pierda su filo y posea un mayor resistencia a la torsión y flexión, el rango de durezas conveniente es entre 38HRC y 42HRC, este rango se encontró en una investigación desarrollada por el centro de biomateriales de la universidad industrial de santander, debido a que durezas superiores pueden presentar menor resistencia a la torsión y pobre tenacidad, y durezas inferiores no tiene suficiente resistencia al afilamiento y al desgaste, por lo tanto se plantea determinar las condiciones apropiadas de tratamiento térmico para conseguir estos valores de dureza.

El diseño de experimentos consiste de tres probetas: muestra, contramuestra y testigo, por cada una de las condiciones de dureza y de estado de entrega, como se puede observar en las **Figura 5 y 6**, para los ensayos de flexión y torsión. Este diseño de experimentos se cumple para ambas aleaciones.

Figura 5 Diseño de experimentos para el ensayo de flexión Muestra (M), Contramuestra (C) y Testigo (T)

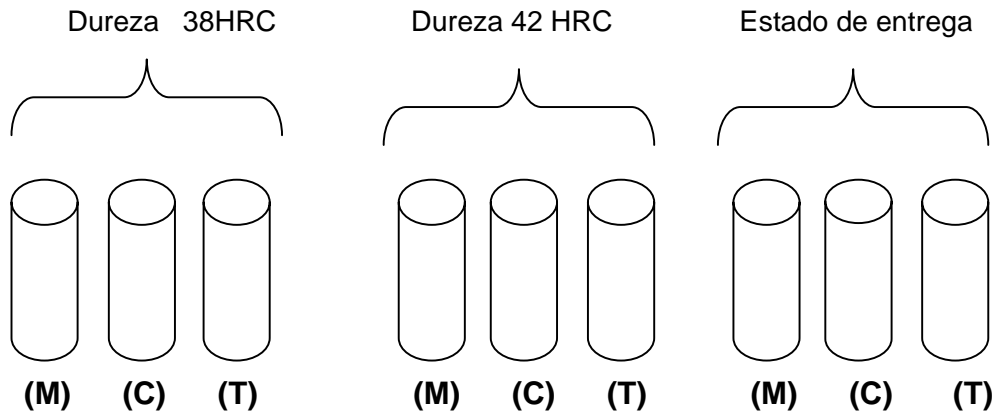
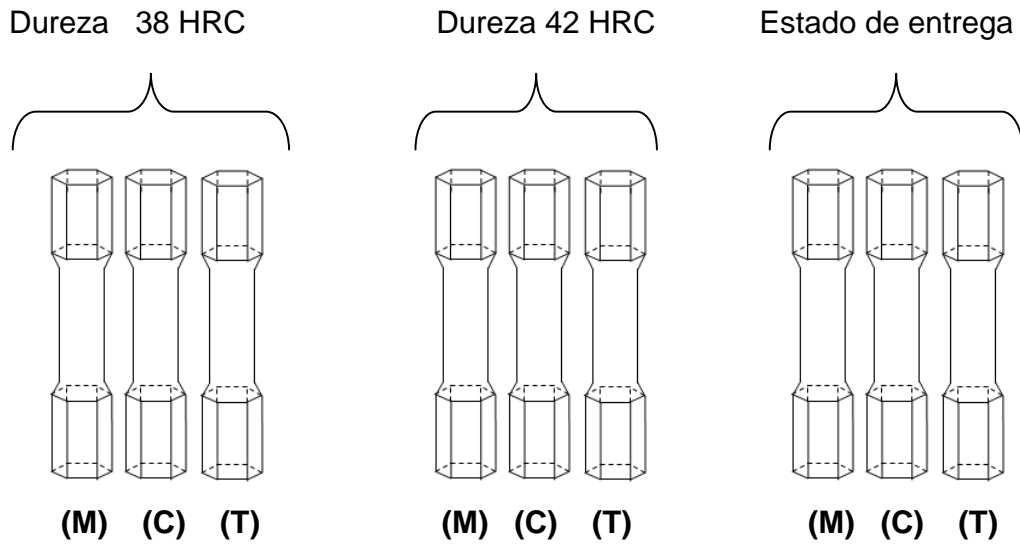


Figura 6 Diseño de experimentos para el ensayo de torsión. Muestra (M), Contramuestra(C) y Testigo (T).

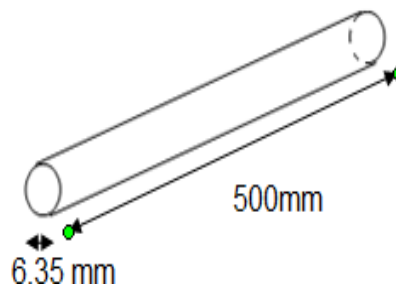


3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.

3.2.1 ESTADO INICIAL DE LOS MATERIALES

El Tipo 420 es un acero inoxidable martensítico mientras que el Custom 455® es un acero inoxidable endurecible por precipitación martensítico, su forma inicial o como se recibió por parte de la empresa Sandinox fué como: Barras sólidas redondas de 500 mm de largo y 6.35 mm de diámetro como lo muestra la **Figura 7.**

Figura 7. Medidas del material recibido.



3.2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS MATERIALES

Las composiciones de los aceros inoxidables entregadas por la empresa Sandinox, la del lote y de acuerdo a la norma ASTM, se puede observar en la **Tabla 5** y **6**. En ambas se aprecia que las composiciones químicas de las aleaciones son similares a la entregada por el fabricante, el lote y la norma ASTM, por lo tanto se puede decir que ambos aceros inoxidables cumplen los requisitos mínimos en cuanto a composición química exigidos por la norma ASTM A 276.

Tabla 5. Composición química del acero inoxidable Tipo 420.

Elementos	Fabricante	Norma ASTM A 276
Carbono (mínimo)	0,15 %	0,15 %
Fósforo (Máximo)	0,04 %	0,04 %
Silicio (Máximo)	1,00 %	1,00 %
Manganeso (Máximo)	1,00 %	1,00 %
Azufre (Máximo)	0,03 %	0,03 %
Cromo	12,00 a 14,00 %	12,00 a 14,00 %
Hierro	Balance	Balance

Tabla 6 Composición química del acero inoxidable Custom 455 ®.

Composición química del acero inoxidable Custom 455 ®			
Elemento	Fabricante	Norma ASTM 693	Lote
Carbono (Máximo)	0.05 %	0,05 %	0,01 %
Fósforo (Máximo)	0.040 %	0,040 %	0,004 %
Silicio (Máximo)	0.5 %	0,5 %	0,04 %
Níquel	7.5 a 9.5 %	7,5 a 9,5 %	8,32 %
Cobre	1.5 a 2.5 %	1,5 a 2,5	2,16 %
Columbio + Tantaló	0.1 a 0.5 %	0,1 a 0,5	0,27 %
Manganeso (Máximo)	0.5 %	0,5 %	0,06 %
Azufre (Máximo)	0.030 %	0,030 %	0,004 %
Cromo	11.00 a 12.50 %	11,00 a 12,5%	11,32 %
Molibdeno (Máximo)	0.5 %	0,5 %	0,03 %
Titanio	0.8 a 1.4%	0,8 a 1,4 %	1,22 %
Columbio	-	-	0,26 %
Nitrógeno	-	-	0,003 %
Hierro	Balance	Balance	Balance

3.2.3 ANÁLISIS METALOGRAFICO

El análisis metalográfico se realizó con base en la norma ASTM: “E 3-01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”. El procedimiento que se llevó a cabo fue el siguiente:

Corte y montaje de las probetas

Se cortaron probetas transversales y longitudinales, las medidas están descritas en la **Figura 8**. La cortadora utilizada fue una Metaserv (ver **Figura 9**) con el disco Metaserv grado HHS. Posterior al corte de las probetas se procedió a colocarlas en el limpiador ultrasónico marca Intertek (ver **Figura 10**) durante un tiempo de 3 minutos. Subsecuentemente se realizó el montaje de las probetas en bakelita (ver **Figura 11**) utilizando la maquina marca Metaserv **Figura 12**.

Figura 8. Corte de las probetas a) Probetas transversales b) Probetas longitudinales

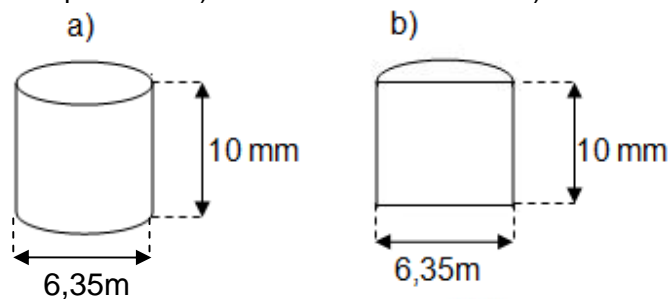


Figura 9. Cortadora metaserv



Figura 10. Limpiador ultrasónico



Figura 11. Probetas montadas en bakelita



Figura 12. Maquina metaserv para el montaje de las probetas en bakelita.



Desbaste y pulido fino

El desbaste de las probetas se llevo a cabo de forma manual en lijas carbimet: 240, 320, 400, 600 **Figura 13**. Luego se pasaron por el limpiador ultrasonico, con el fin de eliminar los residuos en la superficie.

El pulido fino se realizo en la maquina metasindex, primero en el paño Redcloth buehler y después en el paño Microcloth buehler ver **Figura 14**, en el primero se pulieron las probetas con alumina de las siguientes micras: 5 μm , 3 μm , 1 μm y 0.3 μm . Finalmente en el paño Microcloth buehler se pasaron las probetas por alúmina de 0.05 μm .

Figura 13 .lijas carbimet



Figura 14. Pulidora marca metasindex, Paños Microcloth buehler y Redcloth buehler



Ataque químico

La probetas fueron atacadas con el reactivo Vilella's¹ durante un tiempo de 20 s , estas se limpiaron con agua deionizada, y después se secaron. Finalmente se tomaron registros a diversos aumentos en el video microscópico digital KH 7700 Hirox.

3.2.4 ENSAYO DE DUREZA.

El ensayo de dureza se hizo en el durómetro marca Clark el cual tiene una precisión de $\pm 0,5$ ver **Figura 15**, siguiendo la norma ASTM: "**E 18 – 05 Standard test methods for rockwell hardness and rockwell superficial hardness of metallic materials**". Inicialmente se calibró el equipo con un bloque estándar de calibración, luego se midió la dureza Rockwell C con una carga de 160 kg-f, pero se observó que ambas aleaciones eran muy blandas, por consiguiente se optó por medir dureza Rockwell A con una carga de 60 kg-f. Las indentaciones se realizaron a una distancia entre cada una de aproximadamente 3 veces el diámetro de la misma con el fin de tomar una medida apropiada de la dureza, no se observaron

¹ Vilella's: Reactivo de ataque composición: 5 ml ácido clorhídrico, 1 g ácido pícrico y 100 ml de etanol.

ningún tipo de deformaciones alrededor de las huellas por lo tanto las medidas tomadas fueron satisfactorias.

Figura 15 .Durometro Clark

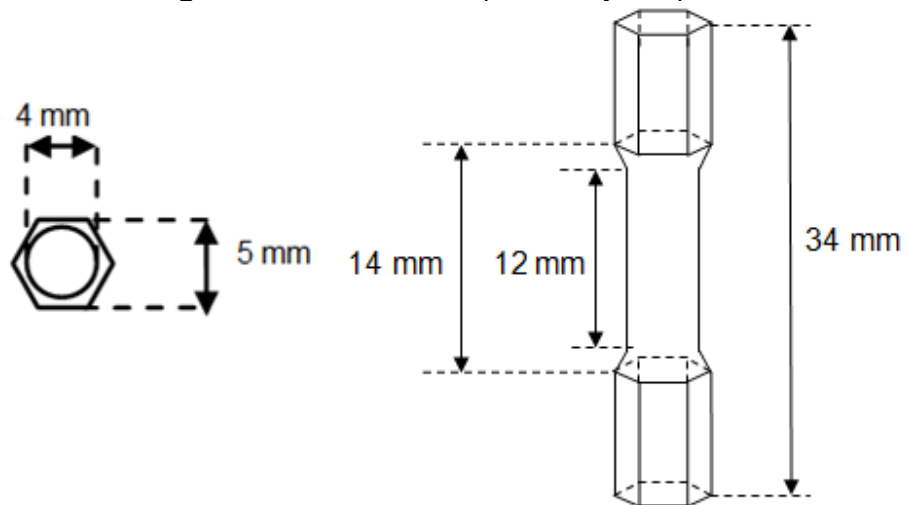


3.2.5 ENSAYO DE TORSIÓN.

3.2.5.1 DISEÑO DE LAS PROBETAS

En el ensayo de torsión no existe una norma que nos establezca dimensiones de las probetas, para poder realizar los ensayos fué necesario proponer un diseño de probeta, **Figura 16**. El diseño consiste de dos zonas: una zona cilíndrica y dos zonas hexagonales. La zona cilíndrica es la que se somete a torsión, mientras que las zonas hexagonales nos permiten ajustar las probetas para poder aplicar el torque. Las dimensiones de la parte cilíndrica se seleccionaron tomando como referencia puntas diseñadas por empresas como: LIFECORE, Nobel Biocare y soloimplantes.

Figura 16. Diseño de las probetas y sus partes



3.2.5.2 EQUIPOS PARA EL ENSAYO DE TORSIÓN

Dispositivo para la fijación del torque: Es una placa de acero A 32 cromada fijada por medio de tornillos de acero galvanizado, en el centro posee una copa hexagonal soldada, como se observa en la **Figura 17**.



Medidor de ángulo

Este dispositivo Marca Snap on Tools registra el ángulo durante la aplicación de un torque con una precisión de $\pm 2^\circ$, hasta un ángulo máximo de 360° .

Figura 18 . Medidor de ángulo



Torcómetro

El torcómetro Marca CEDAR DSW120 detecta el torque aplicado con una precisión de $\pm 0,5\%$, y mide hasta un máximo de torque de 12000 N.cm. Fue adquirido a la empresa imada con su respectivo certificado de calibración. Adicionalmente el equipo permite la descarga de las mediciones realizadas al computador, por medio de un cable CB205 y un software winwedge RS232

Figura 19. Torcometro.



3.2.5.3 REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE TORSIÓN

El ensayo de torsión se realiza con el fin de simular los torques a los que generalmente están sometidos los materiales, a ser usados como puntas para la fijación de implantes dentales durante el procedimiento implantológico, además se determinó la resistencia máxima a torsión, a esfuerzos cortantes y el módulo de corte de las aleaciones. Lo anterior se calculó con las siguientes formulas.

Esfuerzo de corte máximo

$$\tau_{\alpha} = \frac{3M_{\max}}{2\pi\alpha^3} \quad 1)$$

M_{\max} ; Esfuerzo de corte máximo.

α ; Radio de la probeta.

El módulo de elasticidad de corte se calculó de la siguiente forma, se observó dentro de la zona elástica una parte donde esta fuera lineal, y se calculó el valor del moduló con la formula 2) para todos los puntos dentro de esta finalmente se promediaron.

$$G = \frac{M_F L}{J \theta} \quad 2)$$

G ; Módulo de corte.

M_F ; Momento .

L ; Longitud efectiva de la probeta.

θ ; Angulo de torsión.

J ; Momento polar de inercia

Se colocó una copa de 5 mm sobre el dispositivo para la fijación del torque, luego se ubicó la probeta de ensayo y sobre ella una copa, después se insertaron sucesivamente otra copa de 12,7 mm, el medidor de ángulo y el torcometro siguiendo el esquema de la **Figura 20 y 21**, y se aplicó el torque en sentido horario hasta la rotura del material, se observó el valor de torque máximo, el torque hasta rotura y el ángulo máximo. Se adquirieron los datos por medio del software del equipo y se trazaron las curvas con el programa Microsoft office Excel.

Figura 20. Esquema del montaje de torsión.

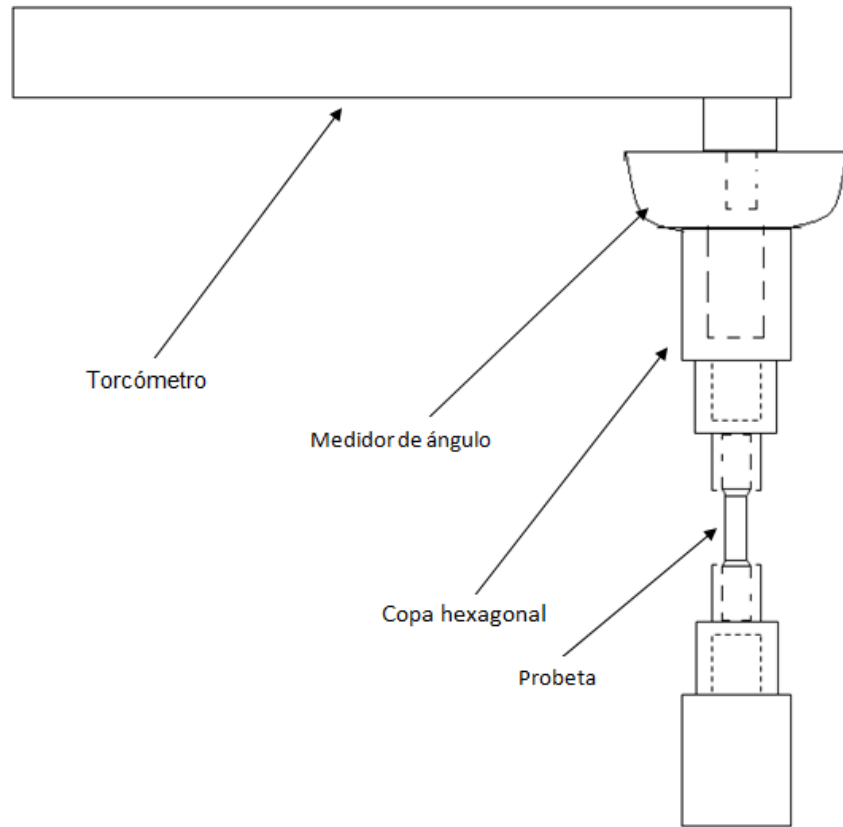


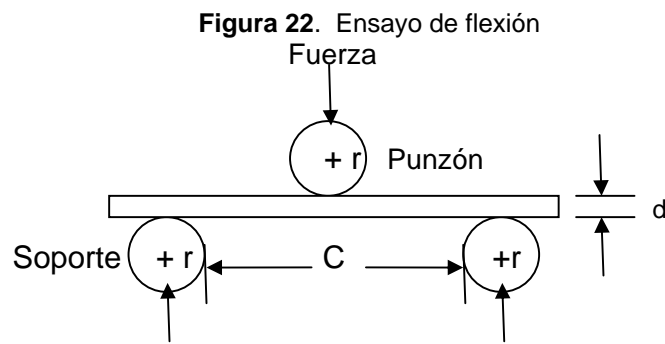
Figura 21. Ensayo de torsión.



3.2.6 ENSAYO DE FLEXIÓN

3.2.6.1 DISEÑO DE PROBETAS.

Las probetas fueron diseñadas con base a la norma **E290- 97 a Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility**, utilizando la fórmula siguiente, que se explica con la **Figura 22**:



$$C = 2r + 3d \pm d/2 \quad 3)$$

C ; Distancia entre soportes.

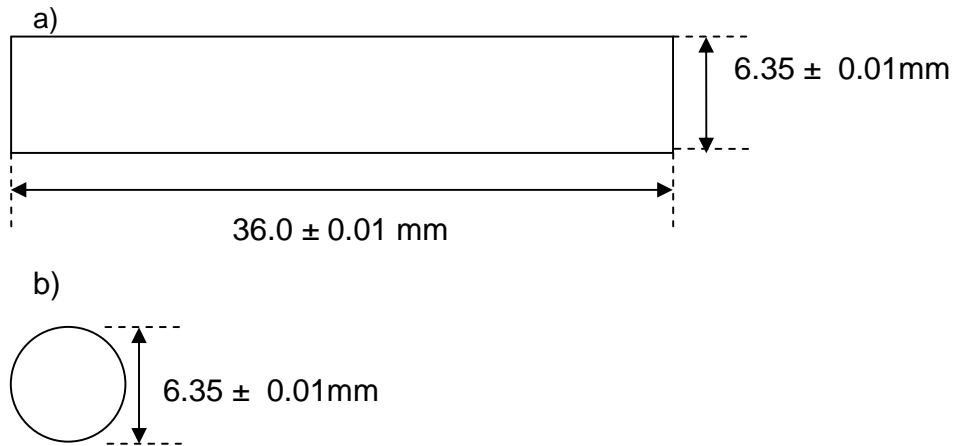
r; radio del punzón.

d; Diámetro de la probeta.

La distancia C entre apoyos calculada fué de 25 mm, sin embargo se incrementó la distancia con el fin de poder soportar las probetas sobre los apoyos.

El diseño para las probetas de flexión es en forma de barras redondas con las medidas observadas en la **Figura 23**.

Figura 23. Diseño de probeta, a) corte lateral y b) Frontal de las probetas de flexión



3.2.6.2 EQUIPO

Máquina universal de ensayo.

La máquina universal de ensayos utilizada es una Tinius olsen (**Figura 24**) que posee una celda de carga de 25 kN, la precisión para la celda de carga es de $\pm 0,5 \%$ y para la extensión es de $\pm 0,001 \%$, El equipo posee un software para la realización y registro de los datos llamado QMAT.

Figura 24. Máquina universal de ensayos



3.2.6.3 REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE FLEXIÓN.

El ensayo de flexión se realizó con el fin de emular las fuerzas flectoras a las cuales van a estar sometidos las puntas atornilladoras, durante el proceso de implantación dental. También se determinaron: El ángulo de flexión máximo, la máxima fuerza de flexión, esfuerzo máximo y el módulo de Young.

Se colocó la probeta sobre los dos soportes a una distancia de 25 mm y se procedió a bajar el punzon sobre la probeta, a la mitad de la distancia entre soportes y a una velocidad de 0,11mm/min , hasta la formación del ángulo de flexión máximo, todo el montaje se puede observar en la **Figura 25**.

Los cálculos de los esfuerzos y deformaciones unitarias se realizaron con las siguientes formulas.

$$\sigma = \frac{8PL}{\pi d^3} \quad 4)$$

σ ; Esfuerzo deflector.

P ; Carga.

L ; Longitud entre apoyos.

d ; diámetro.

$$\epsilon = \frac{6dD}{L^2} \quad 5)$$

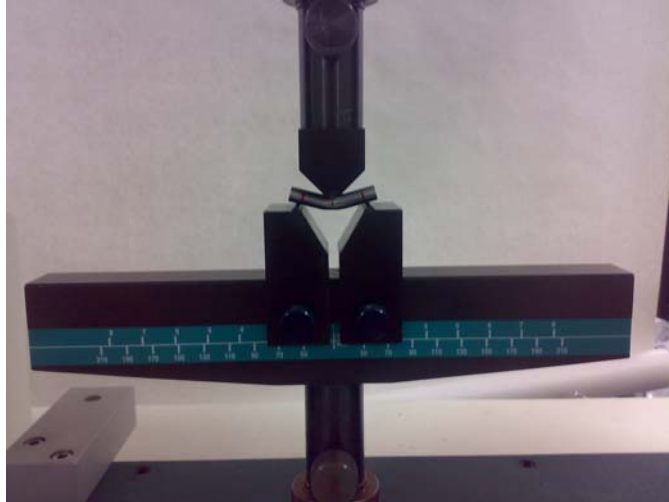
ϵ ; Deformación unitaria.

d ; Diámetro.

D ; Deflexión.

L ; Longitud entre apoyos.

Figura 25. Montaje de las probetas de flexión



3.3 TRATAMIENTO TERMICO

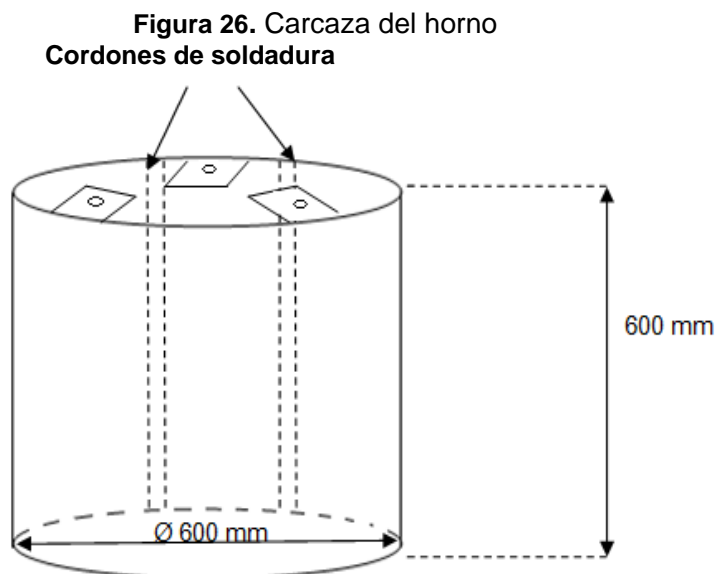
3.3.1 FABRICACIÓN DEL HORNO Y SU FUNCIONAMIENTO.

Para llevar a cabo los tratamientos térmicos en aceros inoxidable martensíticos y endurecibles por precipitación es necesario utilizar hornos de vacío con atmosfera controlada. Puesto que los tratamientos térmicos de endurecimiento para estos aceros, se realizan a temperaturas por encima de los 1050 °C, a elevadas temperaturas se facilita los procesos de oxidación, y se aumenta la probabilidad de reacción del oxígeno con el carbono generando descarburización o pérdida de carbono. La descarburización disminuye la templabilidad de los aceros inoxidable desmejorando sus propiedades mecánicas.

Por lo anterior es necesario controlar la atmósfera en el interior del horno durante la realización de los tratamientos térmicos, esto se logra realizando vacío en el interior del horno y agregando un gas inerte que puede ser nitrógeno o argón, para

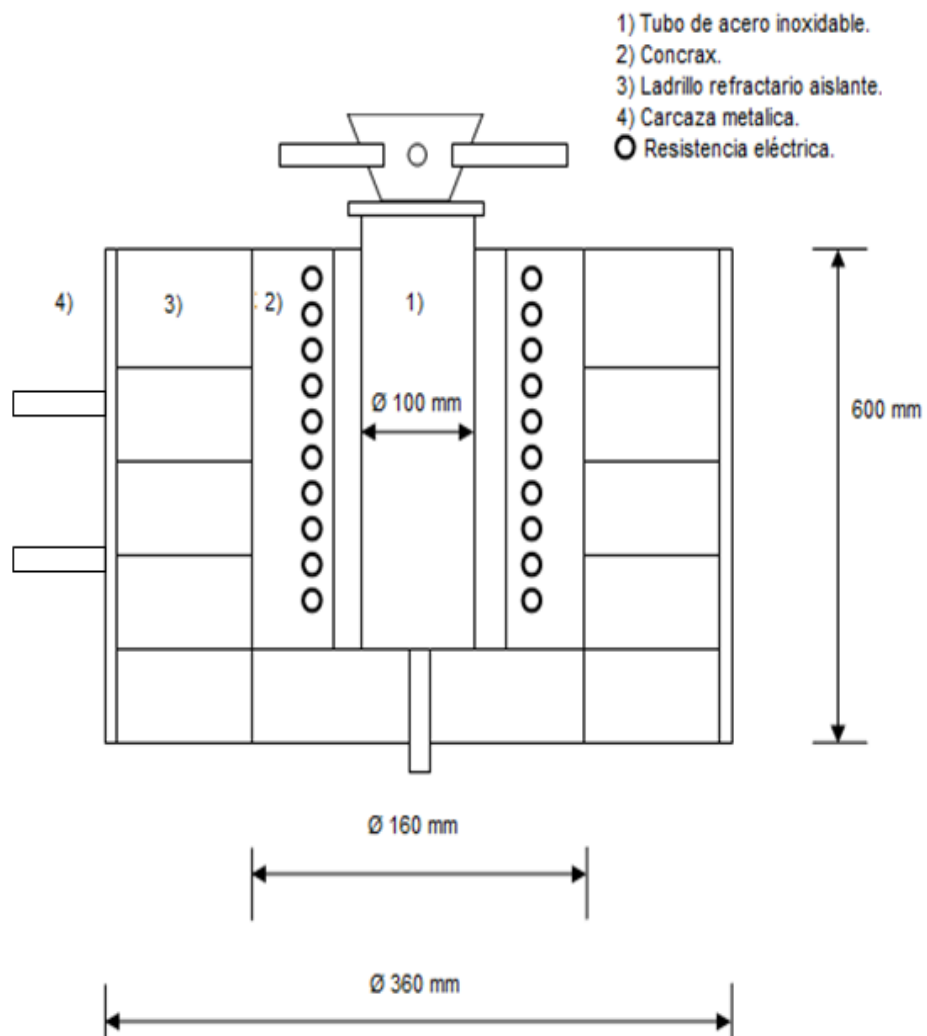
disminuir los efectos negativos de la oxidación y la descarburización sobre el material.

La carcasa del horno se fabricó de la siguiente manera, Inicialmente se roló y soldó una lámina laminada en frío de 4 mm, además se soldaron tres pedazos rectangulares de lamina laminada en frío con agujeros de 12 mm, a ellos se soldaron tuercas para poder fijar la tapa superior al horno hasta conseguir la forma cilíndrica que se observa en **Figura 26**. Posterior a la fabricación de la carcasa del horno fueron cortados círculos a partir de una lámina de acero para hacer las tapas del horno. Una se soldó en la parte inferior del horno.



Al finalizar la fabricación de la carcasa del horno se continuó con la parte interior del horno. Primero se fundió una resistencia eléctrica calibre 1.8 mm y 3960 w en concrax² 1500, subsiguientemente se colocaron los ladrillos refractarios aislantes, los ladrillos se acuñaron con lana mineral con el fin de aumentar la resistencia térmica, además se colocó un tubo de acero inoxidable dentro del concrax, finalmente se fijó la tapa superior del horno por medio de tornillos. Todos los elementos anteriormente mencionados se pueden ver en la **Figura 27**

Figura 27. Corte lateral del horno



² Concrax : Es un cemento refractario capaz de soportar altas temperaturas hasta unos 1500 °C

Para finalizar esta etapa en la fabricación del horno se colocaron los siguientes dispositivos cuya función describiremos inmediatamente:

Regulador de nitrógeno: su función es el control del flujo de nitrógeno que entra al horno.

Termocupla: Censa la temperatura dentro del horno.

Manómetro: Mide la presión en el interior del horno.

Llave de despresurización: Permite disipar rápidamente la presión dentro del horno en el caso de que haya una sobrepresión.

Llave para la regulación y control del vacío: esta llave conecta al horno con la bomba de vacío, como su nombre lo indica controla o regula el vacío dentro del horno del horno

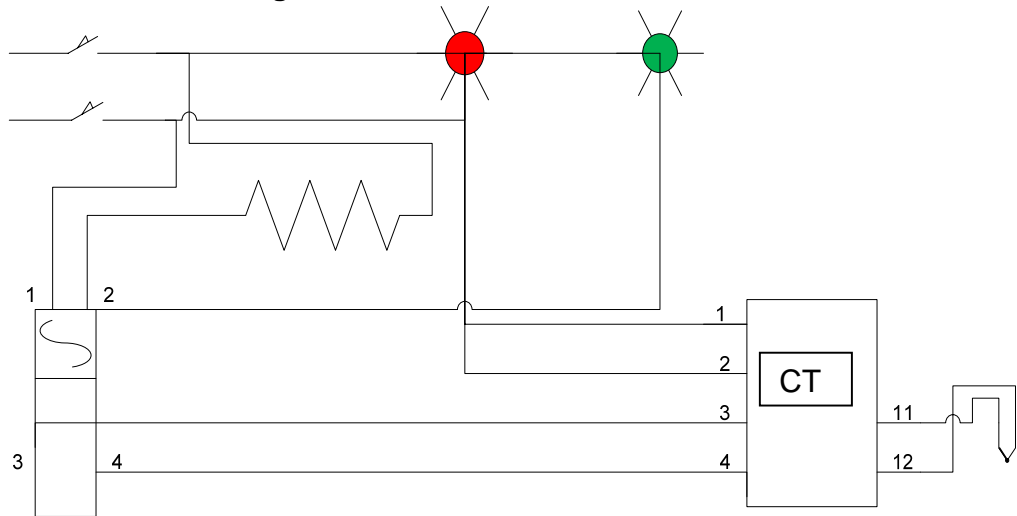
Todos los dispositivos mencionados con anterioridad se muestran en la **Figura 28**

Figura 28. Dispositivos del horno

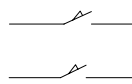



La segunda etapa consistió en el desarrollo de todo lo referente a la parte eléctrica y control de temperatura del horno, el circuito eléctrico que se siguió para el horno se observa en la **Figura 29** y se realizó con el programa microsoft Visio 2007


Figura 29. Circuito eléctrico del horno.

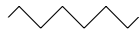


Los componentes eléctricos que se utilizaron en el circuito del horno se explican a continuación con su respectivo dibujo para facilitar su identificación dentro del circuito.

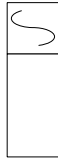
 Disyuntor termomagnético : Permite encender o apagar el horno.

 Bombilla roja: Indica que el circuito esta energizado.

 Bombilla verde: Señala que el rele de estado solido funciona, además cuando el horno se encuentra cerca de la temperatura seleccionada en el controlador, esta parpadea con el fin de indicar la proximidad de la temperatura.



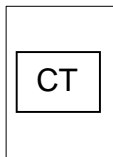
Resistencia eléctrica: es un material que incrementa su temperatura durante el paso de una corriente eléctrica



Relé de estado sólido: Abre o cierra el circuito permitiendo o interrumpiendo el paso de corriente eléctrica por la resistencia eléctrica, con el fin de controlar la temperatura bien sea aumentándola o manteniéndola, dependiendo de la señal que le envíe el controlador.



Termocupla tipo K : permite censar la temperatura dentro del horno , esta conectada con el controlador de temperatura.



Controlador de temperatura PID Max termo: este dispositivo como su nombre lo indica controla la temperatura enviando una señal al Relé de estado sólido para que permita o interrumpa el paso de la corriente eléctrica a través de la resistencia eléctrica, con la finalidad de incrementar o mantener la temperatura dentro del horno.

Con base en el anterior circuito se procedió a colocar todos los componentes eléctricos dentro de una caja metálica junto con los respectivos cable eléctricos, para materializar el circuito propuesto obteniendo como resultado lo que se observa en las **Figura 30 y Figura 31**. Además con el fin de disipar el calor que soporta el relé de estado sólido se colocó un disipador de calor en la parte posterior de la caja metálica.

Figura 30. Panel de control del horno
Bombilla verde Bombilla roja



Controlador de temperatura

Figura 31. Interior del panel de control
Disyuntor termomagnético



Relé de estado solido

El horno eléctrico funciona de la siguiente manera. Inicialmente se conecta el horno a un voltaje de 220 V , luego se permite el paso de corriente por medio del disyuntor termomagnético, por lo cual se encienden las dos bombillas y el controlador de temperatura, el controlador en su display superior marca la temperatura en tiempo real o en vivo que posee el horno, para el display inferior se coloca la temperatura que se desea alcanzar, entonces el controlador envía la señal al rele de estado sólido el cual permite el paso de corriente por la resistencia para iniciar el calentamiento, después cuando la temperatura que marca el controlador es cercana a la que se desea alcanzar el relé de estado sólido comienza a interrumpir el paso de la corriente con el fin de mantener la temperatura, la bombilla verde comienza a parpadear avisando la proximidad de la temperatura.

3.3.2 TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE LA ALEACIÓN CUSTOM 455.

Tratamiento de Solubilización

Inicialmente se realizó el tratamiento de solubilización con el fin de partir de un material con la misma condición. Este tratamiento se efectuó de la siguiente manera: las probetas se colocaron en el horno, se hizo vacío hasta que el manómetro marcara una presión de 1 Psi y se agregó 1 Psi de presión de nitrógeno, luego se incrementó la temperatura a 850 °C, y se sostuvo por 1 hora, al final se sacaron las probetas del horno, se enfriaron en agua, y se determinaron las durezas de las probetas solubilizadas.

Tratamiento de envejecido

La temperatura seleccionada para realizar el tratamiento de envejecido fue 480 °C, esto se debe a que inicialmente se utilizó la temperatura de 566 °C durante 4h y se observó que el material no varió la dureza; es posible que se sobre-envejeciera,

debido a lo anterior se procedió a utilizar una temperatura de 480°C y con una atmósfera de 1Psi variando el tiempo de envejecido para: 1h, 2h, 3h, 4h y 5h. Esto se realizó con la finalidad de observar el cambio de dureza con respecto al tiempo hasta determinar las condiciones apropiadas para conseguir las durezas de 38 HRC y 42 HRC. La dureza de 42 HRC se encontró para 2 h de tiempo de envejecido y la de 38 HRC necesitó un tiempo de 5 h.

3.3.3 TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE LA ALEACIÓN TIPO 420.

Tratamiento de temple

Para el tratamiento de temple se ensayaron dos temperaturas 980°C y 1000°C. Se escogió la temperatura de 1000°C, debido a que luego de realizar ensayos preliminares, se encontraron valores de dureza mucho más altos.

El temple se realizó de la siguiente forma: se colocaron las probetas dentro del horno, se procedió a realizar vacío en el interior del horno hasta obtener un 1 Psi de presión, se adicionó 1 Psi de nitrógeno, y se incrementó la temperatura hasta 1000 °C y se mantuvo durante 20 min, se sacaron las probetas del horno y se enfriaron con un ventilador, luego se determinó la dureza.

Tratamiento de revenido

El tratamiento de revenido se realizó de forma similar lo único que cambió fue la temperatura a 570 °C, y que se realizó para dos tiempos de sostenimiento: dos horas y dos horas y media. Las probetas se sacaron al aire y se determinó su dureza.

3.3.4 ANALISIS METALOGRAFICO PROBETAS TRATADAS TERMICAMENTE.

El procedimiento que se siguió fue el mismo que para las probetas en estado de entrega del literal **3.2.4**

3.3.5 ENSAYO DE FLEXIÓN SOBRE PROBETAS TRATADAS TERMICAMENTE.

Las probetas fueron ensayadas de forma similar a las probetas en estado de entrega, se obtuvieron los resultados en hojas de cálculo en Excel y se trazaron las gráficas respectivas para cada uno de los materiales y distintas condiciones de dureza

Figura 32. Probetas tratadas térmicamente ensayadas a flexión



3.3.6 ENSAYO DE TORSIÓN SOBRE PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE

El ensayo de torsión se realizó siguiendo el mismo proceso que para las probetas en estado de entrega.

Figura 33. Probetas tratadas térmicamente ensayadas a torsión



4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1 ANÁLISIS METALOGRÁFICO.

4.1.1 ANÁLISIS METALOGRAFICO DEL ACERO 420 EN ESTADO COMO SE RECIBIÓ.

La microestructura del acero inoxidable Tipo 420, se reporta en las **Figuras 34 y 35**. Se puede observar, en ellas, granos equiaxiales claros de la fase ferrita y precipitados de color brillante (carburos) ambos están marcados con círculos rojos y azules respectivamente. El tamaño de grano ASTM de la ferrita fué de 7,5 grado G . Lo cual corresponde a un tamaño de grano pequeño.

Para poder explicar la formación de la fase ferrita y de los precipitados, se debe tener en consideración dos factores muy importantes: la composición química y el tratamiento térmico realizado sobre la aleación.

En la composición química del acero que nos entrega la empresa *carpenter* existen dos elementos relevantes el contenido de carbono 0,15 % y de cromo (12 – 14%). El hierro en combinación con el carbono forma la fase ferrítica a temperatura ambiente, para este contenido de carbono en el caso que no existan otros elementos que permitan la estabilización de otras fases a temperatura ambiente, y de que la velocidad de enfriamiento no sea lo suficientemente alta para la formación de otras fases como martensita.

El contenido de cromo favorece la formación de ferrita, es un elemento fuertemente formador de carburos [5], que pueden ser los precipitados observados en las **Figuras 34 y 35**, es posible que sean de la forma $M_{23}C_6$ [6], este tipo de carburos son ricos en cromo, lo anterior se puede corroborar con las secciones isotérmicas del diagrama Fe-Cr-C **Figura 36**, en donde se encuentra estable para

el acero a una temperatura muy cercana a la de recocido como lo marca el círculo rojo sobre el diagrama.

El acero fué sometido a un tratamiento térmico de recocido, el cual consiste en calentar el material a una temperatura de 900 °C y mantener por 20 minutos, luego se deja enfriar en el horno, por consiguiente la velocidad de enfriamiento es lenta, de esta manera a pesar de ser un acero inoxidable martensítico no se va a presentar martensita bajo estas condiciones de enfriamiento, además se da mayor tiempo para la formación de los carburos principalmente los ricos en cromo, debido a lo anterior estas aleaciones no se emplean directamente en su forma recocida, puesto que la mayor parte del cromo reacciona con el carbono y forma carburos, disminuyendo de forma directa la inoxidableidad de la aleación [7].

Figura 34. La Microestructura del acero inoxidable Tipo 420 en estado recocido corte longitudinal a 1400 x, atacada con solución Vilella's. los círculos rojos y azules denotan la fase ferrita y los carburos respectivamente.

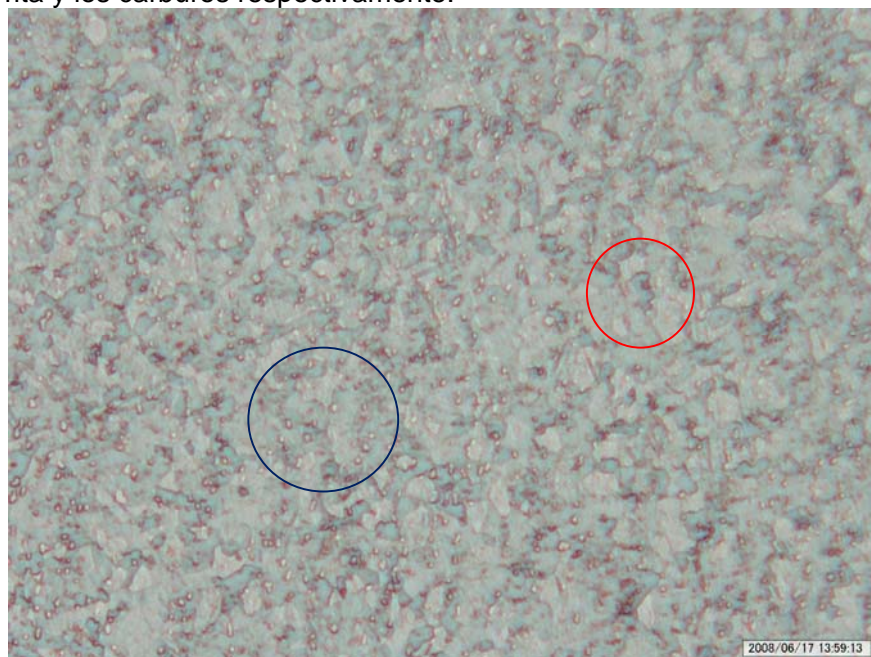


Figura 35. Microestructura del acero inoxidable Tipo 420 corte transversal en estado recocido a 1400 x, atacada con solución Vilella's. Los círculos rojos y azules denotan la fase ferrita y los carburos respectivamente.

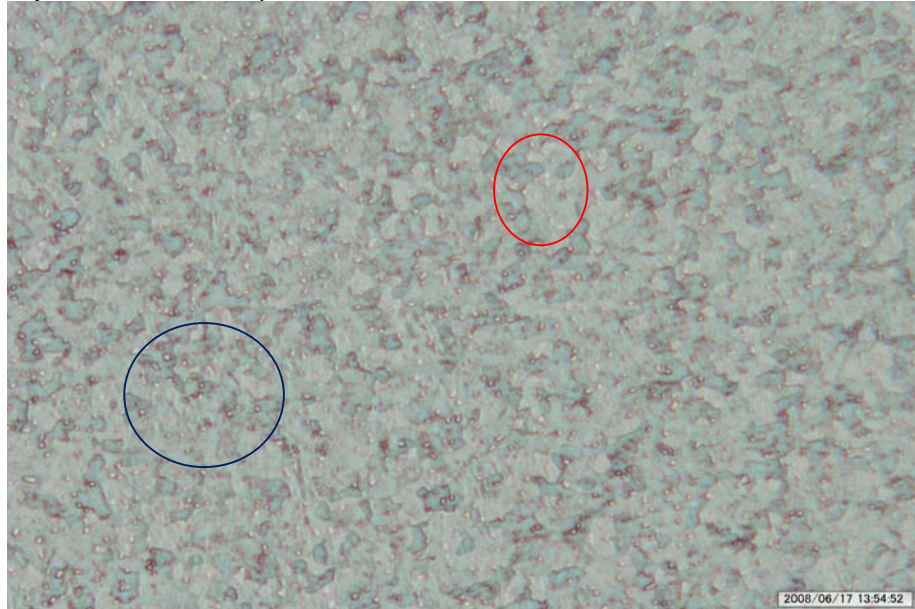
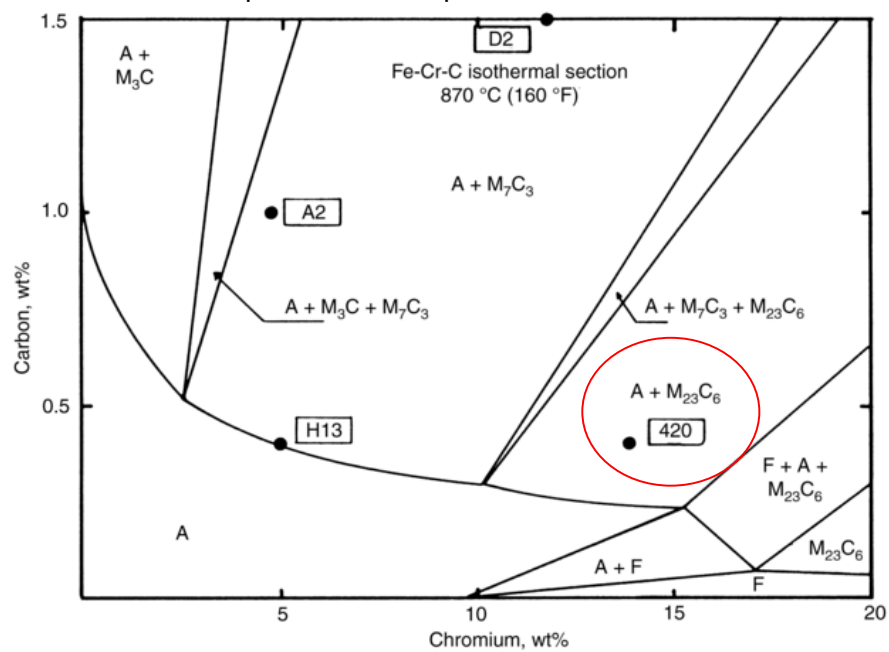


Figura 36. Sección isotérmica Fe-Cr-C a 870 °C. El círculo rojo marca los carburos que se forman para el acero Tipo 420 en estado recocido



WOODYATT L.R. y KRAUSS G., *Iron-Chromium-Carbon System at 870 °C*, *Metall. Trans. A*, Vol 7, 1976, p 983–989

4.1.2 ANÁLISIS METALOGRÁFICO DEL ACERO CUSTOM 455 EN ESTADO COMO SE RECIBIO.

Las microestructuras observadas en las **Figuras 37 y 38** tanto longitudinal como transversal del acero *Custom 455*, muestra una estructura martensítica, propia de aceros inoxidables endurecibles por precipitación martensíticos en estado solubilizado. Esto se debe principalmente a los elementos de aleación y al tratamiento térmico.

Con base en la composición química entregada por la empresa, los elementos que se encuentran en mayor proporción como : cromo y níquel, determinan la estabilización de la austenita a la temperatura del tratamiento de solubilización, como se observa en el diagrama ternario de la **Figura 39**, de el se puede decir que la austenita es estable para la temperatura de 850 °C, a esta temperatura se disuelven los compuestos intermetalicos y el carbono solubiliza en la austenita hasta obtener una solución sólida, luego el acero se enfría rápidamente al aire o en agua con la finalidad de obtener una disolución sobresaturada (Estado metaestable), como consecuencia del enfriamiento rápido bien sea con agua o aire se deforma la matriz austenitica formando una estructura martensitica de bajo contenido de carbono. A su vez los compuestos intermetalicos quedan disueltos en la matriz , para su posterior precipitación durante el tratamiento de envejecido

En las **Figuras 40 y 41** se observan precipitados. Estos por su forma cubica y su color amarillo parecen ser nitruros de titanio [NTi] [8] o pueden ser carbonitruros de titanio [Ti(C,N)], debido a que su color no es lo suficiente intenso por la adición del carbono y su forma en algunos casos no es completamente cúbica. Lo que pudo haber sucedido para que se formaran estos precipitados, es que durante la fabricación del material al agregar el titanio a la aleación, este se combinó con el carbono y el nitrógeno elementos con los cuales tiene una gran afinidad formando estos precipitados.

Figura 37. Microestructura del acero inoxidable Custom 455 corte transversal, en estado como se recibió a 1400 x, atacada con solución Vilella's. El círculo rojo denota la martensita

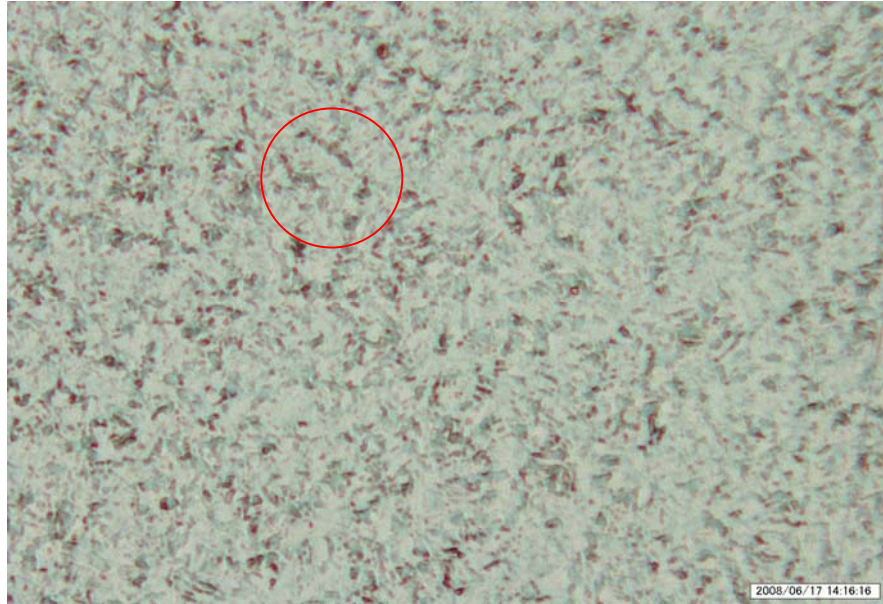


Figura 38. Microestructura del acero inoxidable Custom 455 corte longitudinal, en estado como se recibió a 1400 x, atacada con solución Vilella's. El círculo rojo denota la martensita

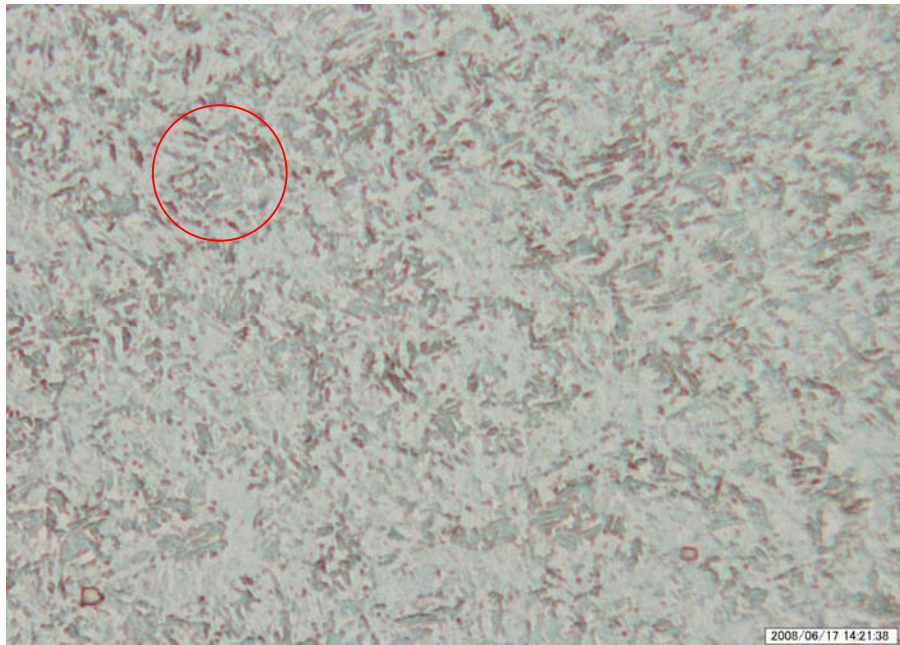
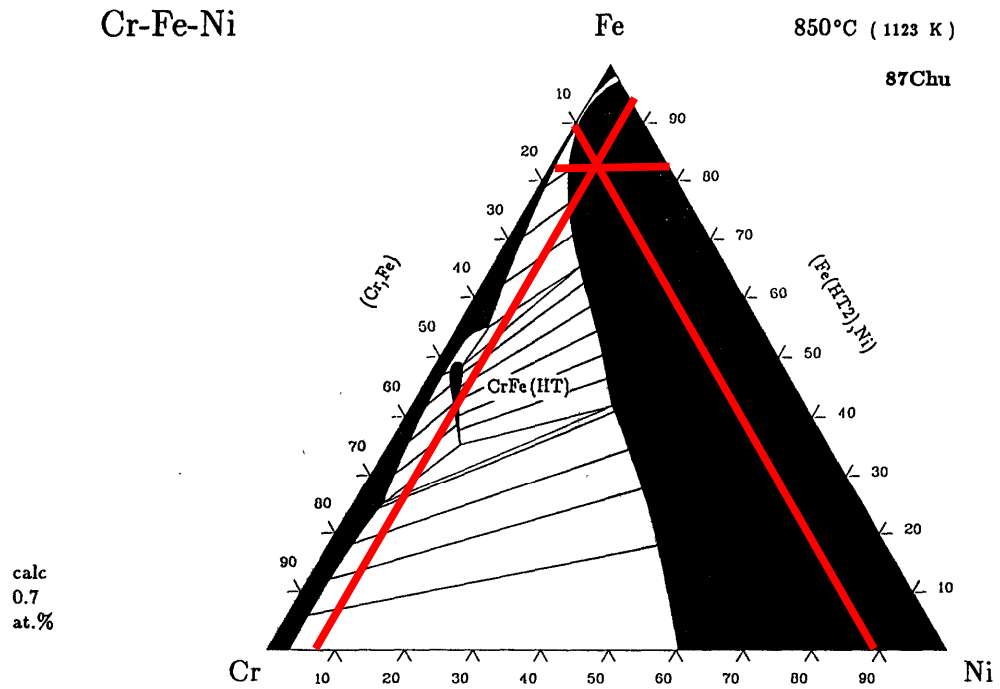


Figura 39. Diagrama ternario Fe-Cr-Ni

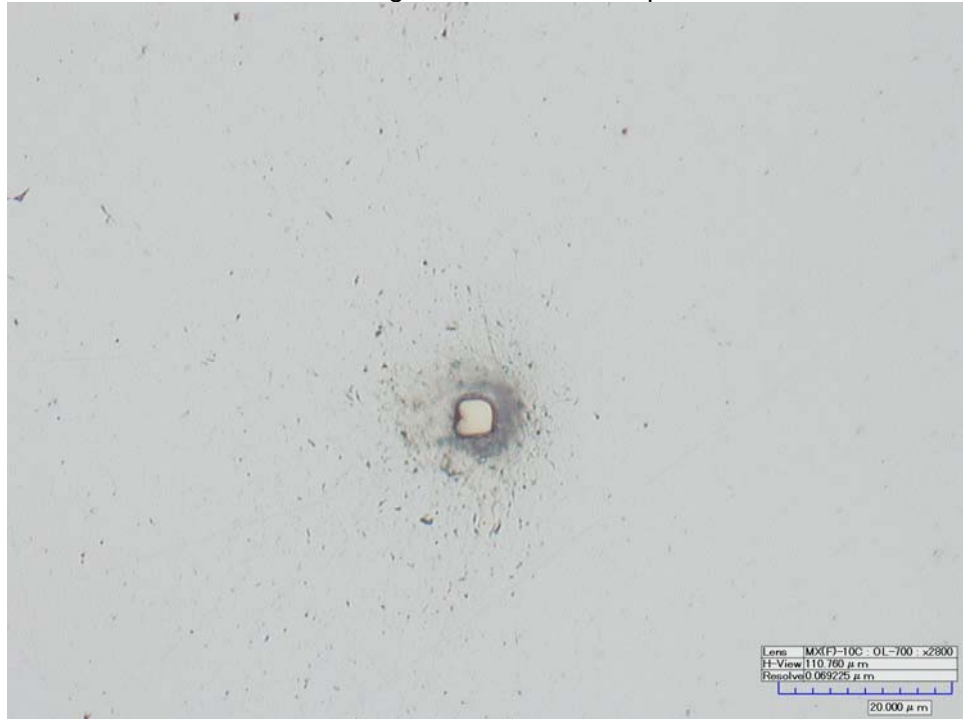


Handbook of ternary phase Diagram

Figura 40. Precipitados presentes en el acero inoxidable *Custom 455* corte transversal en estado de entrega, a 2800 x sin ataque.



Figura 41. Precipitado presente en el acero inoxidable Custom 455 longitudinal en estado de entrega, a 2800 x sin ataque.



4.2 RESULTADOS ENSAYO DE DUREZA PARA PROBETAS EN ESTADO COMO SE RECIBIÓ.

Tabla 7. Ensayo de dureza para la aleación Tipo 420 en estado como se recibió.

Corte	Longitudinal (HRA) $\pm 0,5$	Transversal (HRA) $\pm 0,5$
	60	56
	58	56
	58	56
Promedio	58,6	56

Tabla 8. Ensayo de dureza para la aleación Custom 455 en estado como se recibió

Corte	Longitudinal (HRA) $\pm 0,5$	Transversal (HRA) $\pm 0,5$
	67	66
	68	67
	67	67
Promedio	67,3	66,6

La dureza reportada en la bibliografía para la aleación Tipo 420 es de 195 HBR [9] al convertirla a dureza Rockwell A equivale a 56,4 HRA, lo cual es similar a las durezas promedio reportada en el ensayo 58,6 HRA en el corte longitudinal y 56 HRA para el corte transversal.

Para el acero Custom 455 se encontró en la bibliografía que este material en estado de entrega tiene una dureza de 31HRC [10] que equivale a 65,8 HRA, comparándolo con las durezas promedio para el corte longitudinal 67,7 HRA y transversal 66,6 HRA son valores similares.

Ambos materiales desde el punto de vista de durezas Rockwell A fueron recibidos de acuerdo a lo encontrado en la bibliografía [9] y [10].

La dureza para el acero Custom 455 es superior a la del Tipo 420 en estado como se recibió. Esto se debe a lo reportado en la microestructura la estructura martensíticas aunque sea de muy pobre contenido de carbono, posee mayor resistencia a la penetración que una estructura ferrítica mas carburos .

4.3 RESULTADOS ENSAYO DE TORSIÓN PARA LAS PROBETAS EN ESTADO COMO SE RECIBIÓ

4.3.1 ENSAYO DE TORSIÓN *CUSTOM 455* EN ESTADO COMO SE RECIBIÓ.

Figura 42. Grafica Torque – Angulo *Custom 455*

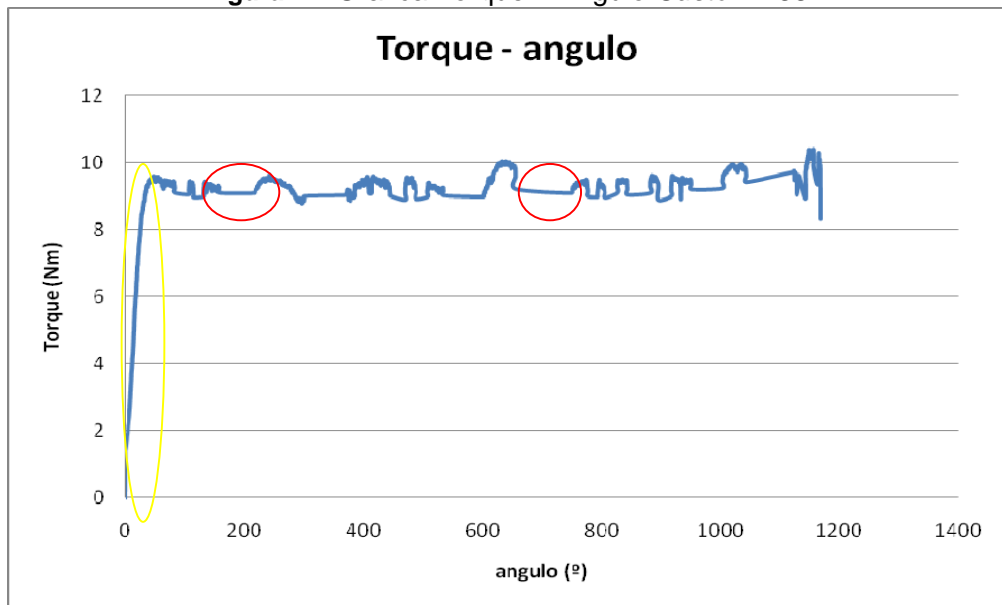


Figura 43. Grafica Torque – Angulo *Custom 455*.

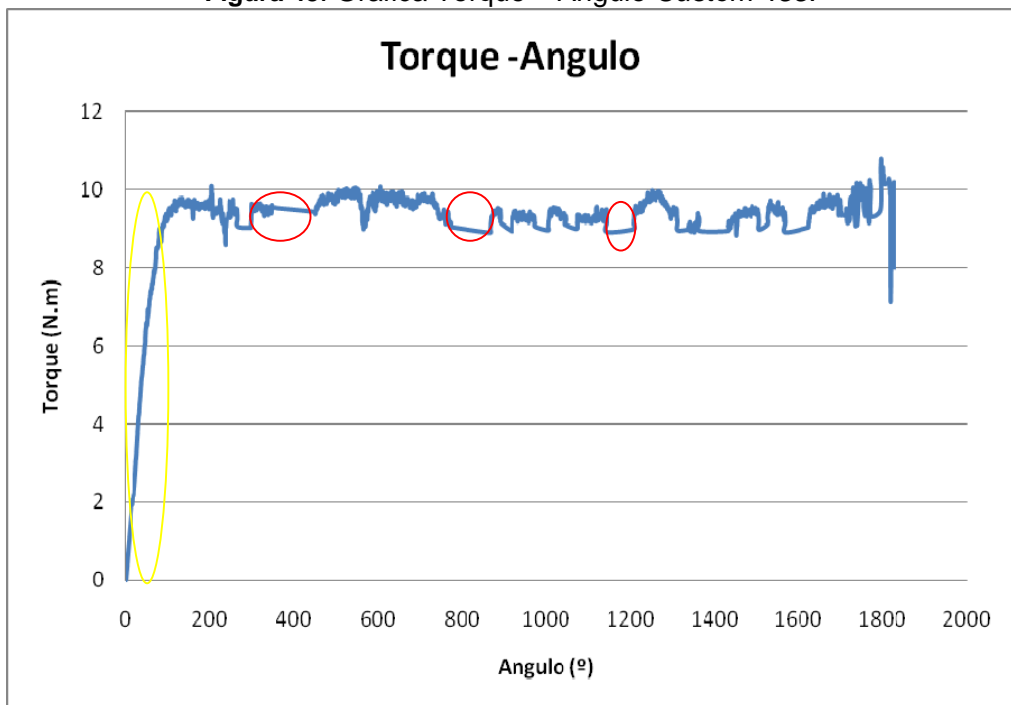


Tabla 9 . Resultados ensayos de torsión Custom 455 en estado como se recibió.

Torque maximo (N.m)	Torque de fluencia (N.m)	Angulo de ruptura (°)	Esfuerzo último de Corte (MPa)	Módulo de corte (GPa)
10,595	9,66	1500	632,34	9,5

Los valores reportados en la tabla son el resultado del promedio de los ensayos

Los efectos de la aplicación manual del torque y la alta sensibilidad del torcómetro se evidenciaron en las gráficas de torsión **Figura 42 y 43** para ambas probetas, la aplicación del torque de forma manual puede acarrear un problema una velocidad de torque superior e inferior sobre la probeta ensayada, lo cual generó una clara diferencia entre las dos zonas elásticas para cada una de las curvas esto se nota con los círculos amarillos trazados sobre las graficas. Lo anterior tuvo repercusiones directas en el cálculo del módulo de corte el cual varió significativamente para cada una de las probetas ensayadas.

En la zona plástica se observaron la presencia de picos de descenso como resultado de la alta sensibilidad del equipo, el cual por su alto ángulo de ruptura requería de cambiar de mano para poder completar la vuelta y a la vez mantener la verticalidad de la probeta, durante este cambio el equipo descargaba también este valor de torque erróneo generando estos picos de descenso de torque los cuales no son consistentes con el comportamiento regular de la curva torque – ángulo para los materiales en general, esto se observa en los círculos rojos trazados sobre las graficas. Cabe mencionar que para este ensayo no existe una norma que nos permita mejorar la reproducibilidad del mismo.

Este acero en estado solubilizado presentó una alta ductilidad en torsión, como se observa en las **Figuras 42 y 43**. Las cuales presentan una amplia zona plástica, además los ángulos de ruptura son altos como se puede notar en la **Tabla 9**, esto se respalda observando la superficie de ruptura de las probetas la cual es plana, lo que es propio de aleaciones dúctiles a esfuerzos cortantes. En la superficie de las

probetas se observan bandas como resultado de la gran deformación plástica. La razón por la cual se observó una gran ductilidad de la aleación en torsión se debe a la presencia de una martensita de bajo contenido de carbono, como se mostró en el análisis microestructural, esta se deforma plásticamente en torsión con gran facilidad.

En cuanto al torque máximo y el esfuerzo último al corte para ambas probetas en estado solubilizado no se notaron diferencias significativas entre una probeta y la otra como se puede ver en la **Tabla 9**. Observamos que en este material se cumple aproximadamente la relación con respecto al UTS³. El acero Custom 455 en condición solubilizada tiene un valor de 1000 MPa. Si se multiplica este valor por 0,57 se obtiene un valor aproximado de 570 MPa, comparando este valor con el promedio obtenido para la aleación de 632,34 MPa se puede decir que cumple aproximadamente con esta relación de los aceros en general entre la resistencia máxima a tracción y torsión.

Este material como tal cumple con los requisitos necesarios en cuanto a resistencia al torque que deben tener las puntas atornilladoras de implantes dentales, dado que a estas se les aplica un torque entre 0,13 N.m hasta 0,7 N m, el torque de fluencia que resiste el material es muy superior, sin embargo la dureza no es lo suficientemente alta, para que sirva como punta para fijación de implantes dentales. Por lo cual se justifica su tratamiento térmico.

³ UTS; ultimate Tensile Strength; Resistencia última a la tracción

4.3.2. ENSAYO DE TORSIÓN TIPO 420 EN ESTADO COMO SE RECIBIÓ.

Figura 44. Grafica Torque – Angulo para acero Tipo 420

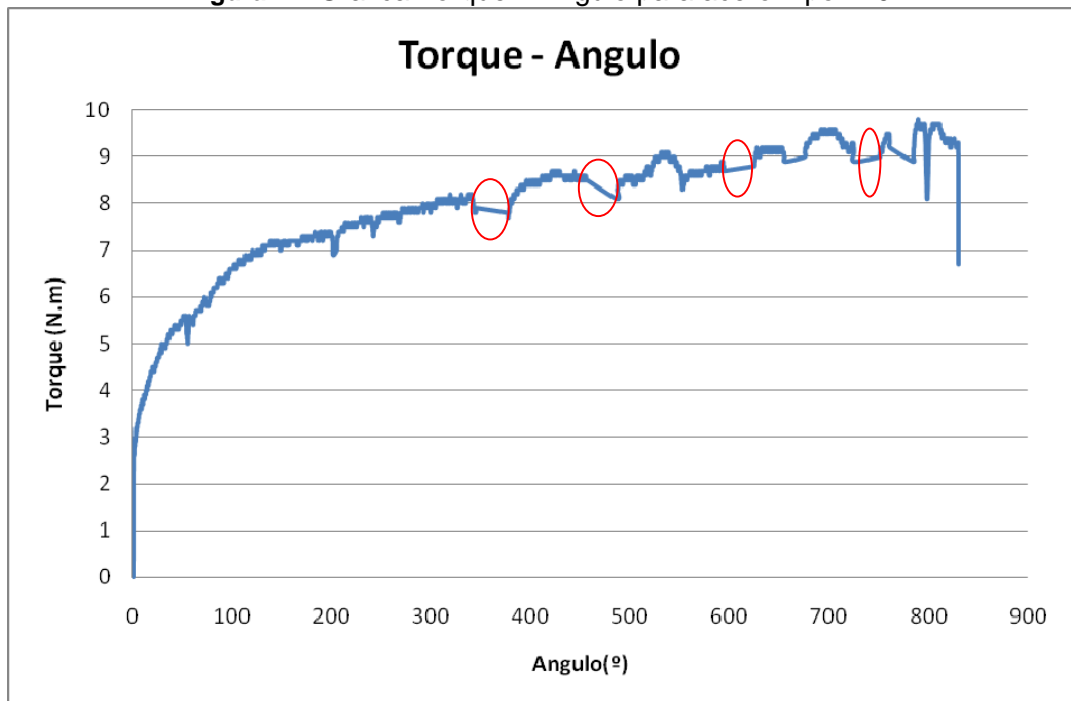


Figura 45. Grafica Torque – Angulo para el acero Tipo 420

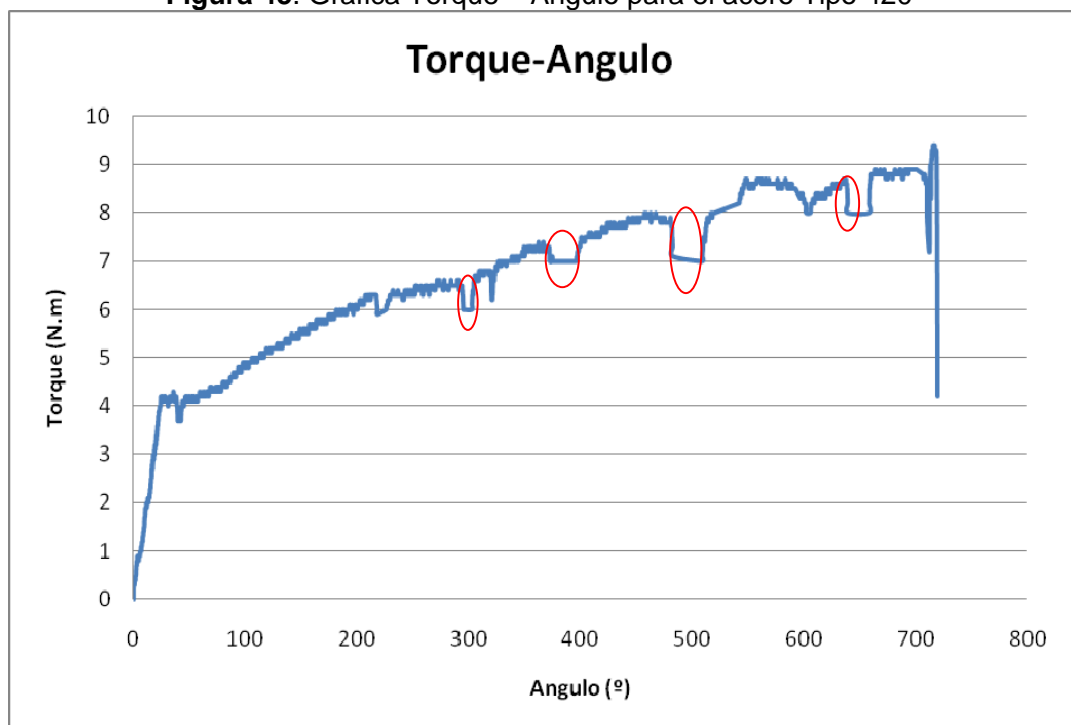


Tabla 10. Resultados ensayo de torsión para el acero Tipo 420 en estado como se recibió

Torque máximo (N.m)	Torque Fluencia (N.m)	Angulo de ruptura (°)	Esfuerzo ultimo de Corte (MPa)	Modulo de corte (GPa)
9,6	4,79	775	572,95	7,81

Los valores reportados en la tabla son el resultado del promedio de los ensayos

En las **Figuras 44 y 45** se notan diferencias tanto para la zona elástica como para la plástica, además se observan las zonas de descenso de torque marcadas con círculos rojos. Todo lo anterior se debe a la aplicación manual del torque como se explicó anteriormente.

Los valores de torque máximo, ángulo de ruptura y esfuerzo de corte máximo o último son similares para ambos ensayos como se puede ver en la **Tabla 10**. Los esfuerzos de corte del resultado anterior son similares al esfuerzo último a tracción, por lo tanto no es aplicable la relación entre el esfuerzo ultimo a tracción y el esfuerzo último al corte.

El torque fluencia es lo suficientemente alto como el anterior para ser aplicado como punta para la fijación de implante, pero la punta no posee la dureza suficiente como para poder ser empleada como herramienta, por lo tanto se necesita que se realice un tratamiento térmico sobre ésta.

Al comparar las **Tablas 9 y 10** se puede decir que; la aleación Tipo 420 presentó una menor resistencia a la deformación en torsión y a su vez una menor resistencia al torque y al corte que la aleación *Custom 455*, puesto que el acero *Custom 455* tiene una dureza superior debido a su estructura martensítica,

mientras que el acero Tipo 420 por su microestructura ferrítica blanda resiste menos a la aplicación de este tipo de esfuerzos.

4.4 RESULTADOS ENSAYO DE FLEXIÓN PARA LAS PROBETAS EN ESTADO COMO SE RECIBIÓ.

Figura 46. Curva de comparación entre el acero Tipo 420 y *Custom 455*

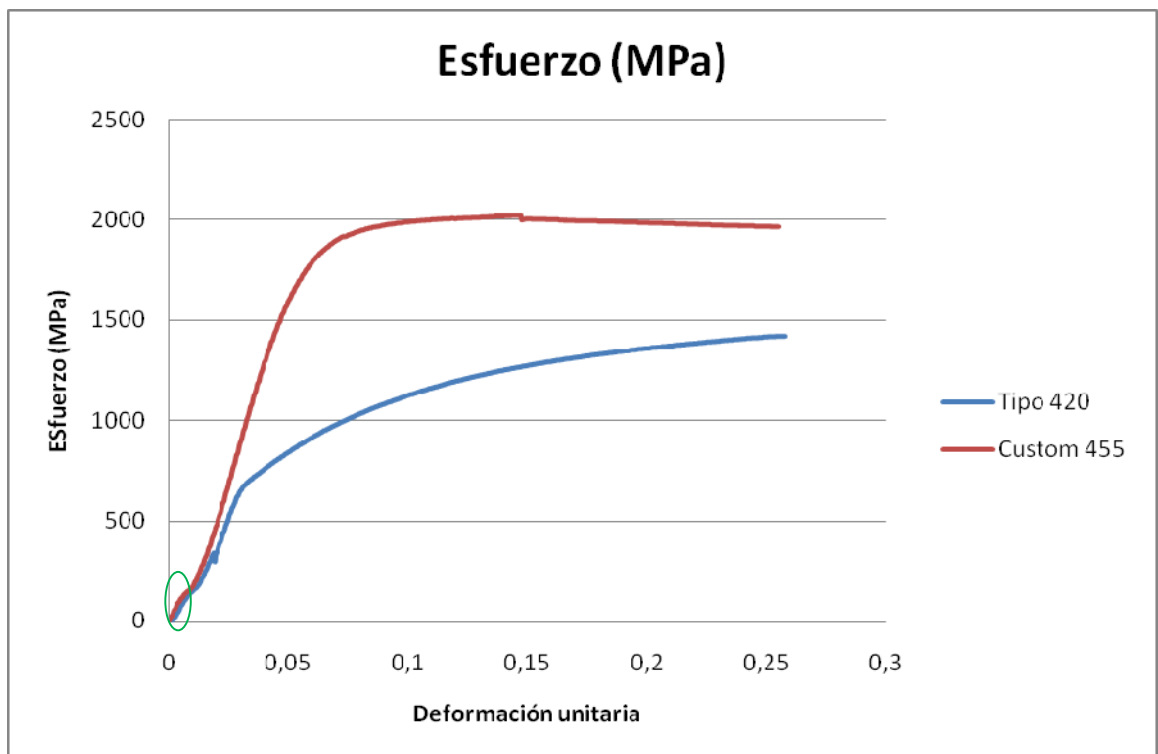


Figura 47. Módulo de flexión para probetas en estado como se recibió.

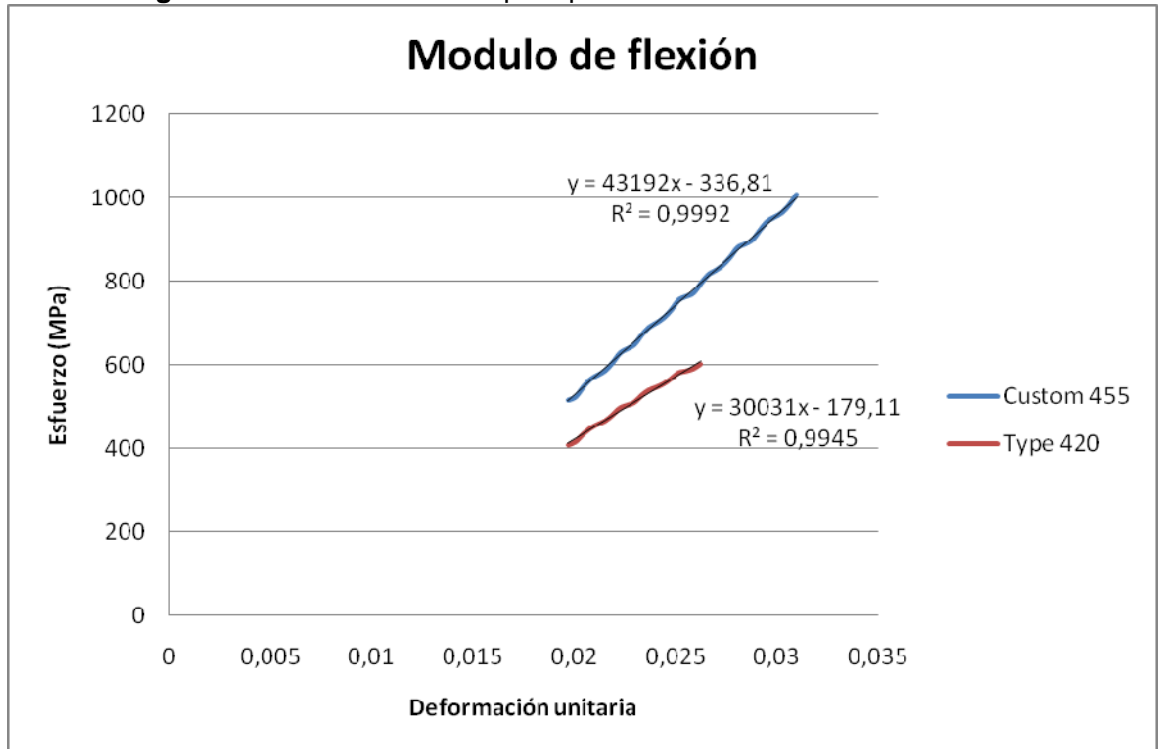


Tabla 11. Resultados ensayo de flexión Tipo 420 y Custom 455

Estado de entrega acero	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo fluencia (MPa)	Angulo de flexión (°)	Módulo de flexión. (MPa)
Tipo 420	5033,75	1401,74	662,05	22	31138,5
Custom 455	7350	2046,74	1810,74	19,5	42485

Los anteriores resultados se obtuvieron sacando los valores promedios para los dos ensayos

Al determinar que la diferencia entre los datos de la muestra y la contramuestra fuera menor del 10% para cada uno de los aceros, se optó por realizar el análisis tomando uno de los ensayos para cada acero. (Los demás ensayos se pueden ver en el anexo A). El módulo de flexión se determinó observando una franja de linealidad de la gráfica esfuerzo-deformación en la zona elástica como se ve en la

Figura 47, luego se realizó la correlación lineal y se determinó la pendiente de la curva que corresponde al mismo. (Las otras gráficas de módulo en flexión se pueden ver en el anexo A).

En el inicio de la **Figura 46** se observa una zona marcada con un círculo verde, para la cual la pendiente de la curva cambia repentinamente, esto es como resultado del endurecimiento del material, que resulta de la diferencia de durezas entre el punzón y la probeta ensayada, el punzón deforma plásticamente el material haciendo que la curva aumente su pendiente

Las propiedades mecánicas de flexión para la aleación *Custom 455* son superiores en casi todos los aspectos excepto en el ángulo de deflexión a la aleación Tipo 420, como se observa en la **Tabla 11**. En toda la **Figura 46**, el esfuerzo requerido para una misma deformación unitaria es superior para el acero *Custom 455* con respecto al otro material, además esta se deforma más elásticamente. Estas excelentes propiedades de la aleación *Custom 455* pueden ser por dos aspectos la dureza y la microestructura, la dureza de la aleación *Custom 455* es mayor que la del acero Tipo 420, por lo tanto se necesita de un mayor esfuerzo para poder deformar el material, además su microestructura martensítica al ser una estructura austenítica deformada por el carbono es más resistente al deslizamiento de sus átomos, que una estructura ferrítica más carburos del acero Tipo 420, la cual es una solución sólida de carbono.

El módulo de flexión para los aceros en general es alrededor de 200 GPa, en este caso el valor incorrecto del módulo se debe a diversos factores, la forma de la probeta puede ser uno de ellos, se realizó con base en la norma ASTM **E290- 97 a Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility**, en esta no se menciona que se pueda determinar con exactitud el módulo de flexión, además cuando se requiere determinar el módulo de flexión siempre se emplea laminas, debido a que estas tienen una mayor estabilidad, El segundo factor a considerar es

que generalmente para una medición apropiada del modulo se emplean, dispositivos para la medición mas precisa de la deformación elástica como es el deflexómetro.

4.5. RESULTADOS TRATAMIENTO TÉRMICO

4.5.1 RESULTADOS TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE EL ACERO TIPO 420.

Tabla 12. Ensayo de dureza Tipo 420 templado al aire 1000 °C

Durezas Rockwell A $\pm 0,5$	
	76
	77
	76
Promedio	76,33

Tabla 13 .Ensayo de dureza Tipo 420 templado a 980° C al aire

Durezas Rockwell A $\pm 0,5$	
	71
	70
	71
Promedio	70,66

Tabla 14. Ensayo de dureza Tipo 420 templado a 1000 °C y Revenido durante dos horas a 570°C

Durezas Rockwell A $\pm 0,5$	
	70
	72
	72
Promedio	71,33

Tabla 15. Ensayo de dureza Tipo 420 templado a 1000°C y Revenido a 570°C durante dos horas media

Durezas Rockwell A $\pm 0,5$	
	70
	69
	70
Promedio	69,66

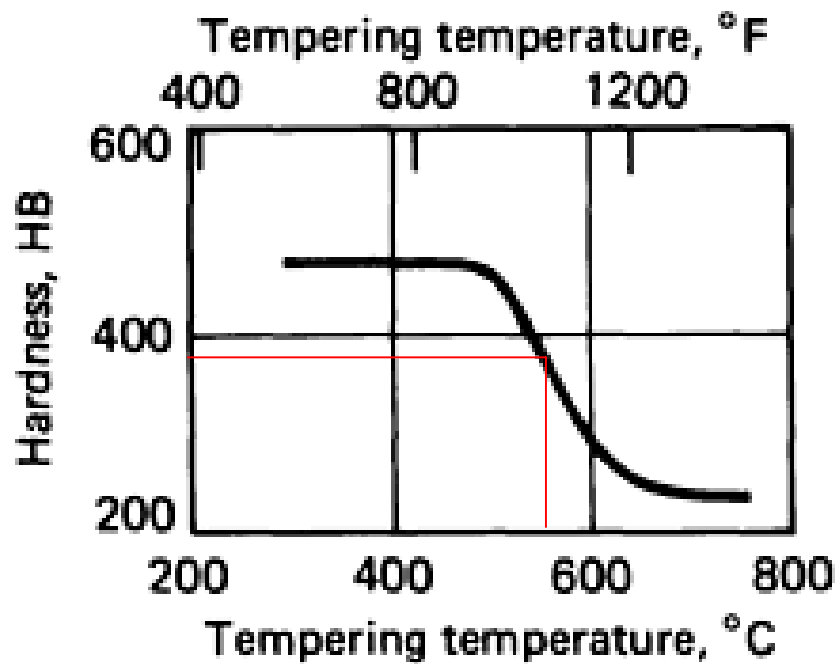
Analizando los resultados de las **Tablas 13 y 14**, se observa una dureza superior para una temperatura de 1000 °C, se puede decir que para una temperatura mas alta se aumenta la dureza, por que hay una mayor temperatura de austenización y por esto se incrementa la disolución de los carburos, entre más estén disueltos el carbono va a estar disponible en la austenita y por lo tanto se va a formar máyor cantidad de martensita después del enfriamiento rápido, pero incrementar la temperatura puede acarrear problemas, como un mayor costo de energía, además se incrementa la probabilidad de descarburización lo cual desmejora las propiedades del acero inoxidable. Otro problema es la generación de cascarilla como resultado del calentamiento de la cámara del horno (Tubo de acero inoxidable) a elevadas temperaturas. Esta no solo puede contaminar la muestra, además en algunos casos esta puede entrar en contacto con la resistencia, generando cortos y fusión de la resistencia, disminuyendo su vida útil.

La dureza se aumenta como resultado de la distorsión de la austenita por parte del carbono hasta formar la martensita BCT, las distorsiones en la matriz son obstáculo para el movimiento de las dislocaciones, al dificultar el movimiento de las mismas se aumenta la dureza [11].

La temperatura de revenido se obtuvo de la **Figura 48**, para una dureza de 42 HRC (71,5 HRA). Como la dureza de 38 HRC (69,4 HRA) es cercana se aumentó el tiempo de revenido por media hora , para conseguir este valor de

dureza. La dureza después de realizado el revenido se disminuye con el calentamiento, el carbono sale de la martensita disminuyendo la distorsión de la matriz por lo tanto al contrario del temple se facilita el movimiento de las dislocaciones disminuyendo la dureza del acero.

Figura 48. Diagrama de Dureza – temperatura de revenido para el acero Tipo 420



DOUTHETT J, Heat Treating of Stainless Steels, *Heat treatment, Vol 4*, ASM Handbook, ASM International, 2004, p. 1725

4.5.2 RESULTADOS TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE EL ACERO CUSTOM 455.

Tabla 16. Ensayo de dureza *Custom 455* Solubilizado a 850°C durante una 1 h.

	CT 1 (HRA) ±0,5	CT 2 (HRA) ±0,5	CT 3 (HRA) ±0,5	CT 4 (HRA) ±0,5	CT 5 (HRA) ±0,5
	62	62	62	60	62
	62	63	62	59	62
	60	62	63	60	60
Promedio	61,33	62,33	62,33	59,66	61,8

Tabla 17. Ensayo de dureza *Custom 455* sobre probetas envejecidas a distintos tiempos

	CT1 (1h) (HRA) ±0,5	CT2 (2h) (HRA) ±0,5	CT3 (3h) (HRA) ±0,5	CT4 (4h) (HRA) ±0,5	CT5 (5h) (HRA) ±0,5
	74	72	71	71	69
	74	71	72	71	70
	73	72	71	70	69
Promedio	73,6	71,6	71,3	70,7	69,33

Tabla 18. Comparación entre Durezas Rockwell A y C

Tiempo(h)	Dureza(HRA)	Dureza(HRC)
1	73,6	46
2	71,6	42,16
3	71,3	41,6
4	70,7	40,4
5	69,33	37,8

Figura 49. Grafica de Dureza - tiempo de envejecido para el acero Custom 455 , el circulo rojo marca el punto de envejecimiento maximo

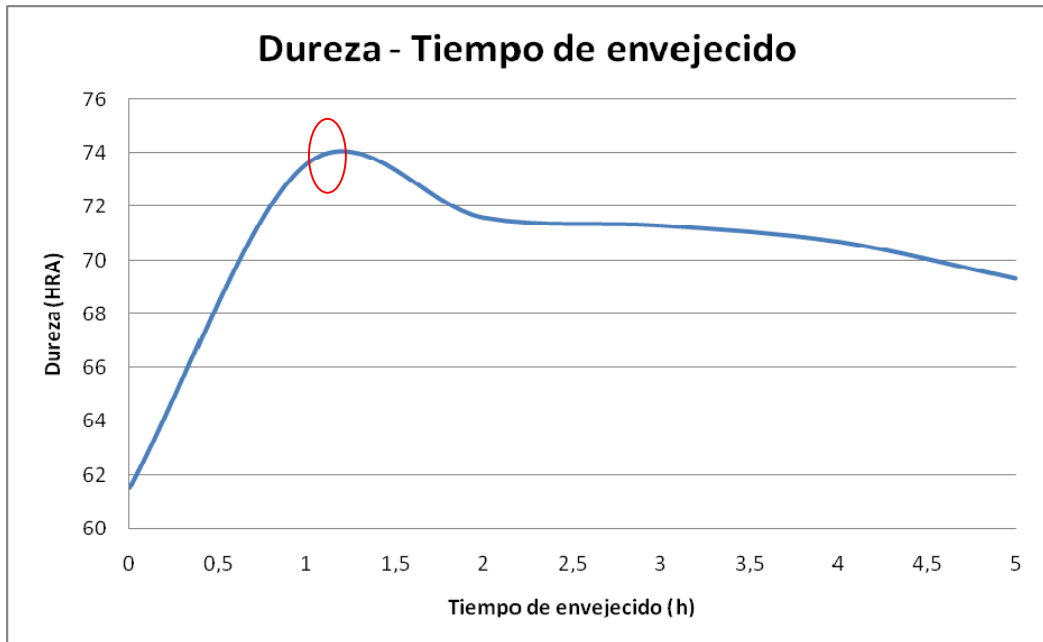
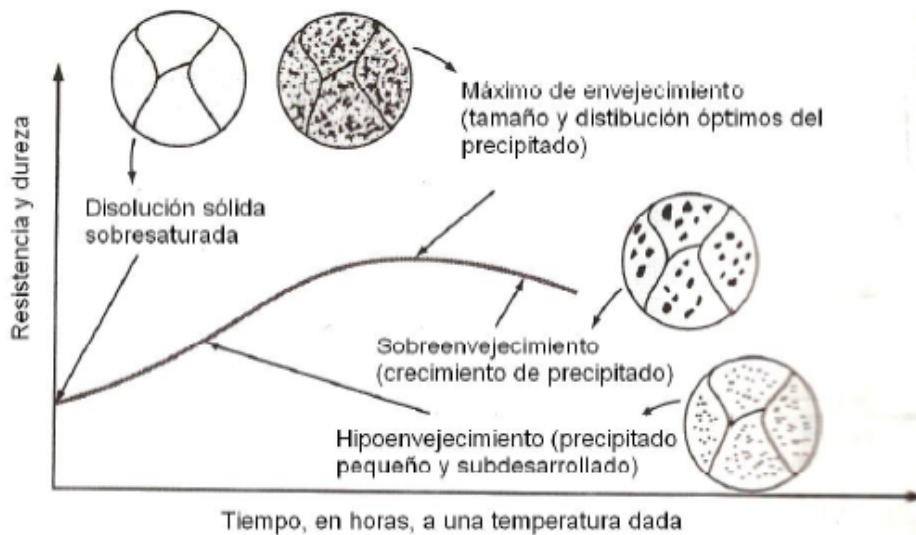


Figura 50. Esquema de la curva de envejecimiento (resistencia o dureza frente al tiempo) a una temperatura determinada para una aleación endurecible por precipitación.



Fenómenos de endurecimiento [www.metalurgia.uda.cl]

De los resultados **Tabla 17 y 18** entre las probetas que fueron solubilizadas y posteriormente envejecidas se observa un aumento en la dureza. En general, puede decirse que el aumento en la dureza está asociado con una mayor dificultad para mover las dislocaciones [12]. Al precipitar partículas finas como resultado del tratamiento de envejecido se impide el movimiento de las dislocaciones durante la deformación, forzando a que estas pasen a través de las partículas de precipitado cortándolas o rodeándolas [13], por lo anterior el acero termina endureciéndose.

Otra razón del endurecimiento del acero, es la siguiente; al precipitar partículas sobre cada uno de los granos se dificulta el deslizamiento de ellos, cuando se restringe el movimiento de los granos se aumenta la energía necesaria para poder moverlos.

En la **Figura 49** se observa un comportamiento típico para este tipo de aleaciones endurecibles por precipitación, en la cual se nota que para 1 hora la dureza se incrementa y después al aumentar el tiempo la dureza disminuye, luego se mantiene casi constante entre las 2 y las 3 horas, al final de la gráfica se observa que esta comienza a descender para los tiempos de 4 y 5 horas.

La **Figura 50** presenta similitudes con la **Figura 49** en cuanto a la forma de la gráfica lo cual nos permite entender su comportamiento. El círculo rojo marca el punto de máxima dureza en la **Figura 49**, es el punto de máximo envejecimiento de acuerdo a la **Figura 50**, para tiempos menores al tiempo de envejecimiento máximo vamos a ver una zona de crecimiento de la dureza con el tiempo de envejecido que sería la zona de hipoenvejecimiento y para tiempos mayores se produce una reducción de la dureza como resultado del sobre-envejecimiento de la aleación, En el sobre-envejecimiento algunos precipitados aumentan de tamaño a costa de la desaparición de otros precipitados más pequeños, al aumentar el tamaño de la fase precipitada las dislocaciones pueden moverse con más

facilidad, disminuyendo la resistencia del metal [14], además la aleación al aumentar el tiempo por encima del tiempo de envejecido óptimo tiende a su estado de equilibrio que equivale a realizarle un recocido a la aleación [13], en esta condición la aleación es mucho más blanda.

De la **Tabla 18** se puede observar que las durezas 42 y 38HRC necesarias para la aplicación de este acero como punta atornilladora, se encontraron para los tiempos de 2 y 5 horas. Con base a lo anterior se puede decir que para estos tiempos el acero se encuentra en un estado de transición en la zona de sobre-envejecimiento.

Al comparar los tratamientos térmicos realizados para los dos aceros inoxidable, a pesar que la dureza a conseguir sea la misma, se observa que el acero inoxidable Tipo 420 requiere de temperaturas más altas y un equipo auxiliar (ventilador) para poder realizar su endurecimiento, mientras que el acero inoxidable *Custom 455*, requiere de tiempos mucho más prolongados aunque temperaturas inferiores a las utilizadas por el otro acero.

Además se notó una mayor cantidad de cascarilla producto de la cámara de tratamiento térmico (tubo de acero inoxidable) para el acero inoxidable Tipo 420 que para el acero *Custom 455*. Con base a lo anterior se puede decir que el tratamiento térmico del acero Tipo 420 puede resultar mucho más costoso que el del acero *Custom 455*, dado que este requiere un mayor costo no solo en el consumo de energía que conlleva utilizar altas temperaturas, además de los costos por mantenimiento y limpieza del horno que implican la utilización de temperaturas altas.

4.5.3 ANÁLISIS METALGRÁFICO SOBRE PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.

4.5.3.1 ANÁLISIS METALGRÁFICO TIPO 420 TRATADO TÉRMICAMENTE.

Figura 51. Microestructura del acero Tipo 420 templado a 1000°C y revenido durante dos horas a 570°C, a 1400x corte longitudinal atacado con reactivo villeda's, círculo rojo carburos, círculos amarillo martensita fina y círculo azul martensita gruesa, Dureza: 42 HRC

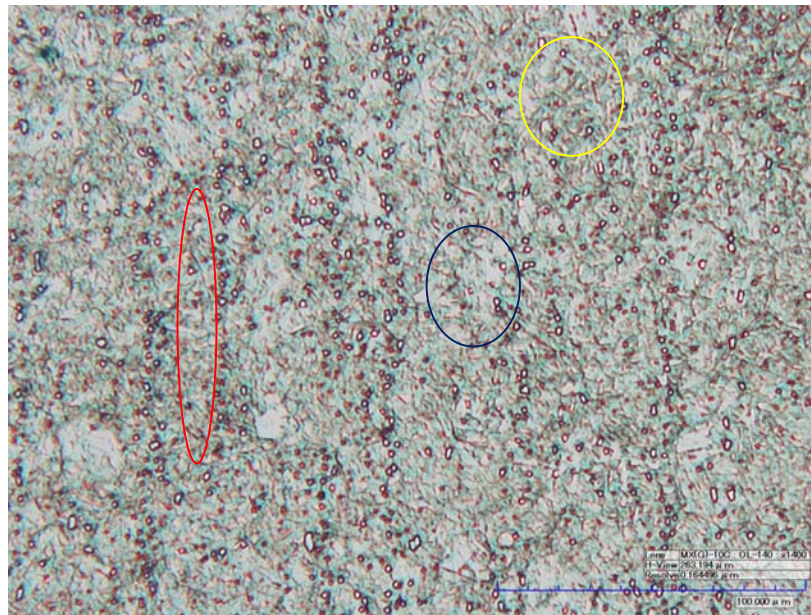


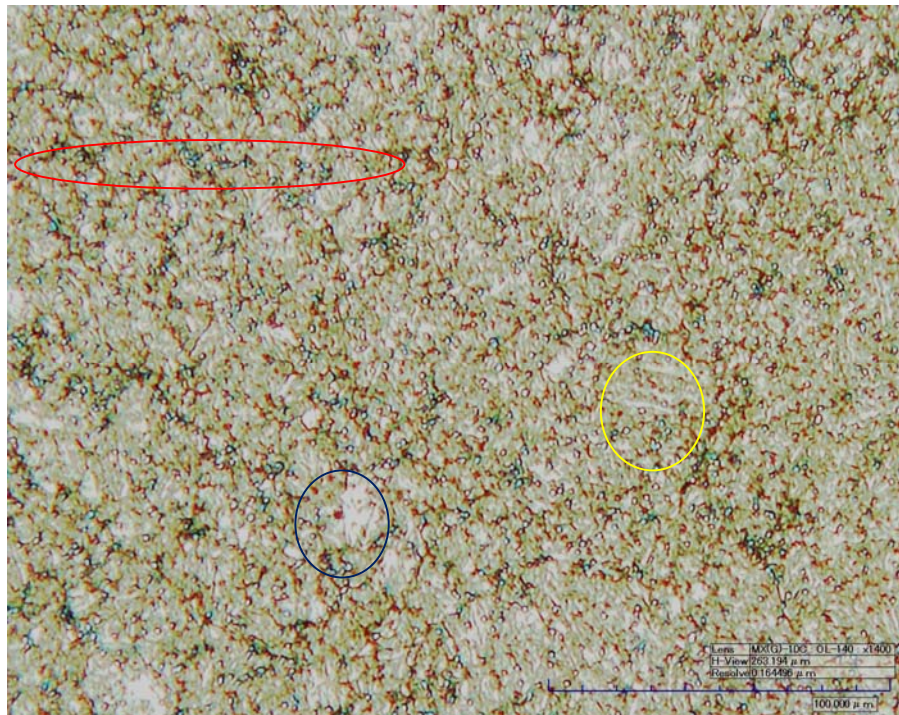
Figura 52. Microestructura del acero Tipo 420 templado a 1000°C y revenido durante dos horas a 570°C, a 1400 x corte transversal atacado con reactivo villeda's, círculo rojo carburos, círculo amarillo martensita fina y círculo azul martensita gruesa. Dureza :42HRC



Figura 53. Microestructura del acero Tipo 420 templado a 1000°C y revenido durante dos horas y media 570°C, a 1400x corte longitudinal atacado con reactivo villeda's, círculo rojo carburos y círculo azul martensita gruesa. Dureza: 38 HRC



Figura 54. Microestructura del acero Tipo 420 templado a 1000°C y revenido durante dos horas y media 570°C, a 1400x corte transversal atacado con reactivo villeda's. círculo rojo carburos, círculo amarillo martensita fina y círculo azul martensita gruesa. Dureza 38HRC



Las microestructuras reportadas **Figuras 51, 52, 53 y 54** para la aleación Tipo 420 muestra la presencia de una estructura martensítica revenida y precipitados. Se observa dos tipos de martensita una martensita gruesa marcada con círculos azules y una martensita más fina marcada con círculos amarillos. La martensita basta es producto de una mayor difusión del carbono como consecuencia del tratamiento de revenido, este sale de la martensita y precipita en forma de carburos que son los precipitados marcados con círculos azules.

La estructura resultante es producto del tratamiento térmico y de los elementos principales de la aleación los cuales son carbono y cromo. El carbono sobresatura la austenita como resultado del calentamiento a 1000°C, después al enfriarse rápidamente por efecto del aire del ventilador, este queda atrapado en la red de la austenita deformándola y de esta manera se forma una estructura bct martensítica acicular, luego con el posterior calentamiento a 570°C durante dos horas (tratamiento de revenido) se precipita el carbono en forma de carburos que de acuerdo a lo reportado en la bibliografía pueden ser carburos de cromo de la forma M_7C_3 , y $M_{23}C_6$ [15].

4.5.3.2 ANÁLISIS METALOGRÁFICO CUSTOM 455 TRATADO TÉRMICAMENTE.

Figura 55. Microestructura del acero *Custom 455* solubilizado a 850°C durante 1 hora ,enfriado en agua, envejecido a 480°C durante 2 horas , a 1400x corte transversal atacado con reactivo Vilela´s. Circulo amarillo martensita, circulo rojo precipitados y circulo azul carbonitruros. Dureza 42 HRC.

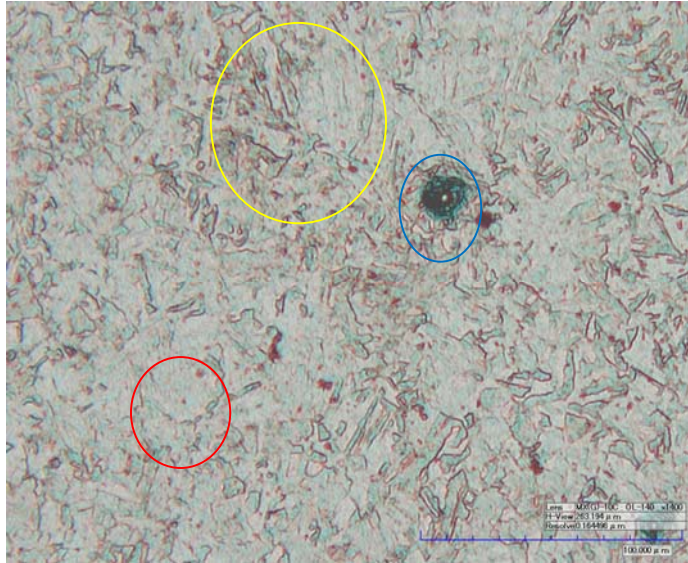


Figura 56. Microestructura del acero *Custom 455* solubilizado a 850°C durante 1 hora enfriado en agua, envejecido a 480°C durante 2 horas , a 1400x corte longitudinal atacado con reactivo Vilela´s. Circulo amarillo martensita, circulo rojo precipitados y circulo azul carbonitruros. Dureza 42 HRC.

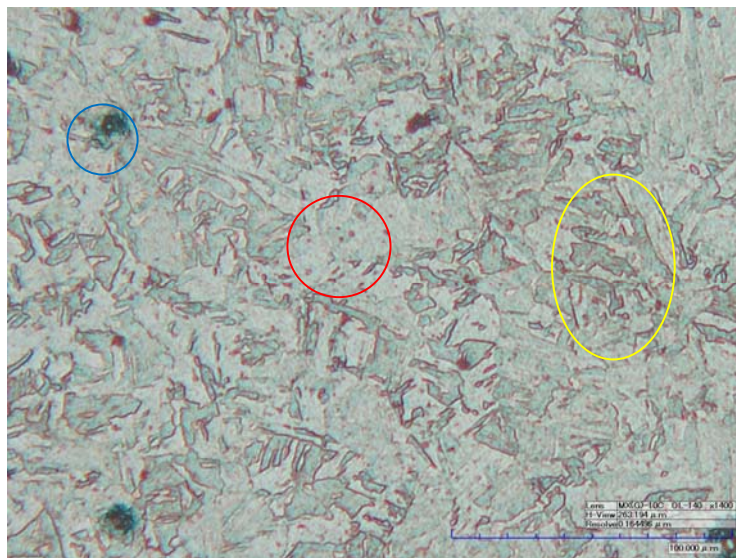


Figura 57. Microestructura del acero *Custom 455* solubilizado a 850°C durante 1 hora enfriamiento en agua, envejecido a 480°C durante 5 horas , a 1400x corte transversal atacado con reactivo Villela's. Circulo amarillo martensita, circulo rojo precipitados y circulo azul carbonitruros. Dureza 38 HRC.

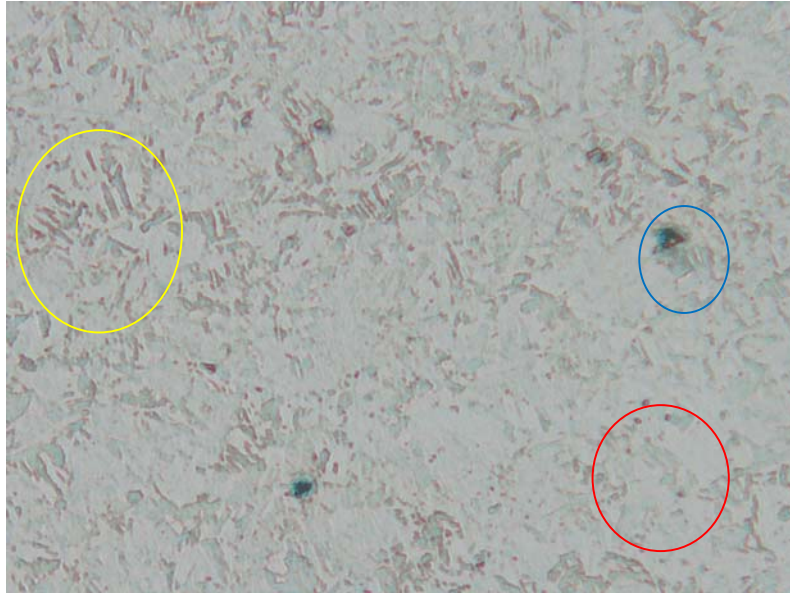
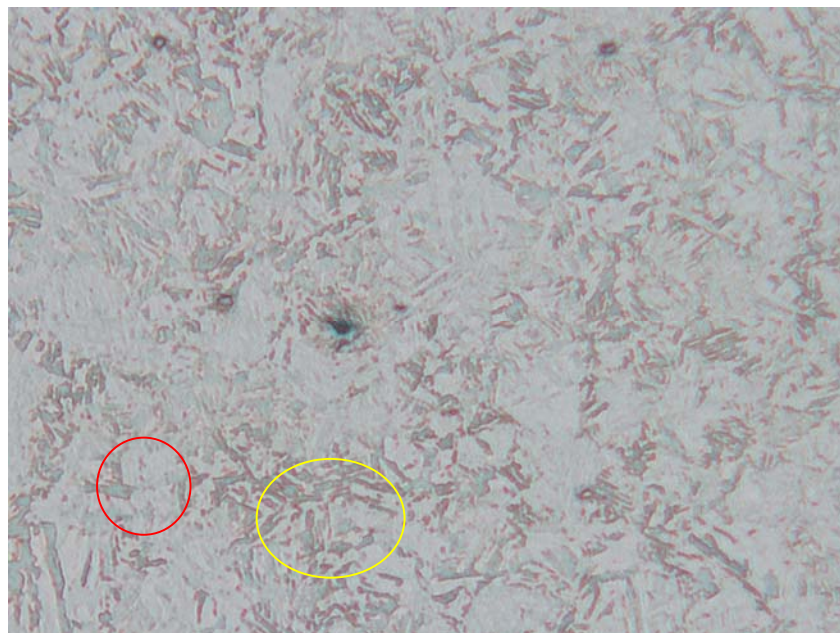


Figura 58. Microestructura del acero *Custom 455* solubilizado a 850°C durante 1 hora enfriamiento en agua, envejecido a 480°C durante 5 horas , a 1400x corte longitudinal atacado con reactivo Villela's. Circulo amarillo martensita y circulo rojo precipitados. Dureza 38 HRC



La microestructura observada en las **Figuras 55, 56, 57 y 58**, muestra la presencia de una estructura martensítica de pobre contenido de carbono (marcada con círculos amarillos) y precipitados de dos tipos carbonitruros marcados con círculos azules y los otros pueden ser precipitados de cobre BCC y de $\eta\text{Ni}_3\text{Ti}$ (denotados con círculos rojos) [16] de acuerdo a lo reportado en la bibliografía.

La martensita observada como ya se explicó anteriormente es producto del tratamiento de solubilización sobre la aleación, los precipitados muchos más grandes son carbonitruros de titanio como resultado del proceso de fabricación de la aleación, observando la composición química y la bibliografía reportada se resalta la presencia de dos componentes, el titanio y cobre que son elementos formadores de precipitados y responsables del endurecimiento por precipitación de la aleación [17].

El acero Custom 455 en su composición química contiene 2,2 % de cobre, este elemento genera precipitados que endurecen la matriz durante el tratamiento de envejecimiento, puesto que para otros aceros inoxidable endurecibles por precipitación de composición similar como el 15-5 PH [18] y el 17-4PH [19], este elemento forma precipitados en la matriz martensítica durante el tratamiento de envejecido. Además este acero inoxidable contiene otro elemento como es 1,22% de titanio que puede formar junto con el níquel precipitados de Ni_3Ti durante el tratamiento de envejecimiento, lo anterior se puede decir dado que para los aceros maraging (Aceros martensíticos endurecibles por precipitación) que contiene níquel y titanio se forma este compuesto durante el tratamiento de envejecido [20]

4.6 RESULTADOS ENSAYO DE TORSIÓN PARA PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.

4.6.1 RESULTADOS ENSAYO DE TORSIÓN ACERO TIPO 420 PARA PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.

Figura 59. Gráfica torque-ángulo acero Tipo 420 tratado térmicamente y en estado como se recibió.

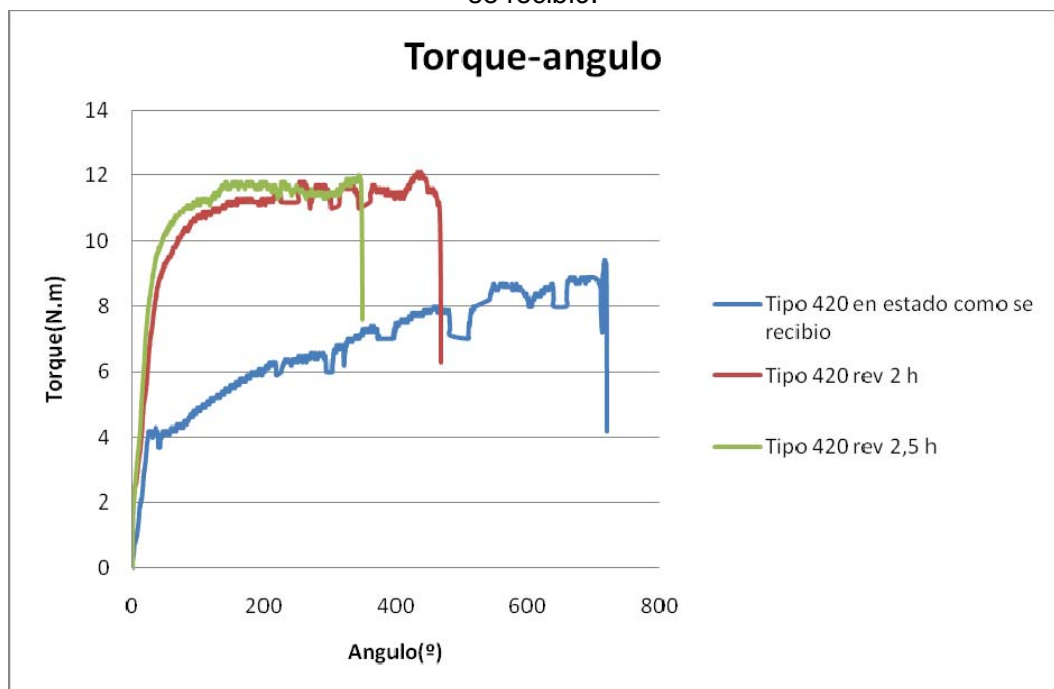


Tabla 19. Resultados ensayo de torsión Tipo 420

Estado de la probeta	Torque máximo (N.m)	Torque de fluencia (N.m)	Ángulo de ruptura (°)	Esfuerzo último de Corte (MPa)	Módulo de corte (GPa)
Estado de entrega	9,6	4,79	775	572,95	7,81
Revenida 2 h	11,8	9	415	704.26	21
Revenida 2,5 h	11,65	9,44	420	695,3	14,14

Los valores reportados en la tabla son el resultado del promedio de los ensayos

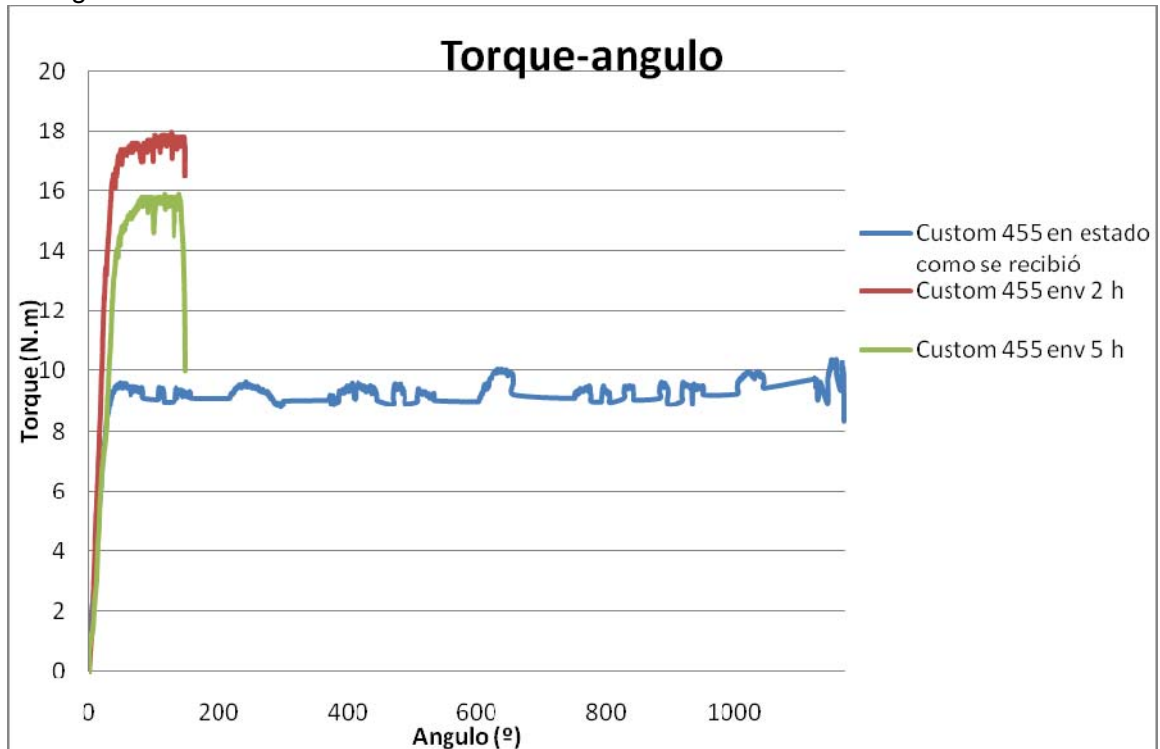
La **Figura 59** muestra que las probetas tratadas térmicamente aumentaron su resistencia a cargas torsionales, además al observar la **Tabla 20**, es notorio que todas las propiedades mejoraron excepto el ángulo de ruptura el cual disminuyó con el tratamiento térmico, debido a que al incrementar la dureza en la mayoría de los casos se disminuye la ductilidad del acero. La razón por la cual las probetas tratadas térmicamente presentaron mejores propiedades a torsión que las probetas en estado de entrega, es que las microestructuras martensíticas revenidas es mucho más dura debido a que posee una mayor distorsión que la estructura ferrítica, y por consiguiente se requiere de una mayor carga para poder deformar el acero.

Con base en los resultados de las probetas que fueron tratadas térmicamente de la **Figura 60** y de la **Tabla 20**, se observa que las propiedades en general a torsión son muy similares, en lo único que se diferencia es en el módulo de corte que al igual que el módulo de Young representa la rigidez pero en torsión de las aleaciones, lo cual corresponde a lo esperado dado que las probetas que fueron revenidas durante dos horas que son más duras presentaron una mayor rigidez en torsión.

Las puntas atornilladoras de implantes dentales se utilizan para torques que se encuentran en el rango entre 0,13 N m hasta 0,7 N m. Al comparar con los torques de fluencias para las probetas que fueron tratadas térmicamente, se puede decir que la aleación puede soportar esta cantidad de torque sin deformarse plásticamente en torsión y por lo tanto se puede aplicar como punta atornilladora, sin embargo se necesita evaluar los resultados a flexión para poder asegurar lo anterior

4.6.2 RESULTADOS ENSAYO DE TORSIÓN CUSTOM 455 PARA PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.

Figura 60. Gráfica torque-ángulo *Custom 455* tratado térmicamente y en estado de entrega.



Env ; envejecido

Tabla 20. Resultados ensayo de torsión *Custom 455* .

Estado de la probeta	Torque máximo (N.m)	Torque de fluencia (N.m)	Ángulo de ruptura (°)	Esfuerzo último de Corte (MPa)	Módulo de corte (GPa)
Estado de entrega	9,6	4,79	775	572,95	7,81
Envejecido 2 h	16,15	14,55	122	963,88	11,49
Envejecido 5 h	14,95	12,94	120	892,26	13,29

De la **Figura 60** se puede notar que el tratamiento térmico realizado sobre el acero inoxidable *Custom 455*, aumento su resistencia a torsión con respecto a la aleación en estado de entrega. En la **Tabla 21** se observa que tanto el torque máximo así como el de fluencia se incrementaron con respecto a la aleación en estado de entrega al igual que el esfuerzo último y el módulo de corte, caso contrario ocurrió con el ángulo de ruptura el cual disminuyó con el tratamiento térmico de envejecido debido a que la aleación se endureció. El endurecimiento de la aleación es el resultado de la precipitación partículas de cobre y de compuestos Ni_3Ti los cuales endurecen el material.

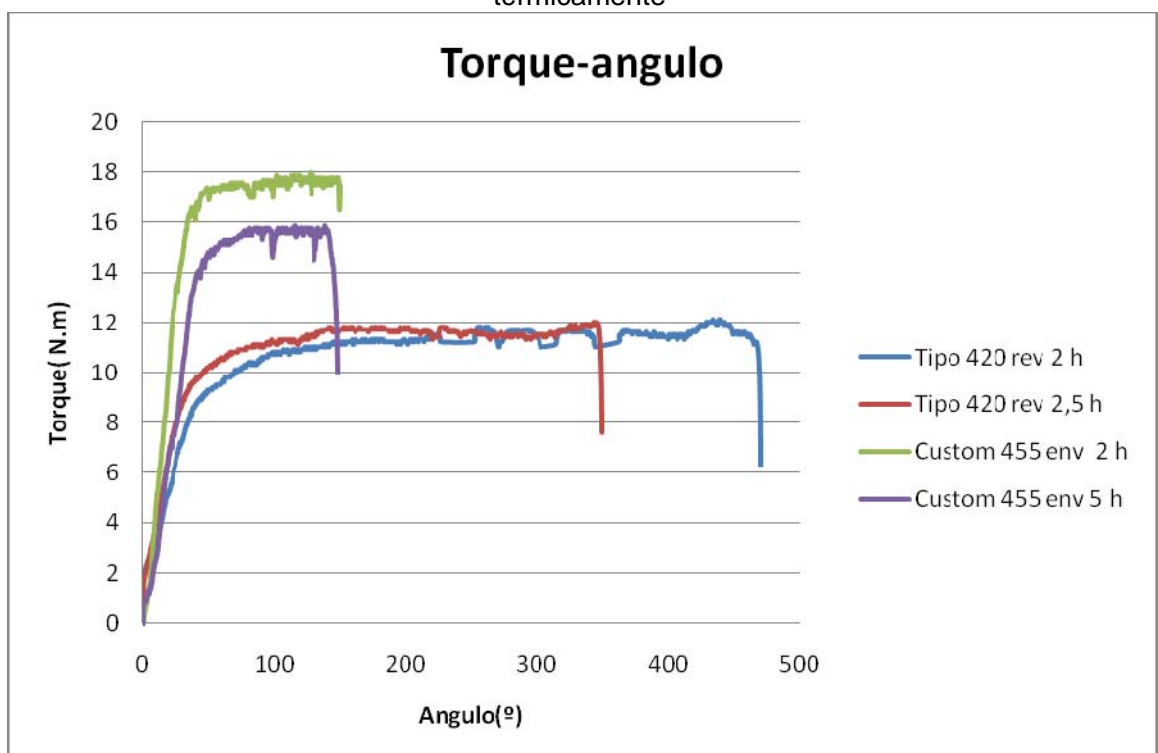
Analizando la **Figura 60** y la **Tabla 21**, es evidente que la aleación que fue envejecida durante dos horas cuya dureza corresponde a 42 HRC posee unas mejores propiedades en torsión, que la que fué envejecida durante 5 horas la cual su dureza es de 38 HRC. Esto se debe a que al aumentar el tiempo de envejecido, después que se ha superado el punto de envejecimiento máximo la dureza comienza disminuir así como las propiedades mecánicas, como resultado del crecimiento de las partículas precipitadas a costa de las partículas más pequeñas, al desaparecer estas partículas pequeñas se disminuye la resistencia de la aleación dado que al crecer no son un obstáculo para el movimiento de las dislocaciones. De acuerdo a lo anterior se podría decir que las probetas envejecidas durante 5 horas poseen muchas más partículas de mayor tamaño que las envejecidas durante 2 horas, debido a que el tiempo de envejecimiento es mayor lo cual da una mayor oportunidad a que se de este fenómeno. Esto disminuye sus propiedades mecánicas, para este caso su resistencia a cargas torsionales y esfuerzos cortantes.

Al observar los valores de torque de fluencia para la aleación envejecida ambos son lo suficientemente altos para ser aplicados como punta atornilladora de implantes dentales, sin embargo para un envejecido durante dos horas se presentaron mejores propiedades a torsión por las razones anteriormente

expuestas, por lo cual se podría decir que esta condición es la mas idónea para ser aplicado como punta. Aunque para poder realizar tal afirmación se necesita ver los resultados del acero bajo flexión.

4.6.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS ENSAYOS DE TORSIÓN ENTRE LAS PROBETAS QUE FUERON TRATADAS TÉRMICAMENTE.

Figura 61. Torque-ángulo, comparación entre las probetas que fueron tratadas térmicamente



En la **Figura 61**, se puede observar que la aleación *Custom 455* presentó una mayor resistencia a cargas de torsión que el acero Tipo 420. Sin embargo el acero Tipo 420 mostró una gran ductilidad bajo cargas de torsión como se observa en la **Figura 61**. Comparando cada una de las gráficas que posean igual dureza por ejemplo la gráfica color azul con la gráfica color verde, se observa que a pesar de que la dureza es similar la resistencia a cargas torsionales es distinta, esto nos indica que existe otro factor que afecta la resistencia a este tipo de cargas, es

posible que las microestructuras ejerzan algún tipo de influencia en la repuesta de la aleación bajo cargas de torsión. Con base en lo anterior se podría decir que para la estructura martensítica más precipitados presentan una mayor resistencia a cargas torsionales, por que los precipitados refuerzan la matriz en muchas más direcciones cristalográficas que la matriz martensitica revenida más carburos del acero Tipo 420.

4.7 RESULTADOS ENSAYO DE FLEXIÓN PARA PROBETAS TRATADAS TÉRMICAMENTE.

4.7.1 RESULTADOS ENSAYO DE FLEXION DEL ACERO TIPO 420 TRATADO TÉRMICAMENTE.

Figura 62. Gráfica esfuerzo-deformación unitaria del acero Tipo 420

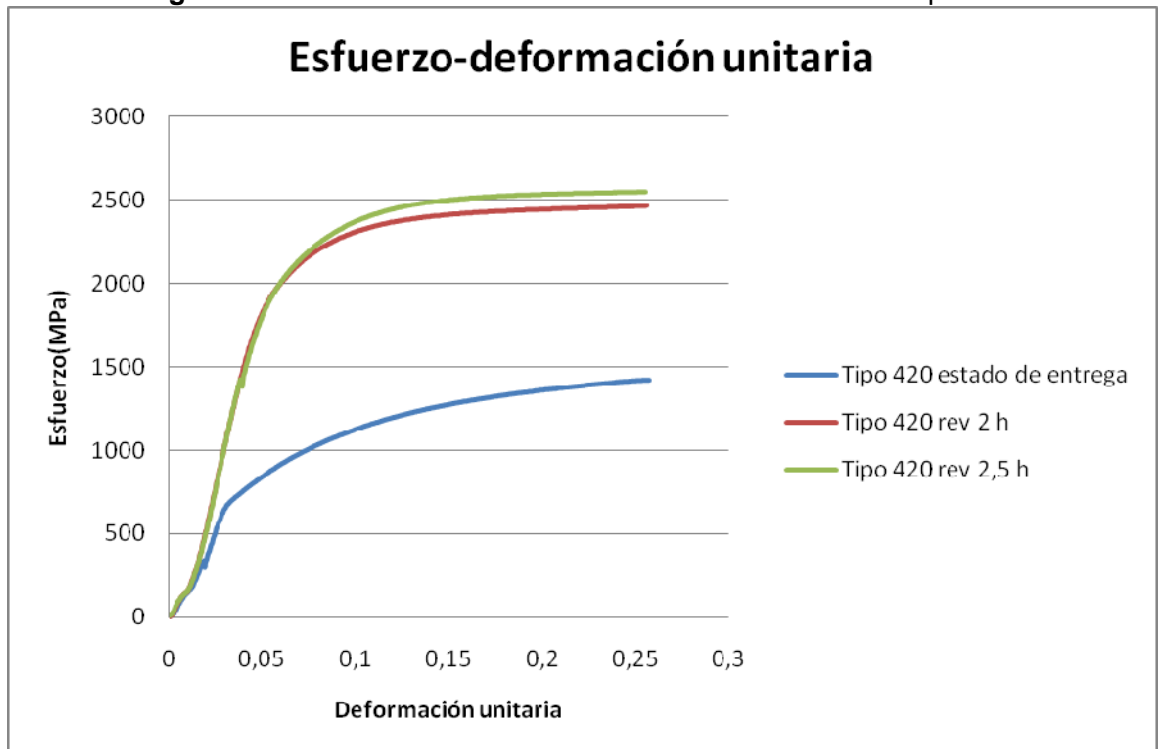


Tabla 21 .Resultados ensayo de flexión del acero Tipo 420

Estado de la probeta	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo fluencia (MPa)	Angulo de flexión (°)	Módulo de flexión. (MPa)
Estado de entrega	5033,75	1401,74	662,05	22	31138,5
Revenido 2 h	8815	2467,23	2010,33	19,5	45584
Revenido 2,5 h	9110	2536,85	2048,35	18	49173

El acero inoxidable Tipo 420 incrementó su resistencia a esfuerzos deflectores con el tratamiento térmico como se puede ver en la **Figura 63**. Adicionalmente de la **Tabla 21**, se puede observar que tanto el esfuerzo así como la carga máxima y el módulo de flexión aumentaron significativamente para el acero tratado térmicamente con respecto a este en estado de entrega mientras que el ángulo disminuyó. Lo anterior es consecuencia del endurecimiento del material; entre más se incremente la dureza del material mayor va a ser su resistencia a esfuerzos en flexión, pero menor va a ser la ductilidad. De acuerdo a lo anterior se puede decir que bajo estas condiciones de dureza la microestructura martensítica revenida del acero le permite a este tener una alta resistencia a flexión con una adecuada ductilidad.

Las probetas que fueron tratadas térmicamente no tienen una diferencia apreciable en sus resultados a flexión como se puede ver en la **Tabla 21** y **Figura 62**, con esto se podría decir que la resistencia a esfuerzos deflectores no varía dentro del rango de durezas entre los 38 y 42 HRC.

Las cargas deflectantes que se aplican durante la fijación del tornillo al implante son muy bajas, sin embargo es necesario conocer si el comportamiento a flexión del acero es dúctil o frágil, en el caso de que sea frágil esto puede representar un riesgo durante el procedimiento implantológico, debido a que si se rompe como consecuencia de su elevada fragilidad, este podría liberar pedazos de metal que puedan afectar directamente al paciente durante el procedimiento.

Para los dos aceros tratados térmicamente se observó una adecuada ductilidad a flexión con lo cual se podría decir que pueden ser utilizados como puntas para la fijación de implantes dentales, además se comprobó que su resistencia a torsión es adecuada para este tipo de aplicaciones.

4.7.2 RESULTADOS ENSAYO DE FLEXIÓN DEL ACERO CUSTOM 455 TRATADO TÉRMICAMENTE.

Figura 63. Gráfica esfuerzo -deformación unitaria del acero Custom 455

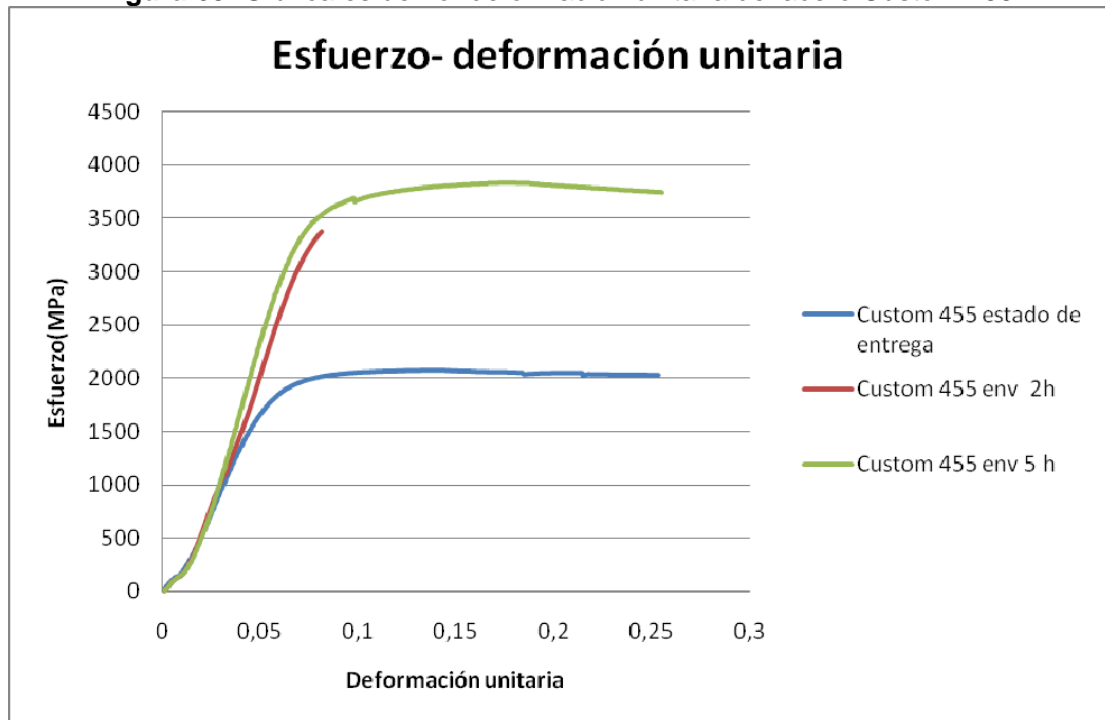


Tabla 22. Resultados ensayo de flexión del acero Custom 455

Estado de la probeta	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo fluencia (MPa)	Angulo de flexión (°)	Módulo de flexión (MPa)
Estado de entrega	7350	2046,74	1810,74	19,5	42485
Envejecido 2 h	12162,5	3367	-	0	58966
Envejecido 5 h	13702,5	3815,715	3406,37	17	63517

En la **Figura 63**, se observa que la gráfica color rojo la cual corresponde al acero *Custom 455* envejecido a 480°C durante 2 horas tuvo un comportamiento frágil, esto obedece a que, para que este tipo de aleación logre un endurecimiento con una adecuada ductilidad es necesario incrementar el tiempo de envejecido con el fin de que los precipitados aumenten de tamaño y la austenita revertida se forme, como resultado de la tendencia de la aleación a su estado de equilibrio de acuerdo a su composición química. Es posible que la mayor parte del níquel haya formado los precipitados de Ni_3Ti por que nuclean en un tiempo extremadamente corto debido a que son semicoherentes con la matriz martensítica [13], y por lo tanto al no existir suficiente níquel libre para formar una adecuada cantidad de austenita revertida y de que el tamaño de los precipitados no haya sido el necesario debido a que el tiempo fué muy corto entonces el acero se fragilizó. Otra razón para este endurecimiento puede ser la siguiente, el tiempo de envejecimiento es muy cercano al máximo el cual fue de 1 hora como se observó en la **Figura 49**. Por lo tanto se podría decir que contiene una gran cantidad de precipitados que terminaron endureciendo tanto la matriz martensítica hasta el punto que se fragilizó.

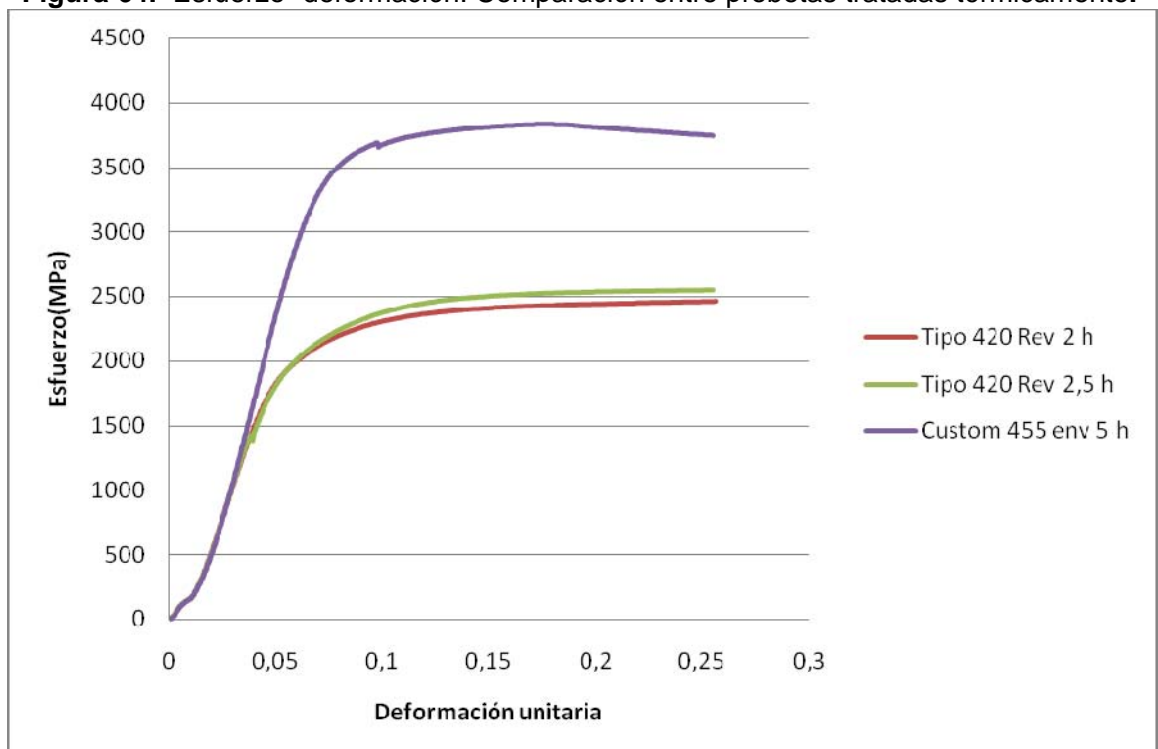
En los resultados de la **Tabla 22** y la **Figura 64**, se observa que las propiedades en flexión del acero envejecido durante cinco horas mejoraron con respecto al mismo en estado de entrega y envejecido durante dos horas, además su ángulo de deflexión no disminuyó lo suficiente excepto con respecto a la probeta en estado de entrega. Esto nos da a entender que la aleación sí tuvo el tiempo suficiente para formar la austenita revertida y precipitados de un tamaño adecuado, para poder combinar una alta resistencia en flexión con una adecuada ductilidad.

Como se mencionó anteriormente las cargas deflectantes para este tipo de aplicación son muy bajas, pero es necesario que la aleación no tenga un comportamiento frágil con el fin de disminuir los riesgos durante la fijación del

implante, en este caso solo el acero custom 455 envejecido durante 5 horas cumplió con esta condición, además de su alta resistencia a torsión, por lo anterior se puede utilizar como punta para la fijación de implante dentales.

4.7.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN ENTRE LAS PROBETAS QUE FUERON TRATADAS TÉRMICAMENTE.

Figura 64. Esfuerzo- deformación. Comparación entre probetas tratadas térmicamente.



Analizando la **Figura 64**, las **Tablas 22** y **21**, El acero *Custom 455* envejecido a 480°C durante 5 horas mejoró mucho más su resistencia a esfuerzos deflectantes que los aceros Tipo 420 tratados térmicamente, hay que tener en cuenta que la dureza entre el acero Tipo 420 revenido durante 2,5 horas es similar a la del Custom 455 envejecido durante 5 h, por lo tanto el factor microestructural también interviene en la resistencia del acero a esfuerzos de flexión, se podría decir que la estructura martensítica con precipitados del acero *Custom 455*

envejecido durante 5 horas presenta mejores propiedades a flexión que la estructura martensítica más carburos del acero Tipo 420. Esto se logra por que los precipitados refuerzan la matriz martensítica en muchas más direcciones cristalográficas, que la matriz martensítica revenida del acero tipo 420.

5. CONCLUSIONES

- Con el tratamiento térmico realizado de temple y revenido sobre el acero Tipo 420, se forma una estructura martensita revenida más carburos, para las condiciones de dureza de 38 y 42 HRC, que mejora las propiedades mecánicas en torsión y flexión con respecto a la aleación en estado recocido como fue recibida, cuya estructura inicial era ferrita mas carburos. Por lo tanto se puede decir que el diseño del tratamiento térmico fue apropiado y este puede ser aplicado en la fabricación de puntas atornilladoras de implantes dentales.
- Al incrementar la temperatura de temple para el acero Tipo 420 se aumenta la dureza, por que se presenta una mayor disolución del carbono en la austenita, lo cual hace que se forme una mayor cantidad de martensita después del enfriamiento rápido, incrementando la dureza del acero. Sin embargo esta temperatura no debe aumentarse demasiado, puesto que al incrementarse hay una mayor probabilidad de descarburización del acero, además se deteriora la cámara del horno, liberando una mayor cantidad de cascarilla, que no solo puede contaminar el acero y disminuir la vida útil de la resistencia eléctrica del horno , sino hacer más difícil obtener la presión de vacío que se requiere del horno
- Los valores en flexión para el acero Tipo 420 tratado térmicamente, esfuerzo a la fluencia, el máximo esfuerzo y módulo en flexión no variaron significativamente para las durezas de 38 y 42 HRC, por lo cual se puede establecer que dentro de este rango no se modifican la resistencia a este tipo de esfuerzos.

- El acero inoxidable Custom 455 aumentó su resistencia a cargas torsionales y de flexión, para un tiempo de envejecido de 5 horas mientras que en 2 horas, el acero tuvo un comportamiento frágil en flexión, por lo tanto se debe dar un tiempo en el tratamiento para el crecimiento de los precipitados y la formación de la austenita revertida, que le permite mejorar la ductilidad y la tenacidad del acero evitando que este se fragilice.
- Los resultados en torsión y flexión, del acero Custom 455 variaron para las dos condiciones de tratamiento térmico. En torsión la de dureza de 42 HRC (tiempo de envejecido 2 horas a 480 °C) tuvo una mayor resistencia a cargas torsionales pero también fragilidad en flexión, mientras que la de dureza de 38 HRC (tiempo de envejecido 5 horas a 480°C) presentó una menor resistencia a torsión que la anterior, y su comportamiento bajo cargas de flexión fue dúctil.
- Durante la fabricación es necesario minimizar la presencia de carbonitruros de titanio en el acero *Custom 455*, debido a que si se forman este tipo de precipitados existe una menor cantidad de titanio libre para la formación de los precipitados de Ni_3Ti , y por lo tanto la dureza puede que disminuya
- El acero *Custom 455* envejecido durante 5 horas y de dureza de 38 HRC, presentó mayor resistencia a cargas de torsión y esfuerzos deflectores que el Tipo 420 de mayor dureza y puede ser aplicado como punta atornilladora de implantes dentales. Esta mayor resistencia se logra por que los precipitados del acero Custom 455 refuerzan la matriz martensítica en muchas más direcciones cristalográficas, que la matriz martensítica revenida del acero Tipo 420 .

- Los dos aceros inoxidables utilizados en este proyecto pueden ser aplicados como puntas atornilladoras de implantes dentales realizándoles su respectivo tratamiento térmico. A pesar que el acero Custom 455 es de mayor costo con respecto al Tipo 420, su tratamiento térmico resulta menos costoso comparándolo con el realizado sobre el acero Tipo 420 debido a que las temperaturas empleadas son menores, y a su vez las propiedades mecánicas en torsión y flexión son mejores para el acero Custom 455 tratado térmicamente, Los costos resultantes de la adquisición del material sumado con sus tratamientos térmicos y con mejores propiedades mecánicas para la aplicación de puntas de fijación de implantes dentales , hacen del acero Custom 455 más conveniente para este tipo de aplicaciones.

6. RECOMENDACIONES

- Para establecer la composición exacta de los precipitados presentes en el acero Custom 455, se debería aplicar técnicas avanzadas como el empleo de microsondas EDAX utilizadas en microscopía electrónica.
- Determinar la cinética de formación de los precipitados, para establecer con exactitud la respuesta al comportamiento frágil en flexión.
- Se recomienda tratar de automatizar la prueba de torsión, por medio del diseño de una base que aplique el torque de una manera constante, con el fin de mejorar la reproducibilidad del ensayo.
- Reducir la sensibilidad del torcómetro por medio de la realización de un programa en visual basic, con el fin de que se reduzca la velocidad de captura de datos de esta manera se puede disminuir la presencia de los picos de descenso y grandes variaciones en las gráficas torque- ángulo.
- Realizar pruebas de los aceros tratados térmicamente con la forma final de punta, inicialmente sobre prótesis dentales, y observar su comportamiento para luego pasar a la aplicación directa en la implantación dental.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] SUNDARAM, P Biomateriales: Historia, desarrollo y pronóstico. Conferencia III Congreso Internacional de materiales. Simposio materia 2005.
- [2] TECNIACEROS [www.tecniaceros.com/pdfs/acero_inoxidable.pdf]
- [3] VALENCIA, A Tecnología del tratamiento térmico de los metales. Ed Universidad de Antioquia.
- [4] FENDER, W Stainless – steel optional for medical tubing. [www.carttech.com].
- [5] THANAPORN K., EKKARUT V., MANA P. Y UMARIN P. *A Case Study on Applying of Metallurgical Technique in Reverse Engineering and Improving Mechanical Partsfor Armored Vehicles*. Technology and Innovation for Sustainable Development Conference, 2008.
- [6] VANDER VOORT G.F., Metallographic Techniques for Tool Steels, *Metallography and Microstructures*, Vol 9, *ASM Handbook*, ASM International, 2004, p. 1552.
- [7] Aserid S.C. [www.inoxidable.com/introduccion.htm].
- [8] VANDER VOORT G.F.,LUCAS G.M., y MANILOVA E.P., Metallography and Microstructures of Stainless Steels and Maraging Steels, *Metallography and Microstructures*, Vol 9, *ASM Handbook*, ASM International, 2004, p.1626.
- [9] Type 420 Stainless Steel, annealed bar [www.matweb.com].
- [10] Custom 455 Stainless Steel, annealed Bar [www.matweb.com].
- [11] Dislocaciones y mecanismos de endurecimiento [www.tecnun.es].

[12] Fenomenos de endurecimiento [www.metalurgia.uda.cl].

[13] Endurecimiento [www.utp.edu.co].

[14] Endurecimiento por solución sólida, por tamaño de grano y por dispersión. [www.uca.edu.sv].

[15] CALLIARI.I, ZANESCO.M, DABALÁ.M, BRUNELLI.K Y RAMOUS.E. *Investigation of microstructure and properties of a Ni-Mo martensitic stainless steel*. Material and desing 29 (2008) ,p 249.

[16] High performance cast high steels [www.amc.atcorp.org].

[17] MORENO.A. ,LEITE M.V. y BORGES P.C, *Efecto de la nitruración a plasma en el endurecimiento por precipitación del acero 15-5 PH*, Información Tecnológica, Vol. 16 N°2-2005, p 36.

[18] HSIANO C.N., CHIOU C.S. Y YANG J.R. *Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel*, Materials Chemistry and Physics 74 (2002) p 134.

[19] PADILHA. A, PLAUT.L Y RIOS. P, *Steel Heat Treatment and Metallurgy and Technology* ,cap 12 , p 37

[20] MENDEZ.D, Una revisión de los aceros maraging, Universidad de chile, departamento de ingeniería metalúrgica, p 8.

[21] Nobel biocare [www.nobelbiocare.com].

[22] Proclinic [www.proclinic.com].

[23] cartech [www.cartech.com]

[23] WOODYATT L.R. y KRAUSS G., *Iron-Chromium-Carbon System at 870 °C*, *Metall. Trans. A*, Vol 7, 1976, p 983–989.

[24] DOUTHETT J, Heat Treating of Stainless Steels, *Heat treatment, Vol 4 ,ASM Handbook*, ASM International, 2004, p. 1725

Normas técnicas.

[25] ASTM E3-01 “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”.

[26] ASTM E 290-97a. Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility, U.S.A. 2005.

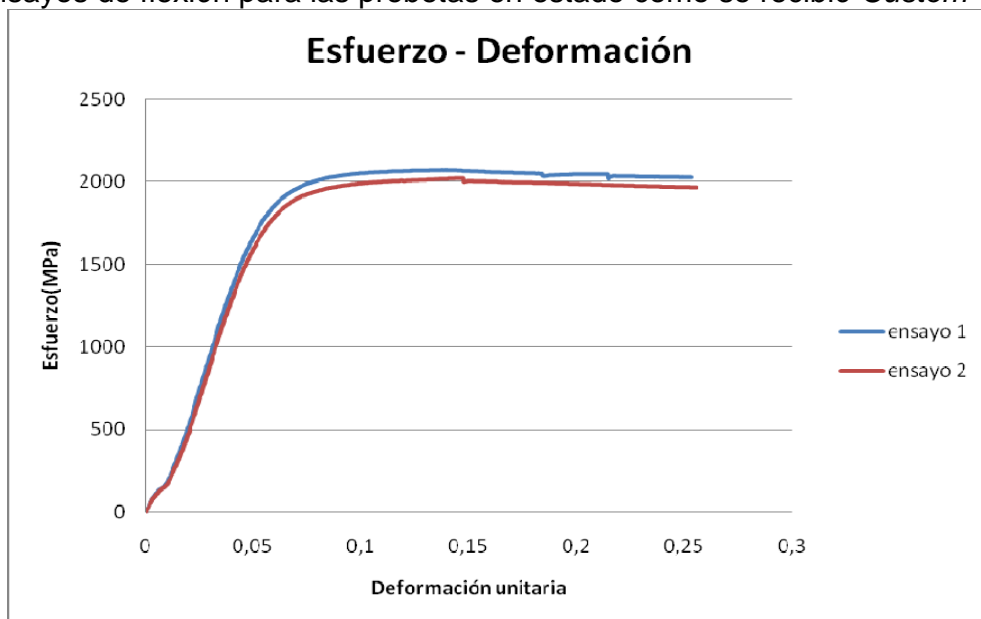
[27] ASTM E 18 – 05 Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials.

[28] ASTM E112-96 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size

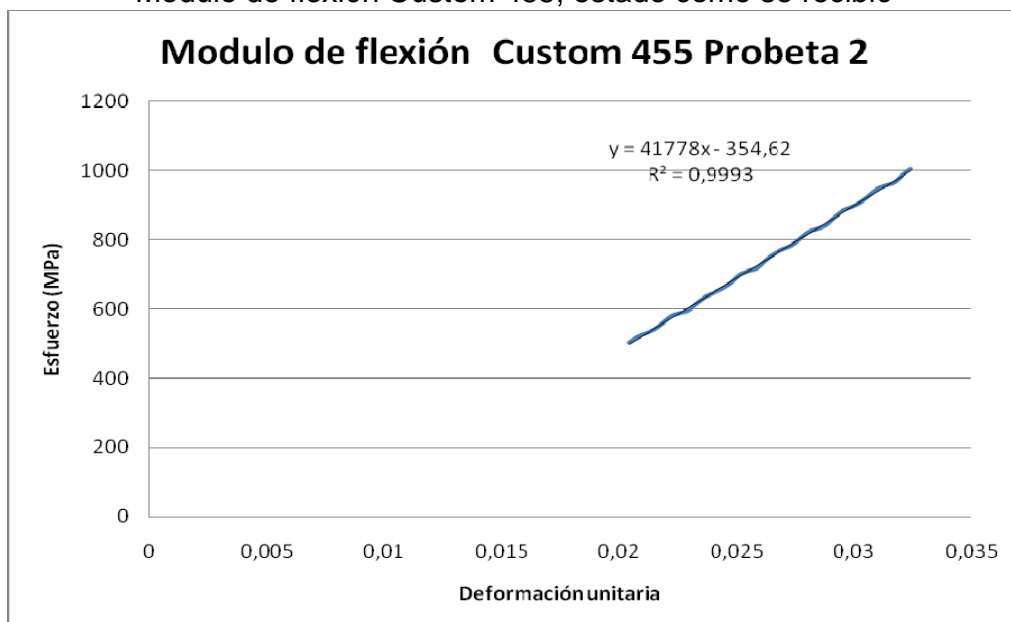
ANEXOS

ANEXO A ENSAYOS DE FLEXIÓN PARA LAS PROBETAS EN ESTADO COMO SE RECIBIÓ

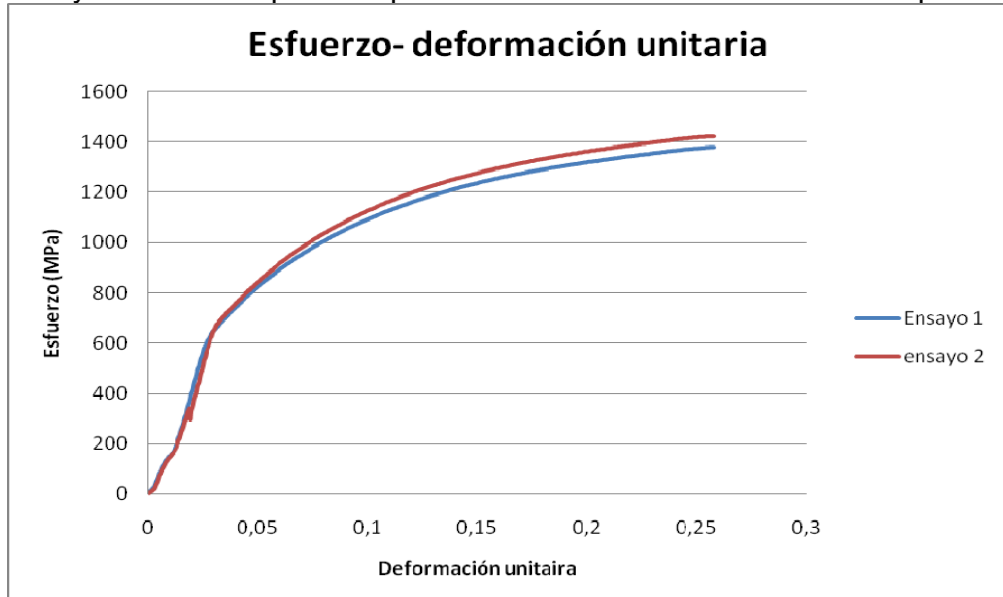
Ensayos de flexión para las probetas en estado como se recibió *Custom 455*



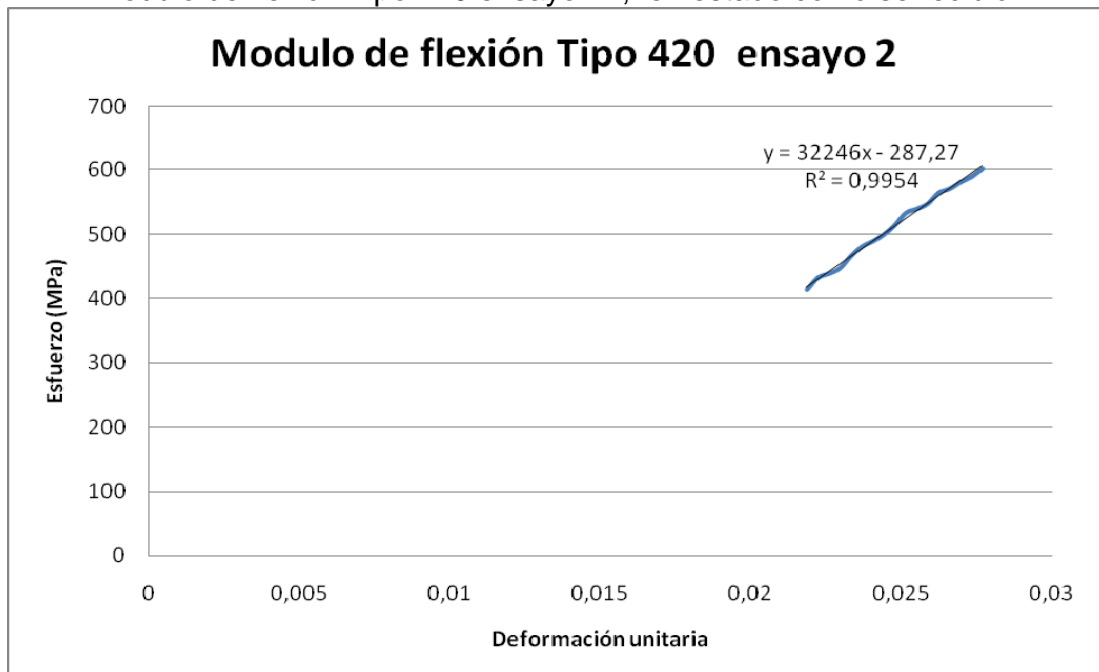
Modulo de flexión Custom 455, estado como se recibió



Ensayos de flexión para las probetas en estado como se recibió Tipo 420

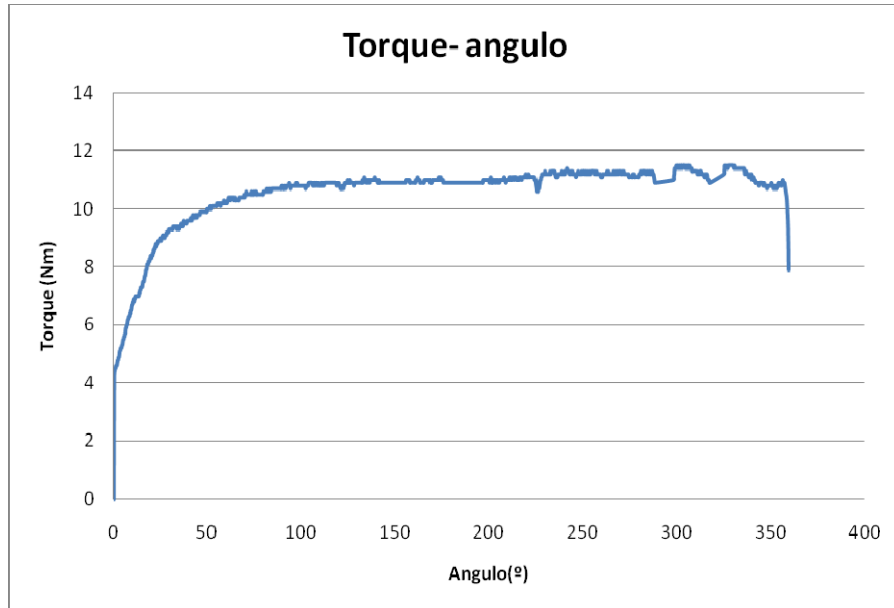


Modulo de flexión Tipo 420 ensayo 2 , en estado como se recibió

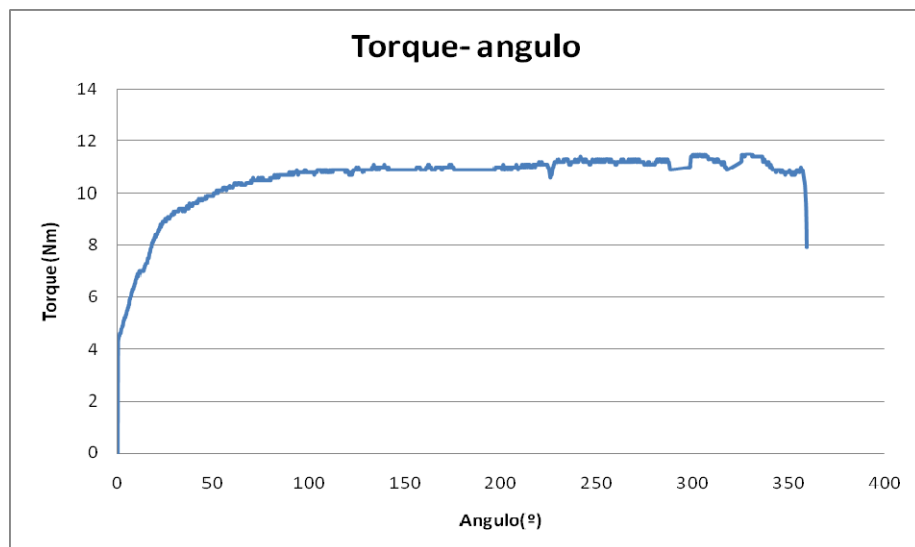


ANEXO B ENSAYOS DE TORSIÓN Y FLEXIÓN PARA LAS PROBETAS TRATADAS TERMICAMENTE.

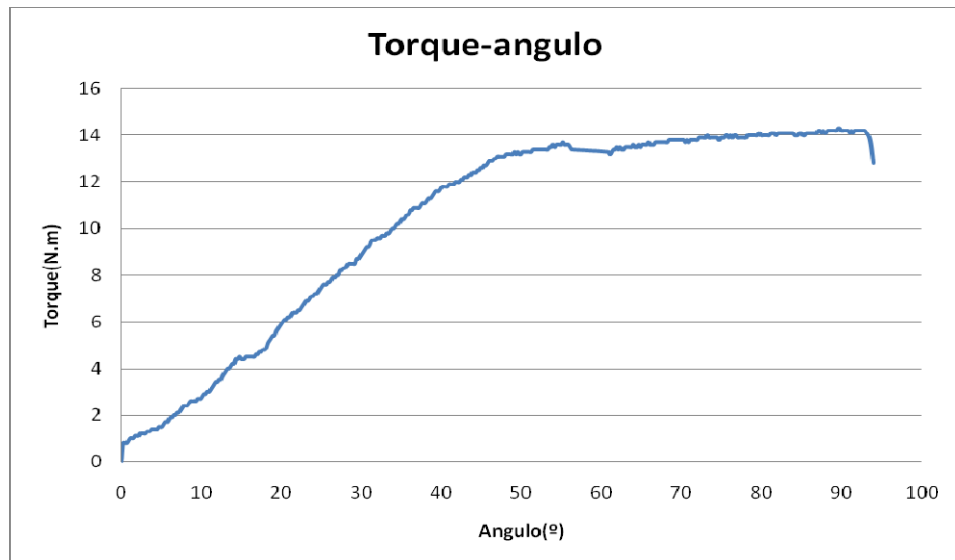
Grafica torque-ángulo Tipo 420 templado a 1000°C, revenido a 570 °C durante 2 horas.



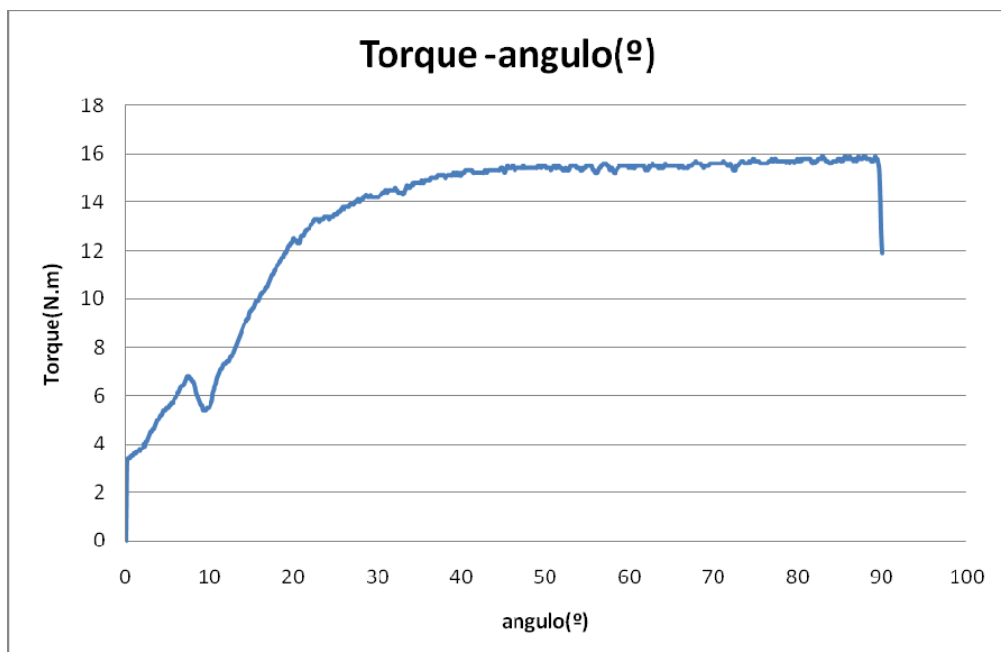
Grafica torque-ángulo Tipo 420 templado a 1000°C, revenido durante 2,5 horas a 570°C.



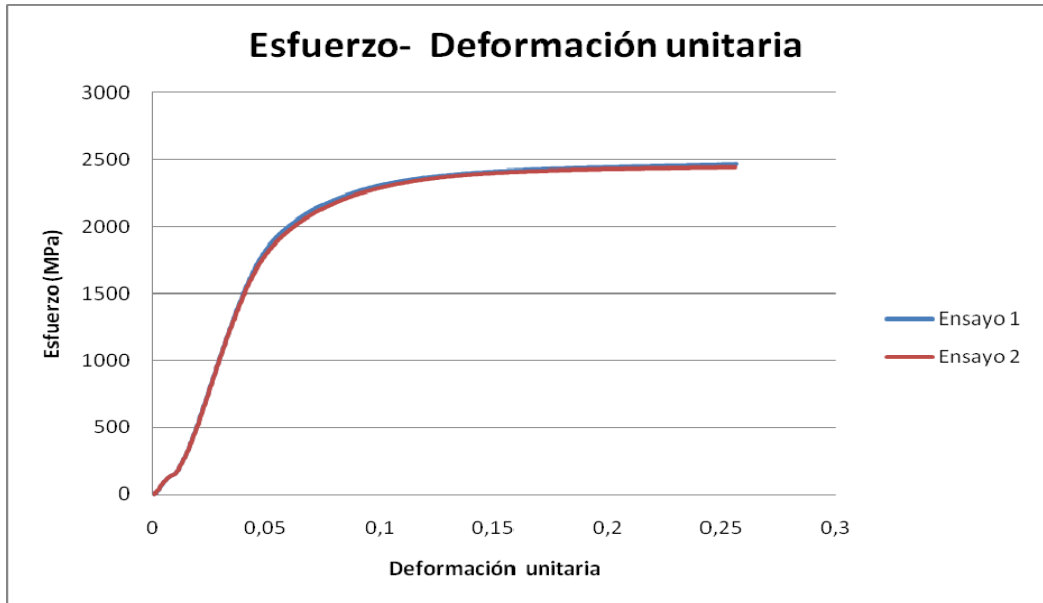
Grafica torque angulo Custom 455 solubilizado a 850°C durante una hora enfriado en agua , envejecido a 480°C durante 2 horas.



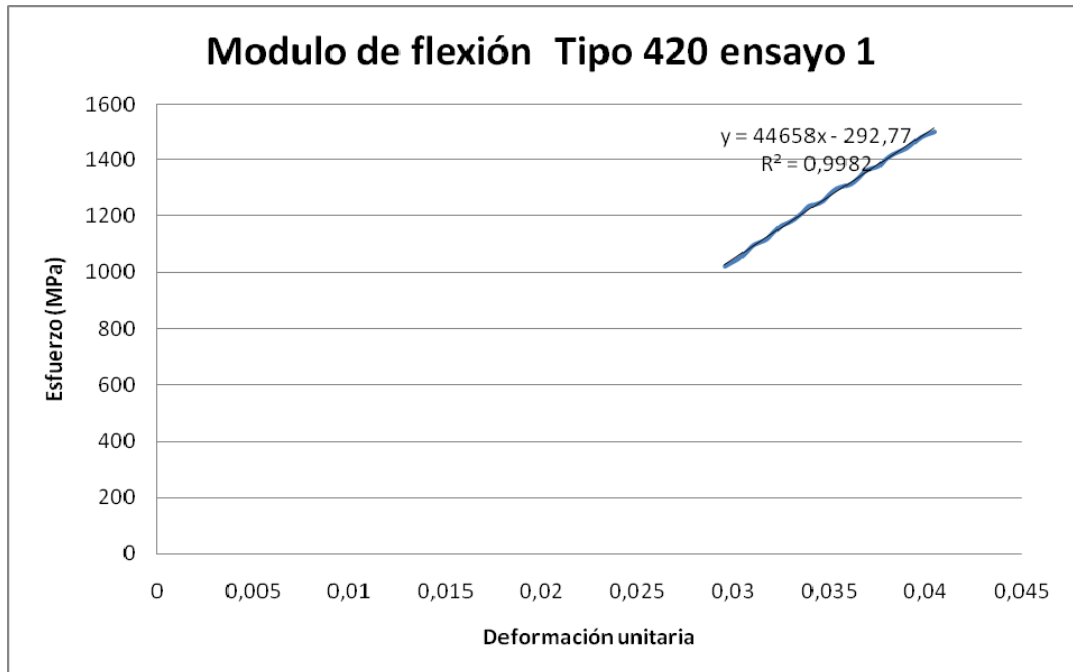
Grafica torque-angulo custom 455 solubilizado a 850°C durante una hora enfriado en agua , envejecido a 480°C durante 5 horas



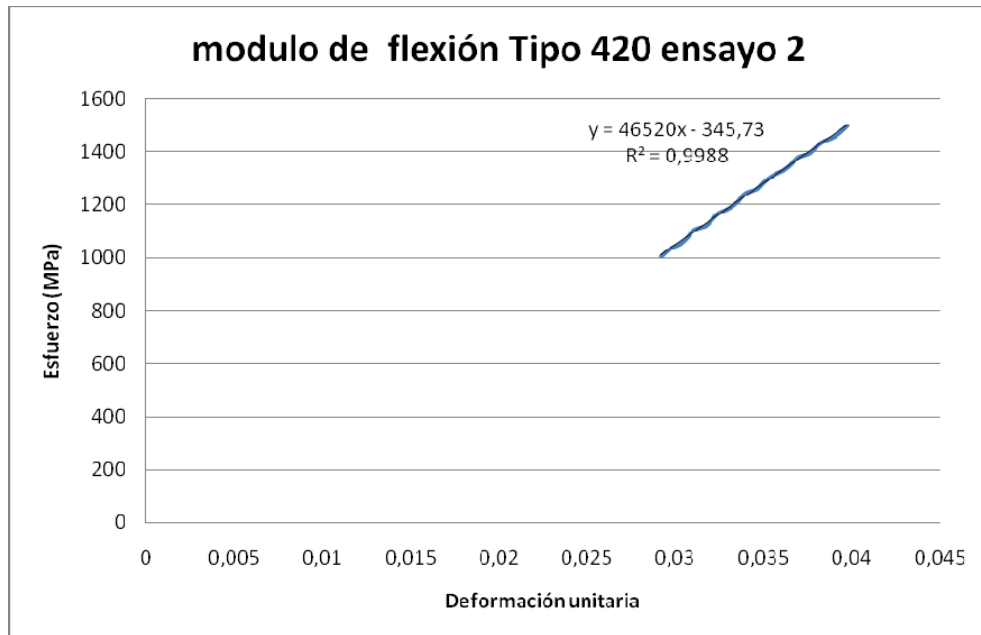
Ensayo de flexión Tipo 420 templado a 1000°C, revenido a 570°C durante 2 horas



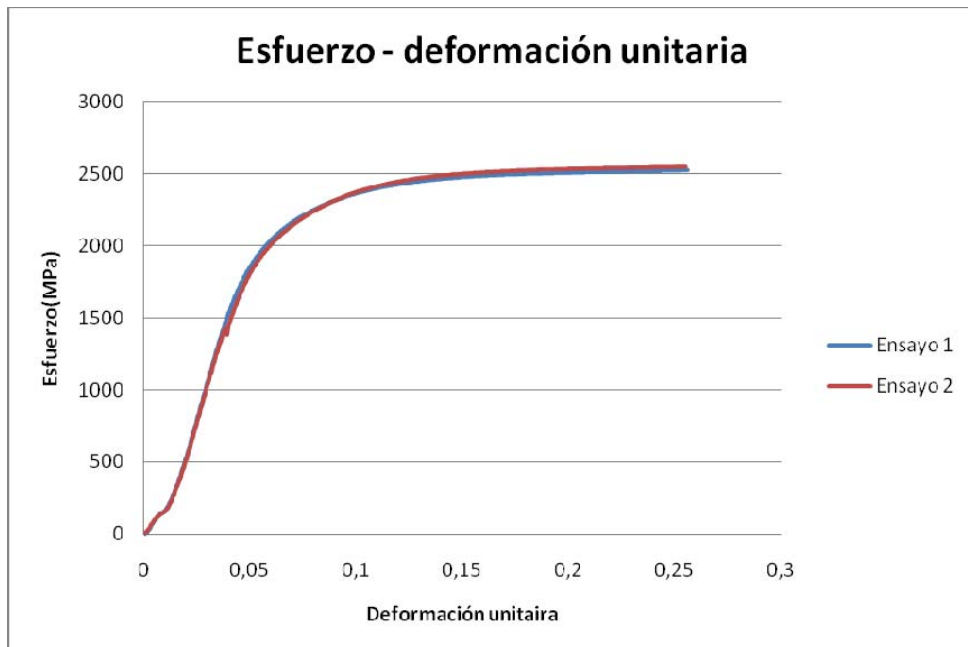
Modulo de flexión Tipo 420 ensayo 1 , templado a 1000°C y revenido dos horas a 570°C



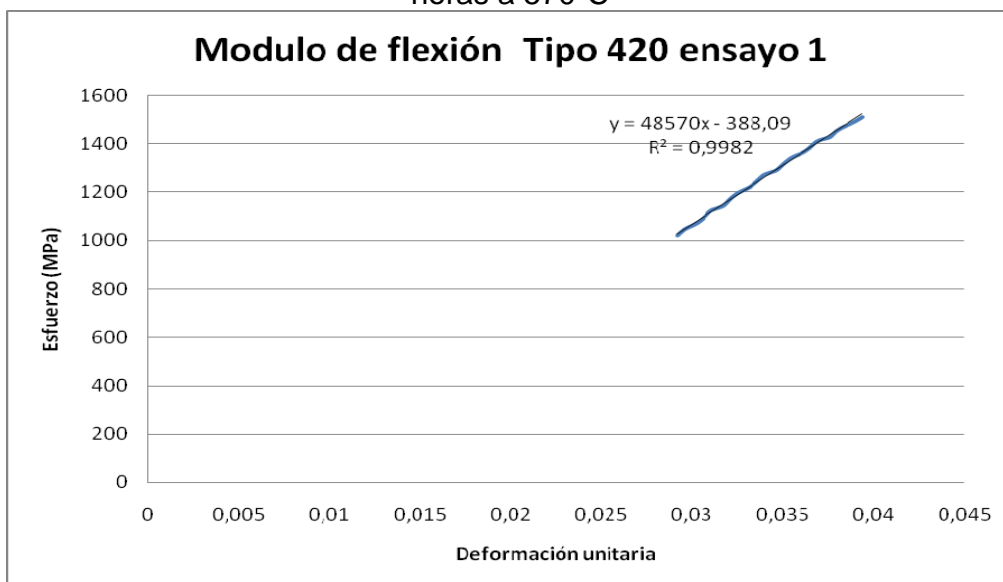
Modulo de flexión Tipo 420 ensayo 2 , templado a 1000°C y revenido dos horas a 570°C.



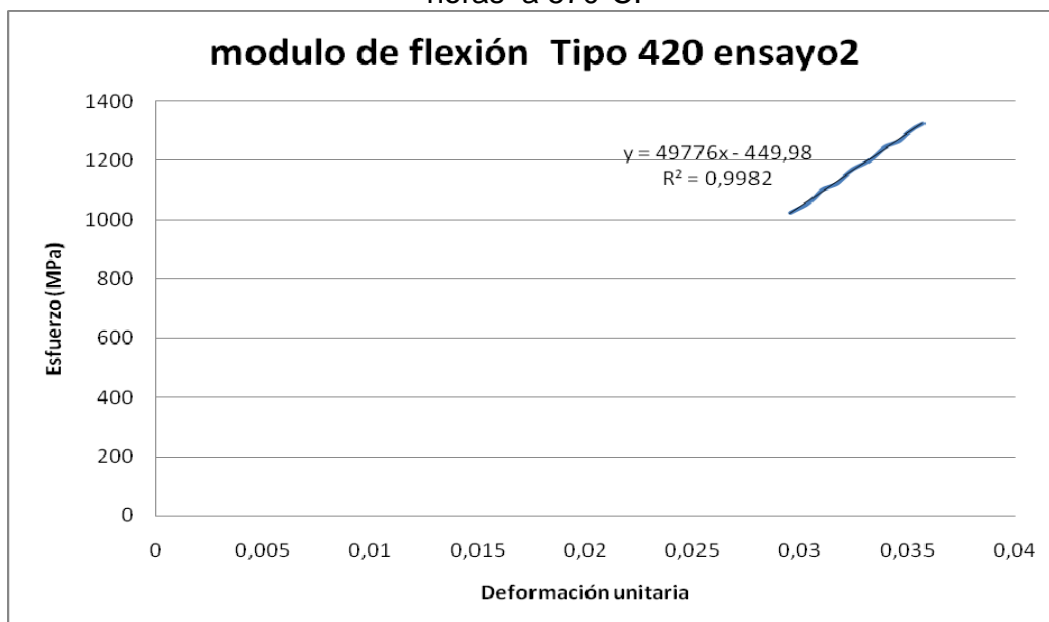
Ensayo de flexión Tipo 420 templado a 1000°C, revenido a 570°C durante 2,5 horas.



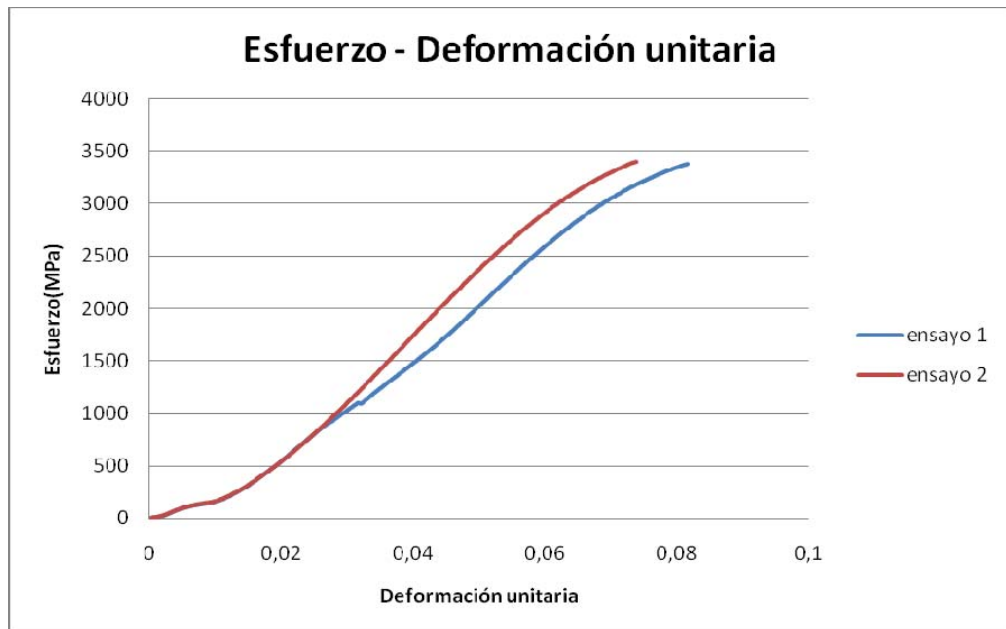
Modulo en flexión Tipo 420 ensayo 1 , templado a 1000°C y revenido durante 2,5 horas a 570°C



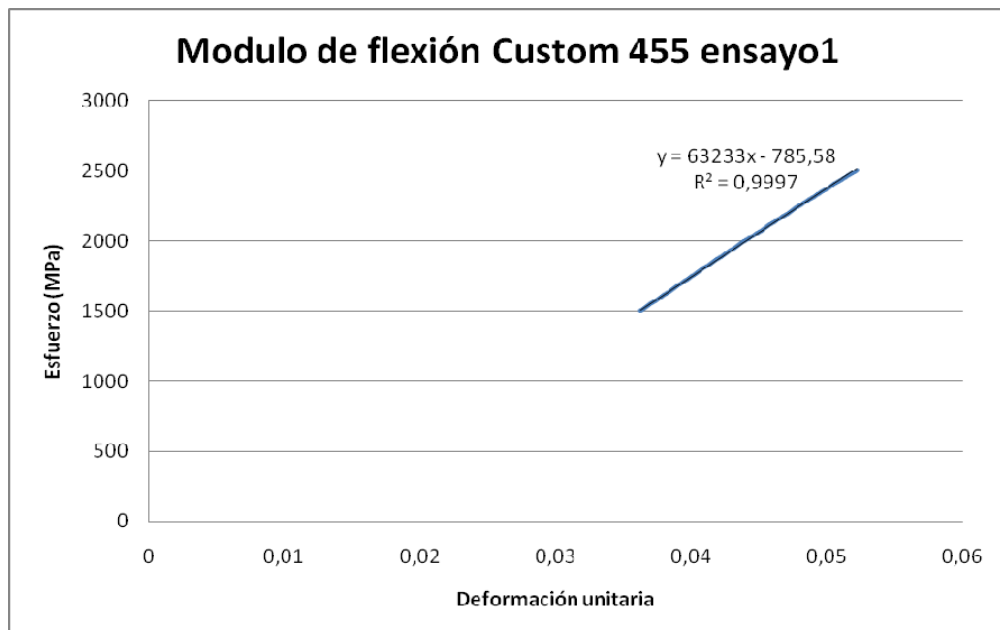
Modulo en flexión Tipo 420 ensayo 2 , templado a 1000°C y revenido durante 2,5 horas a 570°C.



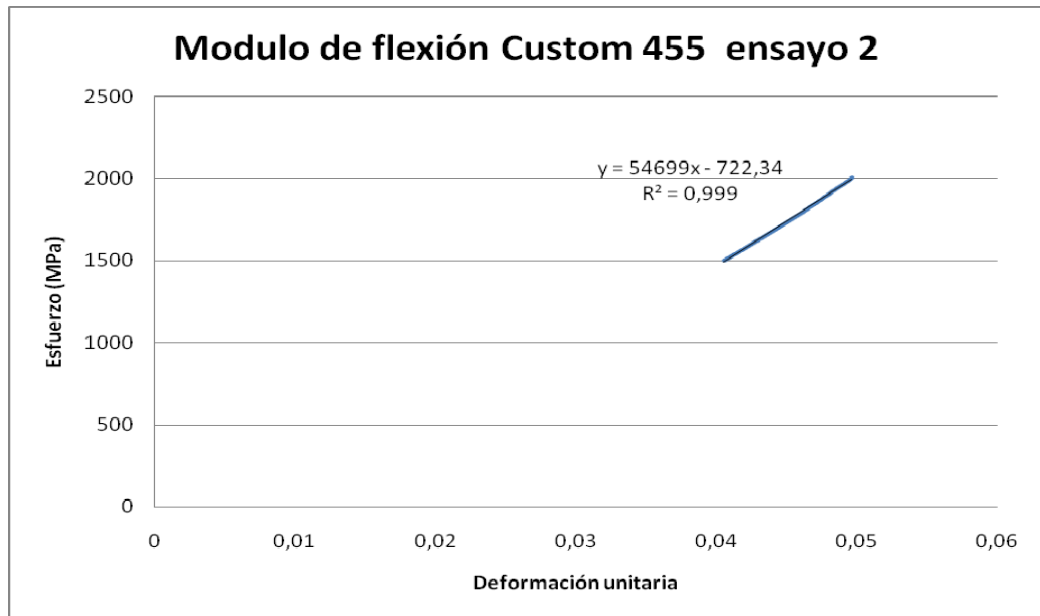
Ensayo de flexión Custom 455 solubilizado a 850°C durante una hora enfriado en agua , envejecido a 480°C durante 2 horas.



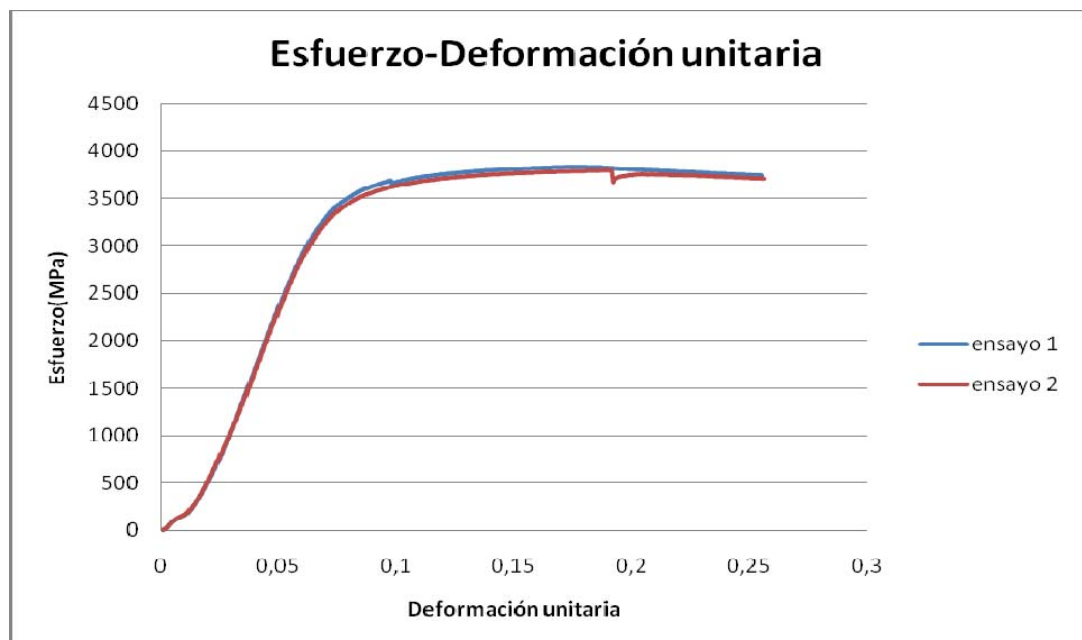
Modulo de flexión Custom 455 ensayo 1, custom 455 solubilizado a 850°C durante una hora enfriado en agua , envejecido a 480°C durante 2 horas.



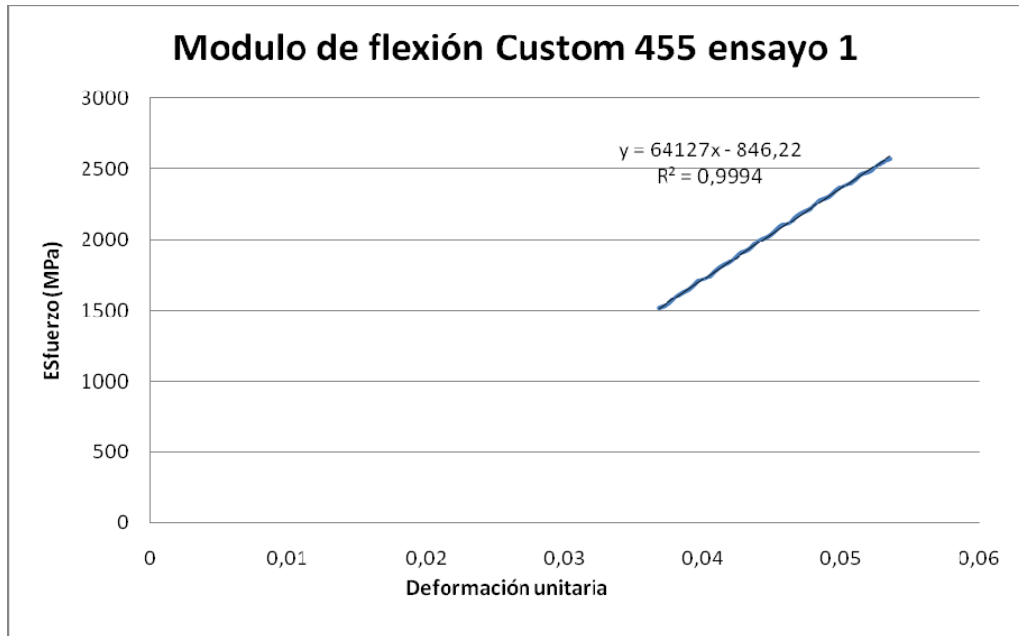
Modulo de flexión Custom 455 ensayo 2, custom 455 solubilizado a 850°C durante una hora enfriado en agua , envejecido a 480°C durante 2 horas.



Ensayo de flexión custom 455 solubilizado a 850°C durante una hora enfriado en agua , envejecido a 480°C durante 5 horas.



Modulo de flexión Custom 455 ensayo 1, custom 455 solubilizado a 850°C durante una hora enfriado en agua , envejecido a 480°C durante 5 horas.



Modulo de flexión Custom 455 ensayo 2, custom 455 solubilizado a 850°C durante una hora enfriado en agua , envejecido a 480°C durante 5 horas.

