MACROMODELAMIENTO DEL DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE UN ACERO AISI 1020 TEMPLADO DESDE TEMPERATURAS INTERCRITICAS

CAMILO ANDRÉS GARCÍA REY

EDWIN ALEJANDRO LEÓN CABRERA

MSc CARLOS ARTURO BOHÓRQUEZ ÁVILA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ, D.C.

2017

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN....7
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA....8
1.1 Descripción del Problema....8
1.2 Justificación....9
2. OBJETIVOS....10
2.1 Objetivo general....10
2.2 Objetivos Específicos....10
3. MARCO CONCEPTUAL....11
3.1 Antecedentes....11
3.2 Marco Teórico....25
3.2.1. Acero....25
3.2.1.1 Ferrita....25
3.2.1.2 Cementita....26
3.2.1.3 Perlita....26
3.2.1.4 Austenita....26
3.2.1.5 Martensita....26
3.2.2 Acero AISI1020....26
3.2.3 Diagrama esfuerzo-deformación....27
3.2.3.1 Módulo de elasticidad....28
3.2.3.2 Límite elástico....29
3.2.3.4. Punto de fluencia....29
3.2.3.5 Resistencia ultima....29
3.2.3.6 Relación de Poisson....29
3.2.4 Tratamientos térmicos....30
3.2.4.1 Temple....30
3.2.5 Ensayo de tensión....30
3.2.6 Método de elementos finitos....31
3.2.7 Micromodelos....31
3.2.8 Macromodelos....31

4. METODOLOGÍA 32
5. DESARROLLO 33
5.1 Preparación de probetas 33
5.1.1 Adquisición del material 33
5.1.2 Composición química 33
5.1.3 Cálculo de las temperaturas intercríticas (ITH) 34
5.1.4. Mecanizado de las probetas 34
5.1.5 Tratamiento térmico 35
5.2 Ensayo de tensión 36
5.3 Análisis metalográfico 39
5.3.1 Preparación 39
5.3.2 Metalografía 40
5.3.3 Fracción volumétrica 40
5.4 Selección del modelo constitutivo. 44
5.4.3 Modelo Plástico Cinemático 44
5.4.4 Modelo de plasticidad dependiente de la velocidad de deformación 45
5.4.5 Modelo de Ottosen 45
5.4.6 Modelo de Chaboche 48
5.4.7 Modelo de Johnson-Cook 49
5.4.6 Modelo de Ramberg Osgood (1943) 54
5.5 Simulación del ensayo en software de elementos finitos: ANSYS 57
5.5.1 Endurecimiento Isotrópico 58
5.5.2 Endurecimiento Cinemático 59
5.5.3 Modelamiento FEM (Finite Element Method) 60
6. ANALISIS DE DATOS 67
6.1 Probeta en estado de suministro 67
6.2 Probetas tratadas térmicamente 70
CONCLUSIONES 74
BIBLIOGRAFÍA 75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Posibles configuraciones de trenzado 12
Ilustración 2. Efecto del módulo de Young de las fibras al ser sometidas a cargas cortantes 12
Ilustración 3. Micrografía acero DP590 15
Ilustración 4. Diagrama esfuerzo-deformación. Acero DP590 16
Ilustración 5. Comparación de curvas esfuerzo-deformación 17
Ilustración 6. Diagrama esfuerzo-deformación. Resina E862 sometida a tensión 18
Ilustración 7. Diagrama esfuerzo-deformación. Resina E862 sometida a compresión 19
Ilustración 8. Diagrama esfuerzo-deformación. Resina E862 carga y descarga 19
Ilustración 9. Configuración de trenzado 20
Ilustración 10. Visualización de la deformación axial 21
Ilustración 11. Comparativa entre el macromodelo desarrollado por Timoté y López vs. Ensayos de tensión reales. 24
Ilustración 12. Diagrama esfuerzo-deformación: zona elástica, zona plástica 28
Ilustración 13. Plano de la probeta 34
Ilustración 14. Utensilios de agarre roscados 35
Ilustración 15. Probetas roscadas y utensilios de agarre 35
Ilustración 16. Horno Mufla MF-2005 35
Ilustración 17. Máquina universal de ensayos Shimadzu UH-50A 36
Ilustración 18. Curva de esfuerzo-deformación: AISI 1020 en estado de suministro. 37
Ilustración 19. Esfuerzo-deformación: AISI 1020 templado a 800°C. 38
Ilustración 20. Esfuerzo-Deformación: AISI 1020 estado de suministro y templado 800°C 39
Ilustración 21. (a) Microscopio Axio Observer D1m. (b) Probetas utilizadas en la prueba metalográfica. 40
Ilustración 22. Micrografías 100x. : (a) Suministro. (b) Temple (800°C) 41
Ilustración 23. Micrografías 500x: (c) Suministro. (d) Temple (800°C) 41
Ilustración 24. Micrografías 1000x. (e) Suministro. (f) Temple (800°C) 41
Ilustración 25. Fracción volumétrica de las fases: (g) Suministro 100x. (h) Temple (800°C) 100x. .. 42
Ilustración 26. Fracción volumétrica de las fases: Estado de suministro 42
Ilustración 27. Fracción volumétrica de las fases: Temple (800 °C) 42
Ilustración 28.Diagrama de equilibrio Hierro-Carbono. 43
Ilustración 29. Comportamiento según modelo de Ottossen. 47
Ilustración 30. Esfuerzo-Deformación. Modelo de Ottossen aplicado a las curvas reales de tensión en la investigación. 47
Ilustración 31. Esfuerzo-deformación: Modelo de Johnson-Cook para acero AISI 1020 en estado de suministro 51

Ilustración 32. Esfuerzo-deformación: Modelo de Johnson-Cook v Ensayo de tensión AISI 1020 en estado de suministro. 51
Ilustración 33. Esfuerzo-deformación: Modelo de Johnson-Cook para AISI 1020 templado (800°C) 53
Ilustración 34. Esfuerzo-deformación: Modelo de Johnson-Cook v Ensayo de tensión AISI 1020 templado (800°C) 53
Ilustración 35. Modelo de Ramberg-Osgood para distintos valores de n[29] 55
Ilustración 36.. Endurecimiento Isotrópico 58
Ilustración 37. Endurecimiento Cinemático 58
Ilustración 38. Diagrama Deformación-esfuerzo donde se aprecia el incremento en la fluencia debido a un endurecimiento isotrópico. 59
Ilustración 39. Diagrama Deformación-esfuerzo donde se aprecia la traslación del dominio elástico en una prueba uniaxial 59
Ilustración 40. ANSYS Workbench 14.5: Static Structural 60
Ilustración 41. Comportamiento isotrópico multilineal según el modelo de Ramberg-Osgood (Tabla 15) 61
Ilustración 42. Probeta de tensión ASTM E8 61
Ilustración 43. Probeta enmallada. 62
Ilustración 44. Modelo mecánico 62
Ilustración 45. Esfuerzo equivalente de von Misses para probeta en estado de suministro 63
Ilustración 46. Deformación plástica equivalente para probeta en estado de suministro 63
Ilustración 47. Esfuerzo-deformación tras la simulación del macromodelamiento para AISI 1020 en estado de suministro 64
Ilustración 48. Comportamiento isotrópico multilineal según el modelo de Ramberg-Osgood para probetas templadas (800°C) 65
Ilustración 49. Esfuerzo equivalente de von Misses para probetas templadas 65
Ilustración 50. Deformación plástica equivalente para probetas templadas 66
Ilustración 51. Esuerzo-deformación: resultados de la simulación ANSYS bajo el criterio de Ramberg-Osgood 66
Ilustración 52. Esfuerzo-deformación: Macromodelamiento según el criterio de Ramberg-Osgood para AISI 1020 en estado de suministro 68
Ilustración 53. Esfuerzo deformación: Comparativa entre el macromodelo de Ramberg-Osgood y el ensayo de tensión a acero AISI 1020 en estado de suministro 69
Ilustración 54. Esfuerzo-deformación: Macromodelo de Ramberg-Osgood para probetas templadas a 800°C 71
Ilustración 55. Esfuerzo-Deformación: Macromodelo de Ramberg-Osgood vs. Ensayos de tensión a probetas de AISI 1020 templadas a 800°C 72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del material: Resina E862 20
Tabla 2. Resumen de propiedades: Resina E862 21
Tabla 3. Resumen de propiedades: Resina PR520 22
Tabla 4. Módulo tangente y límite elástico para las fases obtenidas por Timoté et al. 23
Tabla 5. Propiedades mecánicas: AISI 1020 27
Tabla 6. Composición química: AISI 1020 33
Tabla 7. Propiedades mecánicas: Acero AISI 1020 en estado de suministro 37
Tabla 8. Validación formulación modelo de Ottossen. 46
Tabla 9. Formulación para el modelo de Chaboche 49
Tabla 10. Constantes de aplicación para el modelo de Johnson-Cook para AISI 1020 en estado de suministro 50
Tabla 11. Deformación-Esfuerzo según el modelo de Johnson-Cook para AISI 1020 en estado de suministro 50
Tabla 12. . Constantes promedio del modelo Johnson-Cook para material templado (800°C) 52
Tabla 13. Deformación-esfuerzo según el modelo de Johnson-Cook para AISI 1020 templado (800°C) 52
Tabla 14. Constantes del modelo de Ramberg-Osgood para AISI 1020 en estado de suministro ... 55
Tabla 15. Deformación-esfuerzo según Modelo de Ramberg-Osgood para AISI 1020 en estado de suministro 56
Tabla 16. Constantes del modelo de Ramberg-Osgood para AISI 1020 templado (800°C) 56
Tabla 17. Deformación-esfuerzo según el modelo de Ramberg-Osgood para AISI 1020 templado (800°C) 57
Tabla 18. Propiedades físicas y mecánicas para AISI 1020 en estado de suministro 60
Tabla 19. Propiedades mecánicas para AISI 1020 templado (800°C) 64
Tabla 20. AISI 1020 en estado de SUMINISTRO: Deformación-esfuerzo según los criterios de solución en ANSYS.....**¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 21. AISI 1020 TEMPLADO (800°C): Deformación-esfuerzo según los criterios de solución en ANSYS 70

INTRODUCCIÓN

La clasificación del acero es tan amplia como la variedad de sus aplicaciones en la industria, es el material de ingeniería por excelencia debido a sus características mecánicas; se pueden encontrar aceros de alta dureza, otros con una ductilidad destacable, además de todas las particularidades que se pueden obtener con diferentes aleaciones, tratamientos térmicos y recubrimientos superficiales. La maquinabilidad del acero permite que pueda ser utilizado en diferentes labores, esta es la razón por la cual la caracterización de las diferentes presentaciones del acero se ha convertido en un objetivo primordial en la rama investigativa de la ingeniería.

Uno de los métodos más utilizados en la actualidad para la representación y análisis de procesos mecánicos es la metodología de elementos finitos o por sus siglas en inglés FEM (Finite Element Method); el software de diseño mecánico con énfasis en FEM ayuda al ingeniero a orientar su proceso de diseño para que de la selección de material y dimensionamiento se obtenga el mejor desempeño posible de su producto sin la estricta necesidad de acudir a ensayos destructivos como las pruebas de tracción, torsión, flexión, etc. Esta es la razón por la cual los programas CAD (Computer-Aided Desing) con herramientas de FEM son una herramienta principal para los ingenieros y estudiantes debido a la facilidad que tienen para recrear procesos mecánicos con alta precisión que puedan certificar las pruebas físicas realizadas o por realizar.

La importancia del macromodelamiento o micromodelamiento en el diseño mecánico y selección de materiales yace en la oportunidad de tomar decisiones con la ventaja de poder comparar diferentes configuraciones (material base, tratamientos térmicos, procesos adicionales) evitando el trabajo y costos adicionales de los ensayos mecánicos tradicionales, de allí surge la necesidad de extraer la mayor cantidad de información posible de trabajos como el que aquí se plantea.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del Problema

Una de las fases principales del proceso de diseño mecánico es la selección de un material que posea cualidades mecánicas suficientes para responder de forma eficiente a los requerimientos del cliente, es una labor que requiere análisis de orden químico, físico y mecánico, esto para determinar la viabilidad de uso de dicho material en una función específica. Las pruebas y ensayos mencionados anteriormente, requieren una inversión de capital y de tiempo lo cual se traduce en costos de producción adicionales. Una de las pruebas más utilizadas en la industria es el ensayo ASTM E8, el cual da las pautas para realizar análisis mecánico de tensión a probetas de un material definido con el fin de obtener una gráfica de esfuerzo en función de la deformación, lo que ayuda a definir propiedades mecánicas del material tales como, módulo de elasticidad, límite de fluencia, esfuerzo último a la tensión entre otras.

La optimización como objetivo fundamental de la ingeniería, busca la reducción de tiempo y capital que puedan traducirse en un aumento de las utilidades, así, los análisis de elementos finitos se han involucrado en la ingeniería aplicada desechando casi por completo tareas que se realizaban en el pasado como las extensas hojas de cálculo, modelos, prototipos o maquetas costosas entre otros. Los ensayos mecánicos son de los procesos que los programas CAD desean reducir tanto como sea posible, para así reducir los costos asociados de un proyecto, de esta forma, se ha llegado a la generación de macromodelos y micromodelos, procesos que mediante análisis por elementos finitos simulan el comportamiento de algunos ensayos destructivos y que generan resultados de gran precisión, una gran ayuda a la hora de tomar decisiones.

Involucrando los ensayos mecánicos con los análisis por método de elementos finitos se puede establecer una nueva herramienta para el análisis de materiales, que facilite los procesos de selección, una herramienta informática que esté a la mano de los ingenieros de diseño para corroborar o extraer la información necesaria para la generación de nuevos componentes, el objetivo del micro y macromodelamiento es reducir una de las tareas más complejas como lo es la caracterización de materiales.

1.2 Justificación

Colombia, nación en vía de progreso necesita la expansión de sus conocimientos para reformar la industria y a través de la innovación y el desarrollo de nuevas tecnologías llegar a ser una nación competitiva en el mercado mundial, por lo tanto, la investigación es protagonista en la academia y en las grandes compañías que buscan reformar sus procesos, mejorar la eficiencia y lograr la mayor cantidad de utilidades posibles.

A partir de modelos de comportamiento de los materiales, es posible atacar las características que se deseen para obtener respuesta positiva ante determinadas labores, lo que se traduce en un ahorro de tiempo y dinero al no tener que realizar los análisis que se usan en la actualidad. El acero AISI 1020 hace parte de los materiales más comercializados, es un acero de fácil mecanizado, permite ser soldado con cierta facilidad y es muy utilizado para hacer engranajes, ejes, cadenas, tornillería y gran variedad de soportes estructurales, lo que lo convierte en un acero importante dentro del campo ingenieril.

Para llevar a cabo el estudio presentado en este documento, es necesario contar con un programa de análisis por método de elementos finitos, dicha herramienta es brindada por la universidad, de esta forma, se cuenta con ANSYS 14.5 un software de FEM, muy conocido entre los estudiantes de Ingeniería mecánica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Para medir el desempeño del modelo, es necesario hacer una comparación con un ensayo destructivo de tensión por lo que es necesario el uso de la máquina universal de ensayos Shimadzu, otra de las herramientas de la universidad, para así, cumplir los objetivos que están planteados más adelante en este mismo documento.

El objetivo principal de esta serie de proyectos investigativos es brindarle los instrumentos a los ingenieros para que desarrollen procesos más eficientes, que mejoren la productividad y que a partir del refinamiento de dichos conocimientos logren posicionar a nuestro país en un lugar más alto del desarrollo industrial en el mundo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Realizar el macromodelo mecánico multilineal del diagrama esfuerzo-deformación en un acero AISI 1020 templado desde temperaturas intercríticas

2.2 Objetivos Específicos

Realizar el ensayo de tensión especificado por la norma ASTM E8 en el acero AISI 1020 en estado de entrega y tratado térmicamente

Generar la gráfica esfuerzo deformación multilineal a partir de los datos obtenidos del ensayo de tensión.

Obtener las gráficas de esfuerzo deformación en el software de elementos finitos Workbench y comparar los resultados con los experimentales

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1 Antecedentes

Los modelos de comportamiento son métodos que se utilizan hace mucho tiempo, por lo cual es necesario establecer un marco de referencia que permita al lector conocer ciertos conceptos que mejorarán el entendimiento de lo que se plantea realizar a lo largo de este documento. De esta forma, planteamos un marco de referencia temporal correspondiente a los últimos 20 años, periodo en el cual la investigación de materiales ha tenido su auge y por ende donde se encuentra mayor variedad de trabajos que compartan métodos y/o conclusiones con el que aquí se realiza.

En el año 2003, Luis A. Godoy del Departamento de Estructuras, Universidad Nacional de Córdoba, evidencia un estudio de micro y macro estructuras y todo su análisis mecánico basado en elementos finitos; explicando en su trabajo el análisis macro el cual se considera en medidas similares a las del sólido y en el cual se analizan variables como comportamiento elásticos, plasticidad y grietas visibles; por otra parte micro mecánica, realizando el análisis en el orden de micrones, analizando el comportamiento entre granos del material, formación de vacíos, porosidades, micro grietas y fases de los elementos, Por medio de varia técnicas y teoremas como lo son ensamble de esferas, elementos Voronoi, modelos equivalentes, modelos de crecimiento, algoritmos y autómatas celulares.; el autor muestra un acoplamiento entre el micro y macro modelamiento, demostrando la importancia de los dos y haciendo un énfasis en las diversidades que ofrece el campo de la micro canica, per resaltando que los dos de la mano del uso de elementos finitos pueden brindar datos muy precisos[1]

[2]En el 2004 en su trabajo “Modelo micro / macro-mecánico integrado de tejido Compuestos de tela bajo gran deformación”, un grupo de investigadores de la Universidad de Evanston USA, Pu Xue a, Jian Cao a,*, Julie Chen; por medio de un sistema de micro/macro modelamiento mecánico, desarrollaron un modelo capaz de predecir las propiedades mecánicas de la tela sometidos a grandes deformaciones o incluso cargas de corte, basados en la microestructura del material, su configuración, espesor, geometrías y configuraciones de los hilos,

[1] Luis A. Godoy. MODELOS Y ENFOQUES PARA PROBLEMAS CON ACOPLAMIENTO DE MICRO Y MACRO ESTRUCTURAS. Departamento de Estructuras, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba.2003. p. 1-21.

[2] Pu Xue a, Jian Cao a, Julie Chen. Integrated micro/macro-mechanical model of woven fabric composites under large deformation. University, Evanston USA.2004. p 1-12.

desarrollando análisis por medio de un modelo no ortogonal, y desarrollando pruebas experimentales, logrando coherencia en los resultados.

Desarrollando diferentes configuraciones de trenzado o tejido del hilo se evaluaron diferentes posibilidades.

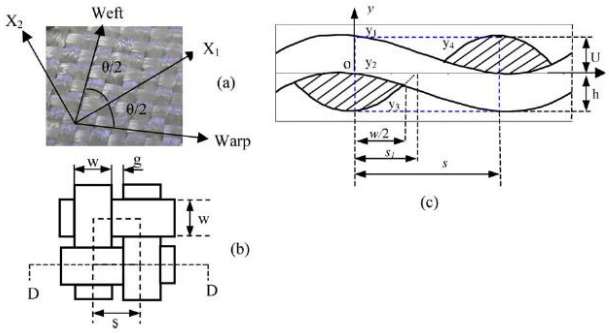


Ilustración 1. Posibles configuraciones de trenzado

Los autores proceden a realizar los diferentes ensayos para determinar las propiedades de los materiales seleccionados, es decir, propiedades al ser sometido a tensión o corte, y su configuración y espaciado entre hilos adecuado.

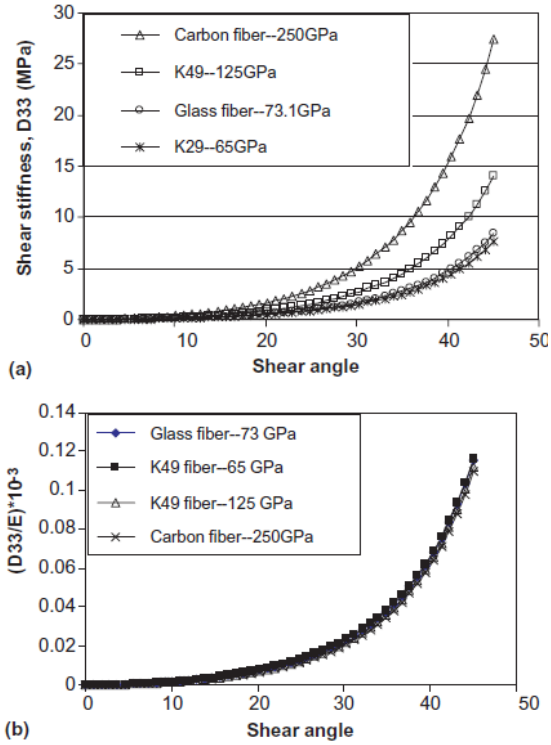


Ilustración 2. Efecto del módulo de Young de las fibras al ser sometidas a cargas cortantes

Evidenciando que la resistencia al corte es directamente proporcional al módulo de Young de la fibra, por otra parte el aumento de empaquetamiento o la unión más junta de las fibras, mejora la rigidez al ser sometido al corte.

Toda esa investigación permite la obtención de un modelo que identifica según los resultados mecánicos obtenidos las posibles configuraciones para desarrollar un tejido con mejores propiedades "Este modelo es capaz de reflejar el compleja redistribución y reorientación de fibras en el compuesto y la cuenta para la no linealidad del material y no linealidad geométrica. Con eso, podemos estudiar Los efectos de varios parámetros en el comportamiento de Compuestos tejidos, diseño eficiente de la arquitectura de tejido. Y personalice los componentes de un compuesto tejido para una aplicación específica"; el trabajo desarrollado por el autor nos muestra que en diferentes campos y con diferentes materiales, por medo de los macro y micro modelos mecánicos, podemos tener importantes desarrollos.

En su trabajo "Modelo para el análisis del comportamiento mecánico de materiales compuestos de matriz elastomérica reforzada" del 2008; Facundo J. Bellomoa, Liz G. Nallima y Sergio Ollerb de la asociación Argentina de Mecánica computacional; evidencia el modelo adecuado para el análisis y comportamiento mecánico para un compuesto formado por secciones paralelas elastómeras reforzadas con un compuesto de láminas metálicas, utilizando modelos híper elásticos, desarrollando análisis por elementos finitos multicampos y ensayos mecánicos, los cuales se desarrollan tanto numéricamente como experimentalmente. En esta última utilizando micro modelos y macro modelos que puedan garantizar y respaldar los datos obtenidos teóricamente.[3]

Después de realizar en análisis Teórico basados en los trabajos de "Kelly, 1991; Skinner et al., 1993" obteniendo resultados de cada modelo, el autor procede a la parte experimental, desarrollando distintos tipos de ensayos:

- Tracción simple, deformación homogénea.
- Ensayo de corte, caucho natural y alto amortiguamiento.
- Dispositivo de apoyo, micromodelo.
- Dispositivo de apoyo, macromodelo con teoría de mezclas.

Luego de desarrollar estos ensayos el grupo de investigadores, obtuvieron un muy buen resultado, teniendo resultados similares experimentalmente y teóricamente

[3] Facundo J. Bellomoa, Liz G. Nallima y Sergio Ollerb .MODELO PARA EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ ELASTOMÉRICA REFORZADA. Asociación Argentina de mecánica computacional.2008.p.3-21.

para deformaciones inferiores al 300%; por otra parte el micro y macro modelamiento, permitieron obtener valores de deformación y tensión demuestran notablemente el modelo elástico lineal de su comportamiento, todo este planteamiento y el trabajo expuesto por los autores permitió obtener valores teóricos acertados a los experimentales en las matrices elasto-metalicas, e implementarlas en la búsqueda de compuestos y estructuras antisísmicas.

En el 2009 un grupo de investigadores de la universidad de ingeniería Harbin en China, desarrollaron un estudio en su trabajo "Un macromodelo mecánico constitutivo de aleaciones con memoria de forma"; en el cual los autores buscaron plantear y establecer las ecuaciones de un macro modelo que expliquen los procesos de cambios de fase y térmicos de una aleación de memora de forma (SMA), comprendiendo en este término el efecto de súper elasticidad y memoria de los materiales, la idea del autor es superar las ecuaciones ya planteadas obtener unas más exacta que incluya otros factores que influyen en la deformación de un material, para ello, se plantea ecuación de evolución de memoria de forma en función entre un volumen de mar tensita existente y la energía que influye en la transformación de fase, incluyendo a diferencia de las ecuaciones existentes factores térmicos de fase y como estos afectan directamente. Y basándose en la expresión de la energía libre de Gibbs.[4]

$$G = G(\sigma, \eta, T)$$

Ecuación 1. Energía libre de Gibbs

Y relacionándola con la ecuación de esfuerzo – deformación:

$$\varepsilon = -\frac{\partial G(\sigma, \eta, T)}{\partial \sigma}$$

Ecuación 2. Relación de la energía de Gibbs y esfuerzo-deformación

Luego de una serie de análisis y ensayos, el grupo de investigadores llegaron a establecer una ecuación suponiendo propiedades isotrópicos una ecuación unidimensional con excelentes resultaos en comparación a la práctica, que suponiendo un estado isotrópico se puede utilizar para 3 dimensiones.

[4] ZHOU Bo†, LIU YanJu, LENG JinSong† & ZOU GuangPing. A macro-mechanical constitutive model of shape memory alloys. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China.2009

$$\varepsilon_{ij} = \frac{(1+\nu) * \sigma_{ij}}{E_a + (E_m - E_a) * \xi} - \frac{\nu * \sigma_{kk} * \delta_{ij}}{E_a + (E_m - E_a) * \xi}$$

Ecuación 3. Ecuación final unidimensional y tridimensional

En el 2014 Xin-cun Zhuang, Cheng Xu, Tao Wang, Zhen Zhao (Universidad de Shanghai), desarrollaron en su trabajo “Modo de falla y ductilidad del acero de doble fase con crack de borde”; mostraron en su trabajo que los materiales con ferrita y mar tensita dispersa, son materiales de alta resistencia, para el acero DP590, este grupo de investigadores desarrollo un completo análisis de sus comportamientos mecánicos, y su capacidad al ser sometido a esfuerzos por medio de micro y macro modelamiento.[5]

En primer lugar los autores procedieron a evaluar la microestructura del material, realizándole un pequeño tratamiento.

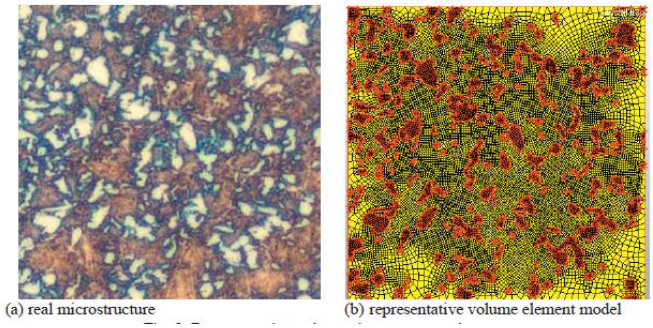
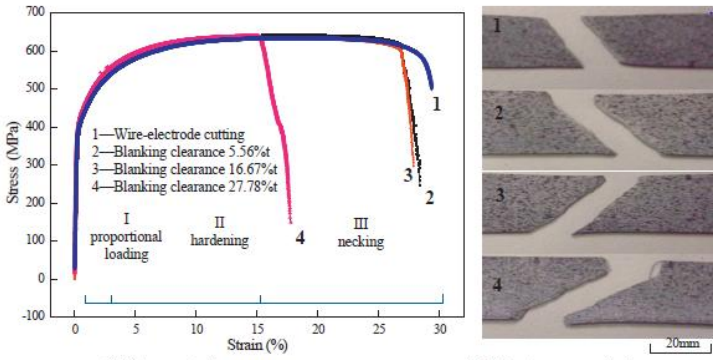


Ilustración 3. Micrografía acero DP590

En la ilustración 3. Se muestra el resultado de un ensayo real comparado con un ensayo representativo, mostrando los granos de martensita de color blanco y las partes oscuras son la cantidad de ferrita presente. Luego se sometio el material a los ensayos mecanicos, en los cuales se obtuvieron resultados de esfuerzo deformacion pertinentes, hasta el momento de la fractura.

[5] Xin-cun Zhuang, Cheng Xu, Tao Wang, Zhen Zhao. Failure mode and ductility of dual phase steel with edge crack. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014,Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan.2014.p 1-6.



(a) Stress-strain curves (b) Fracture morphology

Fig. 3. Stress-strain curves and fracture morphology of DP590 steel.

Ilustración 4. Diagrama esfuerzo-deformación. Acero DP590

Los resultados obtenidos son satisfactorios de su microestructura y concluyendo el comportamiento del material y como se genera la grieta o falla inicialmente en la fase ferri tica, posteriormente la grieta se expande hasta generar la falla; este trabajo permite interpretar claramente cómo se comportan los granos micro estructurales en un material cuando este es sometido a Cargas.

En el año 2016 Vuong Van Do, afiliado a la facultad de ingeniería civil de la Universidad Ton Duc Thang en Vietnam, publica su estudio en el que analiza el comportamiento de los modelos de falla de diferentes autores llevado a cabo con aceros estructurales de diversos tipos, con el fin de determinar la utilidad de programas de análisis por elementos finitos a la hora de predecir el daño en diversos procesos.

Inicialmente el autor establece un modelo constitutivo de falla no lineal[6], desarrollado por Kachanov y Lemaitre en el cual se define una variable *D* correspondiente a la variable de daño que está dada por:

$$D = 1 - \frac{A_D}{A_T}$$

Ecuación 4. Variable de daño dada por el caso de daño isotrópico

A partir de una serie de formulación matemática el autor logra establecer una ecuación que le permite determinar la tasa de evolución del daño:

[6] VUONG NGUYEN, Van Do. The Behavior of Ductile Damage Model on Steel Structure Failure. En: SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF CIVIL, URBAN AND TRANSPORTATION ENGINEERING CONFERENCE (2016: Viet Nam). ELSEVIER. Procedia Engineering 142. p. 26-33.

$$\dot{D} = -\dot{\lambda} * \frac{\partial F_D}{\partial Y} = -\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial Y} = \lambda * \frac{1}{1-D}\left(-\frac{Y}{r}\right)^s$$

Ecuación 5. Tasa de evolución del daño

Donde $\dot{\lambda}$ es el multiplicador plástico, Y es la tasa de liberación de energía de deformación por daño y s es el desviatorio del tensor de esfuerzos. Para determinar la validez del modelo expuesto anteriormente Aboutalebi y Farzin, ejecutaron un análisis FEM+CDM (Continuum Damage Mechanics), una práctica que ejemplifica la transición del daño en ensayos mecánicos que describe las curvas de carga versus desplazamiento de un acero St14 (DIN 1623) sometido a esfuerzos de tracción

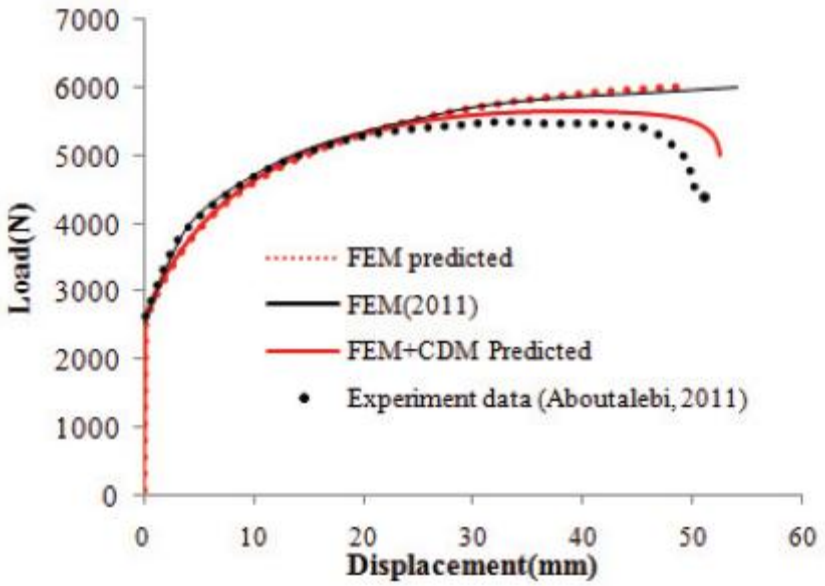


Ilustración 5. Comparación de curvas esfuerzo-deformación

Se observa que hay gran similitud entre las distintas curvas entre las cuales encontramos la predicción FEM+CDM, un ejemplo de análisis mediante FEM y de la misma forma se encuentra la curva generada mediante el ensayo físico desarrollado por el autor. El autor determina que la curva realizada mediante análisis FEM+CDM es la más cercana a las pruebas experimentales, por lo que su modelo es el más efectivo y preciso.

Un trabajo presentado porla NASA “Experimental and Analytical Characterization of the Macro Mechanical Response for Triaxial Braided Composite Materials”; por Justin D. Littell de la universidad de Akron,Ohio,su objetivo evaluar el comportamiento de distintos materiales, los cuales se necesitan utilizar en

compuestos del motor de areonaves, bien sea en la carcasa o incluzo en las cuchillas o aspas de ventlacion, es indispensable encontrar un material que sea lo suficientemente resitente y liviano; por lo tanto la investigacion se enfoca en someter distintas pruebas a materiales que posiblmente cumplan con lo requerido y elaborar un modelo micro y macro, que comparado con el ensayo sea similar y arroge resultados casi precisos.[7]

En general el autor se basa en la utilizacion de materiales de resinas, que cumplen con estas propiedades, siendo sometidos a distintos ensayos de tension y corte o incluso impacto, para determinar sus capacidades. Algunos ejemplos de los resultados obtenidos en los ensayos para el material resina E862

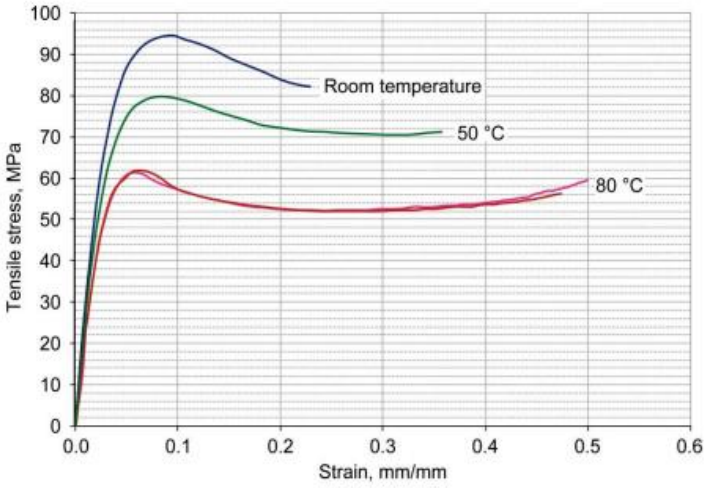


Figure 3.9.—Tensile stress-strain response for E862 resin at 10^{-3} s^{-1} strain rate and three temperatures.

Ilustración 6. Diagrama esfuerzo-deformación. Resina E862 sometida a tensión

[7] Justin D. Littell. Experimental and Analytical Characterization of the Macromechanical Response for Triaxial Braided Composite Materials. University of Akron.2013 p. 2-114

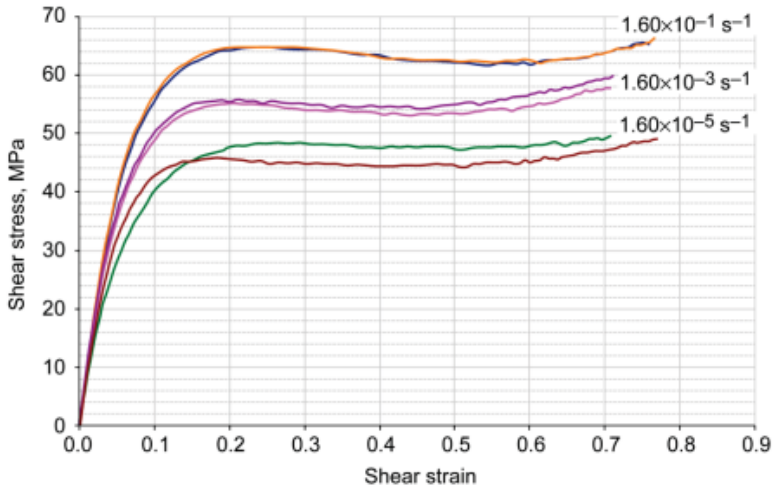


Figure 3.16.—Shear stress-strain response for E862 resin at room temperature.

Ilustración 7. Diagrama esfuerzo-deformación. Resina E862 sometida a compresión

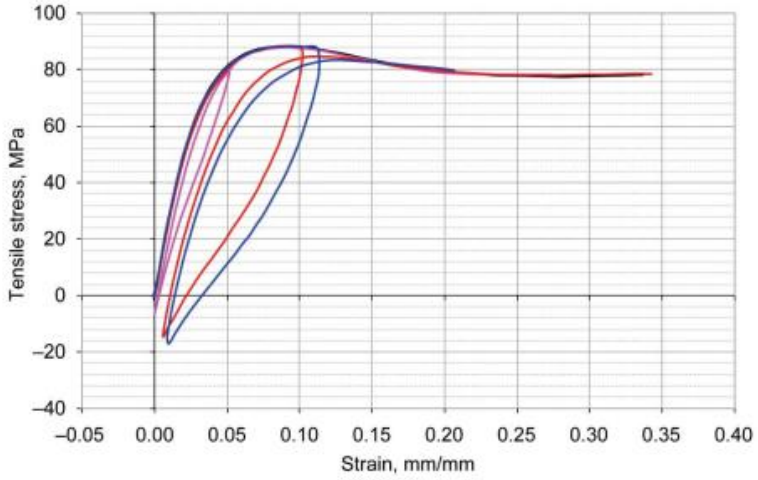


Figure 3.20.—Tensile load-unload stress-strain response for E862 resin at 1×10^{-1} s^{-1} strain rate and room temperature.

Ilustración 8. Diagrama esfuerzo-deformación. Resina E862 carga y descarga

El autor resume en una tabla los resultados obtenidos según el material utilizado y el ensayo al que fue sometido.

TABLE 3.1.—E862 RESIN MATERIAL PROPERTIES

	Test condition			Young's modulus, GPa	Poisson's ratio	Shear modulus (measured), MPa	Shear modulus (calculated), MPa
	Temperature,[a] °C	Strain rate	Load				
1	RT	10^{-5}	Tension	2.52	0.43	–	881
2	RT	10^{-3}	Tension	2.77	0.41	–	957
3	RT	10^{-1}	Tension	2.89	0.40	–	1032
4	50	10^{-3}	Tension	2.28	0.40	–	814
5	50	10^{-1}	Tension	2.57	0.40	–	917
6	80	10^{-3}	Tension	1.95	0.40	–	696
7	80	10^{-1}	Tension	2.58	0.38	–	934
8	RT	10^{-5}	Compression	2.71	0.39	–	974
9	RT	10^{-3}	Compression	2.72	0.35	–	1007
10	RT	10^{-1}	Compression	2.96	0.40	–	1057
11	50	10^{-3}	Compression	2.09	0.35	–	774
12	50	10^{-1}	Compression	2.29	0.35	–	848
13	80	10^{-3}	Compression	1.66	0.37	–	615
14	80	10^{-1}	Compression	1.90	0.35	–	703
15	RT	1.6×10^{-5}	Shear	–	–	801	–
16	RT	1.6×10^{-3}	Shear	–	–	977	–
17	RT	1.6×10^{-1}	Shear	–	–	1002	–
18	50	1.6×10^{-3}	Shear	–	–	768	–
19	50	1.6×10^{-1}	Shear	–	–	823	–
20	80	1.6×10^{-3}	Shear	–	–	692	–
21	80	1.6×10^{-1}	Shear	–	–	718	–

[a]RT is room temperature.

Tabla 1. Propiedades del material: Resina E862

En su investigacion el autor muesra la configuracion de fibra a utilizar.

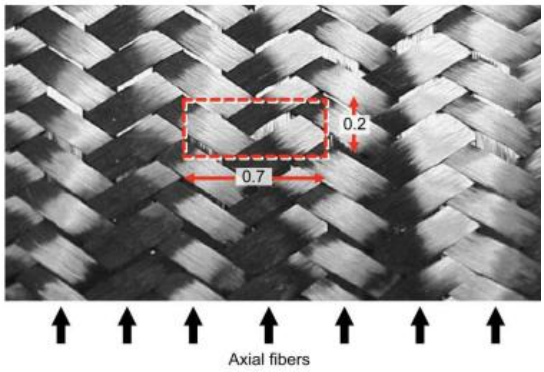


Ilustración 9. Configuración de trenzado

En la siguiente ilustración, el autor enseña según la configuración de las fibras la deformación axial obtenida.

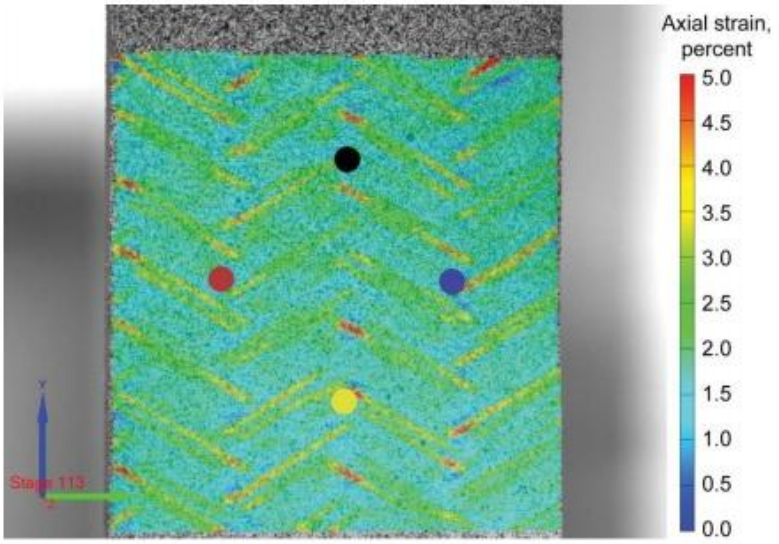


Figure 4.4.—Typical full-field strain distribution and point map used for global strain calculations during axial tension test.

Ilustración 10. Visualización de la deformación axial

Luego de realizar gran cantidad de ensayos a cada tipo de resina el autor califica cada uno de los resultados obtenidos y los proyecta en una tabla resumen

TABLE 5.5.—T700/E862 FIBER/RESIN MATERIAL PARAMETERS USED FOR LS–DYNA MODEL

Material parameter name (LS–DYNA name)	Value
Axial modulus (EA), GPa	51.3
Transverse modulus (EB), GPa	25.0
In-plane shear modulus (GAB), GPa	19.0
In-plane Poisson's ratio (PRBA)	0.071
Axial tensile failure strain (E11T)	0.0178
Axial compressive failure strain (E11C)	0.0058
Transverse tensile failure strain (E22T)	0.0144
Transverse compressive failure strain (E22C)	0.0086
In-plane shear failure strain (GMS)	0.0095
Axial tensile stress at failure (XT), MPa	809.4
Axial compressive stress at failure (XC), MPa	320
Transverse tensile stress at failure (YT), MPa	196
Transverse compressive stress at failure (YC), MPa	303
In-plane shear stress at failure (SC), MPa	257
Stress-limiting parameter for axial tension (SLIMT1)	0
Stress-limiting parameter for transverse tension (SLIMT2)	1
Stress-limiting parameter for axial compression (SLIMC1)	0
Stress-limiting parameter for transverse compression (SLIMC2)	0
Stress-limiting parameter for shear (SLIMS)	0

Tabla 2. Resumen de propiedades: Resina E862

TABLE 5.2.—T700/PR520 FIBER/RESIN MATERIAL PARAMETERS USED FOR LS–DYNA MODEL

Material parameter (LS–DYNA name)	Value
Axial modulus (EA), GPa	51.3
Transverse modulus (EB), GPa	25.0
In-plane shear modulus (GAB), GPa	19.0
In-plane Poisson's ratio (PRBA)	0.071
Axial tensile failure strain (E11T)	0.0216
Axial compressive failure strain (E11C)	0.018
Transverse tensile failure strain (E22T)	0.0168
Transverse compressive failure strain (E22C)	0.011
In-plane shear failure strain (GMS)	0.012
Axial tensile stress at failure (XT), MPa	1045
Axial compressive stress at failure (XC), MPa	377.1
Transverse tensile stress at failure (YT), MPa	362
Transverse compressive stress at failure (YC), MPa	345
In-plane shear stress at failure (SC), MPa	307.3
Stress-limiting parameter for axial tension (SLIMT1)	0
Stress-limiting parameter for transverse tension (SLIMT2)	1
Stress-limiting parameter for axial compression (SLIMC1)	0
Stress-limiting parameter for transverse compression (SLIMC2)	0
Stress-limiting parameter for shear (SLIMS)	0

Tabla 3. Resumen de propiedades: Resina PR520

En el trabajo el autor concluye que el material Resina PR520, obtuvo los mejores resultados satisfactorios para ser implementado en materiales ara aeronáutica.

El antecedente más importante relacionado a esta investigación es aquella llevada a cabo en 2017 donde Timoté y López desarrollan un macromodelo bilineal aplicado para la predicción de curvas esfuerzo-deformación en probetas de AISI 1045[8] en su forma base (material de suministro) y templadas a dos diferentes temperaturas (726°C; 788°C) sometidas a ensayos de tensión. Los autores utilizan el modelo de Rodriguez y Gutierrez el cual se compone de la formulación para predecir las curvas de tensión de las fases microestructurales *ferrita, perlita, vainita y martensita.* El modelo de Rodriguez-Gutierrez se expresa bajo la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma_0 + \alpha \times M \times \mu \times \sqrt{b} \times \sqrt{\frac{1 - \exp(-\mathrm{M}k_t\varepsilon)}{k_r \times L}}$$

Ecuación 6: Modelo de Rodriguez-Gutierrez

[8] TIMOTÉ, M. LÓPEZ, H. Macromodelamiento mecánico del diagrama esfuerzo-deformación en un acero AISI1045 templado desde temperaturas intercríticas: Modelo elástico-plástico de la curva de flujo. Bogotá. D.C. 2017. p 58-71. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica.

Donde σ_0 es el esfuerzo de Peierl`s, el cual está dado en función de la composición química del material; $\Delta\sigma$ es el endurecimiento aproximado del material a partir del contenido de carbono de las fases presentes en la microestructura; los demás términos hacen parte de una serie de constantes entre las cuales se encuentran: *M* (factor de Taylor); módulo cortante *μ; b* (vector de Burguer); *L* (trayecto libre medio de dislocación) y por último *K* (índice de recuperación).

Timoté et al. A partir de estudios metalográficos determina las fases y su contenido porcentual para así desarrollar el modelo planteado, las gráficas obtenidas para cada fase permiten obtener límite elástico y módulo tangente de las mismas, herramienta necesaria para el modelamiento FEM *(Finite Elements Method)*.

PROPIEDAD	**PROBETA**					
	Material base		**Templada (726°C)**		**Templada (788 °C)**	
	Ferrita	Perlita	Ferrita	Martensita	Ferrita	Martensita
Límite elástico [MPa]	313,66	101,68	216,35	585,46	218,83	528,09
Módulo tangente [MPa]	1165,46	332,78	666,27	1109,50	729,30	985,34

Tabla 4. Módulo tangente y límite elástico para las fases obtenidas por Timoté et al.

A partir del módulo *Static Structural* de ANSYS Workbench los autores definen las características del material según los resultados obtenidos en el modelo, la herramienta de plasticidad *Bilineal Isotropic Hardening* permite definir el comportamiento plástico de las probetas a partir del límite elástico y el módulo tangente. Tras el modelamiento, la definición de cargas y enmallado, se obtienen los siguientes resultados:

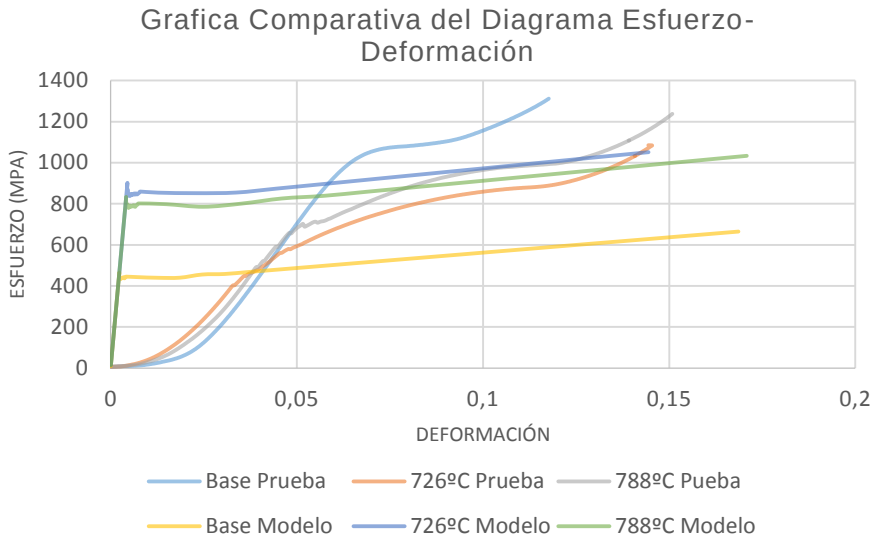


Ilustración 11. Comparativa entre el macromodelo desarrollado por Timoté y López vs. Ensayos de tensión reales[9].

En la ilustración 12, se describen gráficamente los resultados del macromodelamiento en comparación de los ensayos de tensión realizados. Las curvas a partir del ensayo demuestran una transición de la zona elástica a la zona plástica más paulatina mientras que las gráficas obtenidas a partir del macromodelo, señalan el comportamiento bilineal, las zonas de deformación están muy definidas, la elasticidad, el límite de fluencia y la plasticidad son características apreciables. No hay similitud considerable a lo largo de la deformación de estudio entre las gráficas, a excepción de los esfuerzos últimos a la tensión en las probetas sometidas a tratamiento térmico, las cuales llegan a valores cercanos entre éstas y sus respectivos modelos.

Él semillero de materiales de Ingeniería mecánica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas ha fomentado en los últimos años una serie de trabajos que permitan generar la caracterización de materiales, métodos y ensayos, por lo cual nace la necesidad de desarrollar este trabajo, como complemento del trabajo desarrollado por Timoté y López, para generar diversidad en los modelos y evolucionar a partir del trabajo de nuestros compañeros, para que así eventualmente el área de materiales desarrolle investigaciones más complejas, publicadas, disponibles en revistas científicas, abiertas al debate y mejora.

[9] Tomado de: TIMOTÉ, M. LÓPEZ, H. Macromodelamiento mecánico del diagrama esfuerzo-deformación en un acero AISI1045 templado desde temperaturas intercríticas: Modelo elástico-plástico de la curva de flujo. Bogotá. D.C. 2017. p 58-71. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica.

3.2 Marco Teórico

3.2.1. Acero

El acero es uno de los materiales más comunes en la actualidad, su utilidad se encuentra desde sencillos utensilios en los hogares, hasta en grandes máquinas o estructuras. Básicamente, el acero es un material de ingeniería, que consiste en la aleación de Hierro (Fe) y Carbono (C), esta mezcla es considerada como la básica para formar el acero, pero se puede incluir otros elementos que cambien las propiedades, con esto podemos encontrar diferentes tipos de aceros, cada uno con su respectiva composición. Por su composición el acero es un material férrico, y su composición de carbono, no supera el 2%.

Este material es extraído completamente del subsuelo, ya que sus componentes en su gran mayoría son minerales. El acero es un material que se puede trabajar de muchas formas, en procesos tales como laminado, forja, doblado, cizallado, soldadura, entre otros; todo esto permite tenerlo en diferentes presentaciones y formas. Algunas propiedades generales del acero son:

- Ductilidad, se deforma elásticamente.
- Tenacidad, absorbe energía sin romperse.
- Maleabilidad, se puede forjar.
- Conductividad, conduce el calor y la electricidad, en menor medida que el hierro.
- Total oxidación excepto aceros especiales.
- Posee propiedades magnéticas. Algunos pueden convertirse en imanes permanentes
- Punto de fusión muy alto (1300ºC a 1530ºC).
- Gran peso específico (7,6 - 7,8 gr/cm3).

En las aleaciones Fe-C se pueden encontrar hasta once diferentes constituyentes, denominados: ferrita, cementita, perlita, austenita, martensita, troostita sorbita, bainita, ledeburita, steadita y grafito[10].

3.2.1.1 Ferrita

Aunque la ferrita es en realidad una solución sólida de carbono en hierro alfa, su solubilidad a la temperatura ambiente es tan pequeña que no llega a disolver ni un 0.008% de C. Es por esto que prácticamente se considera la ferrita como hierro

[10] Universidad Autónoma de Madrid. Aceros: Aleaciones Hierro-Carbono. Docencia y laboratorios [en línea] <www.uam.es/docencia/labvfmat/labvfmat/practicas/practica4/fases%20del%20acero.htm> [citado en 2017].

alfa puro. La ferrita es el más blando y dúctil constituyente de los aceros. Cristaliza en una estructura BCC. Tiene una dureza de 95 Vickers, y una resistencia a la rotura de 28 Kg/mm^2, llegando a un alargamiento del 35 al 40%.

3.2.1.2 Cementita

Es carburo de hierro y por tanto su composición es de 6.67% de C y 93.33% de Fe en peso. Es el constituyente más duro y frágil de los aceros, alcanzando una dureza de 960 Vickers. Cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño. Es magnética hasta los 210ºC, temperatura a partir de la cual pierde sus propiedades magnéticas.

3.2.1.3 Perlita

Es un constituyente compuesto por el 86.5% de ferrita y el 13.5% de cementita, es decir, hay 6.4 partes de ferrita y 1 de cementita. La perlita tiene una dureza de aproximadamente 200 Vickers, con una resistencia a la rotura de 80 Kg/mm2 y un alargamiento del 15%. Cada grano de perlita está formado por láminas o placas alternadas de cementita y ferrita.

3.2.1.4 Austenita

Este es el constituyente más denso de los aceros, y está formado por la solución sólida, por inserción, de carbono en hierro gamma. La proporción de C disuelto varía desde el 0 al 1.76%, correspondiendo este último porcentaje de máxima solubilidad a la temperatura de 1130 ºC.

3.2.1.5 Martensita

Bajo velocidades de enfriamiento bajas o moderadas, los átomos de C pueden difundirse hacia afuera de la estructura austenítica. De este modo, los átomos de Fe se mueven ligeramente para convertir su estructura en una tipo BCC. Esta transformación gamma-alfa tiene lugar mediante un proceso de nucleación y crecimiento dependiente del tiempo (si aumentamos la velocidad de enfriamiento no habrá tiempo suficiente para que el carbono se difunda en la solución y, aunque tiene lugar algún movimiento local de los átomos de Fe, la estructura resultante no podrá llegar a ser BCC, ya que el carbono está “atrapado” en la solución). La estructura resultante denominada martensita.

Los aceros se pueden clasificar en:

- Aceros al Carbono: Los cuales solo tienen carbono en sus componentes
- Aceros aleados: aceros con carbono y otros elementos aleación.

3.2.2 Acero AISI1020

Es un acero al carbono que con algunos elementos aleados hacen de este un acero de propiedades de media resistencia mecánica y gran tenacidad, su

composición básicamente está establecida de la siguiente forma; 0.18 - 0.23% C, 0.3 – 0.6% Mn, 0.04% P, 0.05 %S y 0.15 – 0.3% Si. Su utilización básicamente se da en maquinaria que no se someta a grandes esfuerzos, tales como cadenas, piñones, tornillería, etc. Algunas de sus propiedades son:

Densidad: 7.87 g/cm^3 (0.284 lb/in^3)

Tratamiento térmico Valores en °C		
Forjado	820 - 1100	
Normalizado	870 - 890	
Revenido	150 - 180	
Recocido	650 - 700	
Templado	Agua	820 - 850
Cementación	900 - 950	

Propiedades mecánicas Laminado en caliente	
Resistencia a la tracción	40 - 45 kgf/mm^2
Límite de fluencia	27 kgf/mm^2
Elongación	20%
Reducción de área	50%
Maquinabilidad	72%
Dureza (HB)	110 - 140

Tabla 5. Propiedades mecánicas: AISI 1020[11]

3.*2.3 Diagrama esfuerzo-deformación*

Se dice que uno de los primeros en realizar un estudio de esfuerzos y cargas a un material fue Leonado Da Vinci, suspendiendo piedras a través de alambres y mirar su deformación; los ensayos mecánicos nos permiten desarrollar y obtener datos muy precisos en cuanto se refiere a someter un material a ciertas cargas y lo que sucede con este. Robert Hooke en su libro De "*potentia restitutiva"* (1679), relaciono una ley que relaciona las fuerzas con las deformaciones, por medio de experimentos de resortes con platos a los cuales se le agregaban cada vez más pesos, Hooke encontró una relación proporcional directa entre el peso aplicado y la deformación del resorte.

Esta ley nos plantea que la deformación sufrida por un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza a la que este es sometido, siempre y cuando no se supere su límite de elasticidad, la ley de Hooke fue planteada así:

$$F = K * \delta X$$

Ecuación 7. Ley de Hooke

Donde *F* es la fuerza aplicada al *resorte, K* es la constante de proporcionalidad del resorte y δX es la variación de la longitud del material a partir del estiramiento.

Para obtener y analizar las propiedades de un material, y tener presentes el área y longitud de la probeta se deben tener en cuenta las cantidades unitarias de

[11] CIA General de Aceros.AISI/SAE 1020 y AISI/SAE1045 Aceros Ingeniería al carbono. Bogotá. Marzo 2017

esfuerzo y deformación; para realizar un ensayo podemos interpretar lo resultados a través de una gráfica Esfuerzo contra deformación.

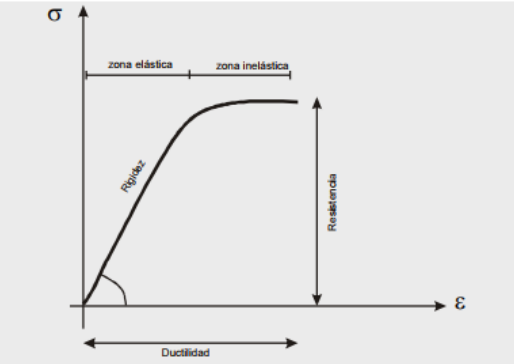


Ilustración 12. Diagrama esfuerzo-deformación: zona elástica, zona plástica

A Partir de la Ley de Hooke, se puede determinar la deformación total.

$$(1)\quad \sigma = E\varepsilon$$

$$(2)\quad \frac{P}{A} = E\frac{\delta}{L}$$

$$(3)\quad \delta = \frac{PL}{AE}$$

Ecuación 8. Deformación total

Para una carga aplicada *P;* una longitud inicial del elemento *L* el cual posee un área transversal *A;* fabricada en un material con un módulo de elasticidad determinado *E.*

3.2.3.1 Módulo de elasticidad

La parte inicial del diagrama esfuerzo-deformación para el acero y gran variedad de materiales en ingeniería es una línea recta como se puede ver en la ilustración 12. En el año 1807, Tomás Young, sugirió lo que equivale a usar la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria para medir la rigidez de un material[12], dicha relación se conoce como el *Módulo de Young* o *Módulo de Elasticidad;*

[12,] RILEY, STURGES, MORRIS. Mecánica de Materiales: Propiedades de los materiales y las relaciones de esfuerzo-deformación unitaria. Primera edición. Ciudad de México: EDITORIAL LIMUSA DE C.V. GRUPO NORIEGA EDITORES, 2001. p 143-147 (ISBN 968).

numéricamente hablando, el módulo de Young equivale a la pendiente de la recta inicial que compone al diagrama esfuerzo-deformación.

3.2.3.2 Límite elástico

La zona elástica del diagrama esfuerzo-deformación, se caracteriza por el hecho de que la deformación unitaria resultante de los esfuerzos aplicados desaparece si se retiran las cargas[13], el límite elástico es el esfuerzo máximo admisible para el cual el material puede recuperar su forma inicial, para esfuerzos mayores al límite elástico las deformaciones comienzan a ser permanentes.

3.2.3.4. Punto de fluencia

Es el esfuerzo para el cual se presenta un aumento considerable en la deformación unitaria sin que haya un incremento del esfuerzo. La medición de dicho punto se puede hacer directamente al mirar la máquina de ensayos y determinar la carga indicada[13] ya que el valor del esfuerzo deja de subir o incluso a descender en algunos aceros de bajo carbono.

3.2.3.5 Resistencia ultima

Es el esfuerzo máximo que se presenta en un material antes de la fractura, es un término que puede modificarse como la resistencia última a la tensión, compresión o cortante del material[13]

3.2.3.6 Relación de Poisson

Cuando un material es sometido a cargas en una dirección se presentan deformaciones unitarias paralelas y perpendiculares a la carga, Simon D. Poisson identificó una constante que relaciona la deformación longitudinal con la deformación transversal la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$\nu = -\frac{\epsilon_{transversal}}{\epsilon_{longitudinal}}$$

Ecuación 9. Relación de Poisson[13]

El signo negativo indica que la relación siempre será positiva, debido a que una de las deformaciones unitarias siempre será negativa. La relación de Poisson es una propiedad de los materiales y una constante en la mecánica de materiales.

[13]RILEY, STURGES, MORRIS. Mecánica de Materiales: Propiedades de los materiales y las relaciones de esfuerzo-deformación unitaria. Primera edición. Ciudad de México: EDITORIAL LIMUSA DE C.V. GRUPO NORIEGA EDITORES, 2001. p 143-147 (ISBN 968).

3.2.4 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son técnicas que pueden cambiar las propiedades mecánicas del material con el propósito de cumplir determinada función[14]. Los tratamientos térmicos son una serie de procesos de calentamiento y enfriamiento del material los cuales están determinados por unas temperaturas establecidas en función del material o de las propiedades que se desean adquirir. Estos procesos generan alteraciones, ajustes o cambios en la microestructura del material o en su composición química, éstos son conocidos como tratamientos termoquímicos.

3.2.4.1 Temple

Cuando un material se calienta a una temperatura obtenida a partir de su contenido de carbono y se enfría súbitamente en un medio refrigerante como agua, aceite o sales de enfriamiento se conoce como temple[14], dicho proceso puede elevar la dureza y la resistencia del material.

Uno de los aspectos más importantes del temple es la velocidad de enfriamiento, debido a que la corteza del material tiende a disminuir su temperatura a una tasa mayor que el núcleo, se obtiene una variedad de propiedades y microestructuras diferentes a lo largo del material, es por esto que el temple se considera un tratamiento flexible, que permite obtener gran variedad de características que satisfacen mejor las tareas asignadas.

3.2.5 Ensayo de tensión

Los ensayos de tensión se realizan a partir de la norma ASTM E8. Los ensayos de tensión suministran información acerca de la resistencia y ductilidad de materiales sometidos a esfuerzos de tensión uniaxiales. Esta información puede ser usada en comparación de materiales, desarrollo de aleaciones, control de calidad y diseño bajo ciertas circunstancias.

Estos métodos de ensayos cubren las pruebas de tensión en materiales metálicos en cualquier forma a temperatura controlada (10-38) °C, específicamente los métodos de determinación del límite de fluencia, elongación del punto de fluencia, resistencia a la tracción, elongación y reducción del área[15].

[14] ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA. Tratamientos Térmicos Protocolo. Edición 2008-2. Laboratorios. [en línea] <http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/1537_tratamientostermicosr2.pdf>

[15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, 2016. il. ASTM E8/E8M-16a

3.2.6 Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos es un método de aproximación de problemas continuos de tal forma que[16] la continuidad del problema se divide en elementos, cuyo comportamiento está asociado a las características propias de sus puntos límites llamados nodos, los cuales son a su vez puntos de unión entre dos elementos contiguos; el problema se soluciona mediante las reglas de los problemas discretos, el comportamiento de cada elemento está definido por funciones de forma, las cuales describen la conducta de los nodos.

En conclusión, el método de los elementos finitos consiste en la transformación de un cuerpo continuo en un modelo discreto, la interpolación de las soluciones de las funciones de forma en los nodos determina lo que sucede al interior de cada elemento y la solución del problema es una aproximación las funciones de forma resueltas en un número determinado de nodos y elementos.

3.2.7 Micromodelos

El objetivo de los micromodelos es representar a partir del modelado computacional el comportamiento de materiales compuestos a través del entendimiento de las propiedades de cada material constitutivo y de la interacción entre ellos[17].

3.2.8 Macromodelos

Mientras que los micromodelos estudian las características de cada componente y su interacción constitutiva, los macromodelos se estudian los materiales compuestos desde una aproximación fenomenológica[17], es decir, en los macromodelos no se separan los materiales constitutivos del elemento analizado y las relaciones constitutivas son expresadas en función de características promedio del material compuesto.

[16] VALERO FRÍAS, Eduardo. APORTACIONES AL ESTUDIO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE FLUJO AXIAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS: El método de los elementos finitos

[17] VALLEDOR BARRIENTOS Roberto. ANÁLISIS SÍSMICO LINEAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL DAÑO SÍSMICO ACUMULADO DE UNA ESTRUCTURA PATRIMONIAL DE ALBAÑILERÍA SIMPLE. EL CASO DEL PALACIO PEREIRA: Técnicas de modelación numérica en la albañilería. Santiago de Chile, 2016, p 38-40. Tesis de grado para optar al título de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería.

4. METODOLOGÍA

4.1 Preparación de probetas

4.1.1 Adquisición del material AISI1020.

4.1.2 Obtener composición química.

4.1.3 Mecanizado de las probetas según la norma ASTM E8.

4.1.4 Calcular las temperaturas intercríticas en función de la composición química del material.

4.1.5 Realizar el tratamiento térmico: Temple

4.2 Ensayos mecánicos y metalografía

4.2.1 Ensayo de tensión según la norma ASTM E8.

4.2.2 Micrografías a partir de estudio microestructural del material

4.3 Obtención del macromodelo mecánico multilineal

4.3.1 Proposición y selección del modelo matemático.

4.3.2 Macromodelamiento y simulación del ensayo en software de elementos finitos: ANSYS Workbench 14.5

4.4 Análisis y discusión

4.4.1 Análisis de los resultados, comparación entre el modelo experimental y el macromodelo.

4.4.2 Conclusiones y finalización del proyecto.

5. DESARROLLO

5.1 Preparación de probetas

5.1.1 Adquisición del material

El material utilizado es acero de bajo carbono AISI 1020 laminado en caliente, presentación en barra cilíndrica con diámetro ¾" (19.05 mm) con longitud de un metro (1 m).

5.1.2 Composición química

El material de trabajo, será sometido a un proceso de templado, por lo que es necesario determinar el rango comprendido por las temperaturas intercríticas (ITH) propio del material, dentro del que se produce el tratamiento térmico. El material fue llevado al laboratorio de materiales y procesos de la Universidad Nacional de Colombia, donde se realizó análisis químico de aceros OES, los resultados obtenidos fueron:

Elemento	Fracción porcentual en masa [%]			
	Quema 1	Quema 2	Quema 3	Promedio
Hierro (Fe)	98.708	98.657	98.608	98.658
Manganeso (Mn)	0.348	0.360	0.371	0.360
Silicio (Si)	0.278	0.288	0.299	0.289
Carbono (C)	0.249	0.245	0.233	0.242
Cobre (Cu)	0.133	0.146	0.158	0.146
Cromo (Cr)	0.112	0.115	0.118	0.115
Níquel (Ni)	0.103	0.111	0.120	0.111
Molibdeno (Mo)	0.031	0.031	0.032	0.031
Aluminio (Al)	0.014	0.014	0.017	0.015
Cobalto (Co)	0.007	0.008	0.010	0.008
Estaño (Sn)	0.007	0.008	0.008	0.008
Wolframio (W)	0.005	0.005	0.009	0.005
Plomo (Pb)	0.004	0.005	0.007	0.005
Niobio (Nb)	0.003	0.004	0.007	0.005
Vanadio (V)	0.002	0.002	0.002	0.002
Titanio (Ti)	0.001	0.001	0.001	0.001
Azufre (S)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Fosforo (P)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Boro (B)	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Magnesio (Mg)	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 6. Composición química: AISI 1020

5.1.3 Cálculo de las temperaturas intercríticas (ITH)

Las temperaturas intercríticas están dadas a partir de la composición química del material de trabajo según las ecuaciones[18]:

$$A_{c1}[°C] = 723 - 7.8Mn + 37.7Si + 18.1Cr + 44.2Mo + 8.95Ni + 50.1V + 21.7Al + 3.18W + 297S - 830N - 11{,}5C * Si - 14Mn * Si - 3.1Si * Cr - 57.9C * Mo - 15.5Mn * Mo - 5.28C * Ni - 27.4C * V + 30.8Mo * V - 0.84Cr^2 - 3.46Mo^2 - 0.46Ni^2 - 28V^2$$

$$A_{c1}[°C] = 733.126$$

$$A_{c3}[°C] = 912 - 370C - 27.4Mn + 27.3Si - 6.35Cr - 32.7Ni + 95.2V + 190Ti + 72Al + 64.5Nb + 5.57W + 332S + 276P + 485N - 900B + 16.2C * Mn + 32.3C * Si + 15.4C * Cr + 48C * Ni + 4.32Si * Cr - 17.3Si * Mo + 18.6Si * Ni + 4.8Mn * Ni + 40.5Mo * V + 174C^2 + 2.46Mn^2 - 6.86Si^2 + 0.322Cr^2 + 9.9Mo^2 + 1.24Ni^2 - 60.2V^2$$

$$A_{c3}[°C] = 834.587$$

Tras determinar el rango de temperaturas necesario, se determina que el temple se realizará a 800°C.

5.1.4. Mecanizado de las probetas

El material se mecanizó según lo indica la norma para ensayos de tensión ASTM E8, con recomendaciones especiales debido a la máquina donde se realizan dichos ensayos. A continuación se muestra un plano de la probeta a realizar, junto con las consideraciones pertinentes.

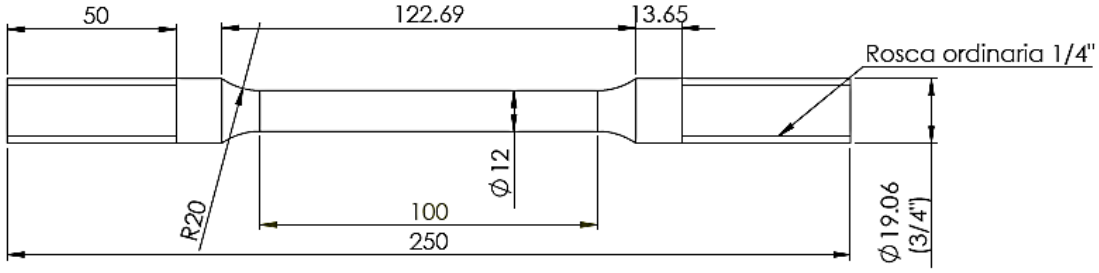


Ilustración 13. Plano de la probeta

[18] Critical points of hypoeutectoid steel - prediction of the pearlite dissolution finish temperature Ac1f. PAWLOWSKI, B. Journal in Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Faculty of Metals Engineering and Industrial Computer Science, AGH University of Science and Technology. POLONIA. Diciembre de 2011.

Por recomendación del laboratorio de ensayos mecánicos de la Universidad Distrital, es necesario fabricar utensilios que permitan un mejor agarre de las probetas templadas sin poner en riesgo la máquina universal de ensayos debido a la alta dureza superficial que alcanza la probeta después del tratamiento térmico.

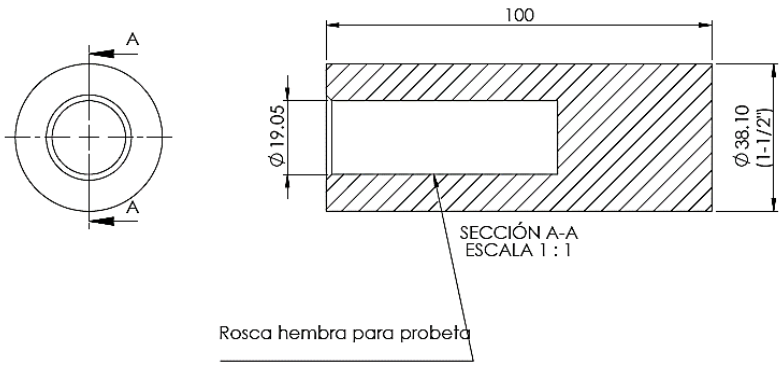


Ilustración 14. Utensilios de agarre roscados



Ilustración 15. Probetas roscadas y utensilios de agarre

5.1.5 Tratamiento térmico

La Universidad Distrital cuenta con muflas eléctricas para la realización de tratamientos térmicos, en este caso, se utiliza un Horno Mufla MF-2005 que se muestra en la siguiente imagen.



Ilustración 16. Horno Mufla MF-2005

El temple se realiza mediante el calentamiento de la probeta hasta una temperatura (800°C) inferior al punto de fusión del material base, posteriormente, se enfría en agua, generando un choque térmico, el diseño esquemático explica tal proceso.

5.2 Ensayo de tensión

Tras realizar las probetas de acuerdo a la norma de ensayos de tensión ASTM E8, teniendo en cuenta las recomendaciones por parte del laboratorio, se realizan pruebas de tensión a probetas de material base, y material templado por medio de la máquina universal de ensayos Shimadzu UH-50A



Ilustración 17. Máquina universal de ensayos Shimadzu UH-50A

Una vez ejecutadas las pruebas de tensión, se recopilan los datos para generar las curvas de esfuerzo-deformación para cada probeta, el esfuerzo cuyo comportamiento se ve en el eje vertical de la gráfica se obtiene a partir de la ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Ecuación 10. Esfuerzo normal

Dicha ecuación está en función del área transversal inicial de la probeta, con lo cual se obtiene la curva esfuerzo deformación de ingeniería.

La deformación, variable ubicada en el eje horizontal de la gráfica se obtiene usando la ecuación:

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

Ecuación 11. Deformación unitaria

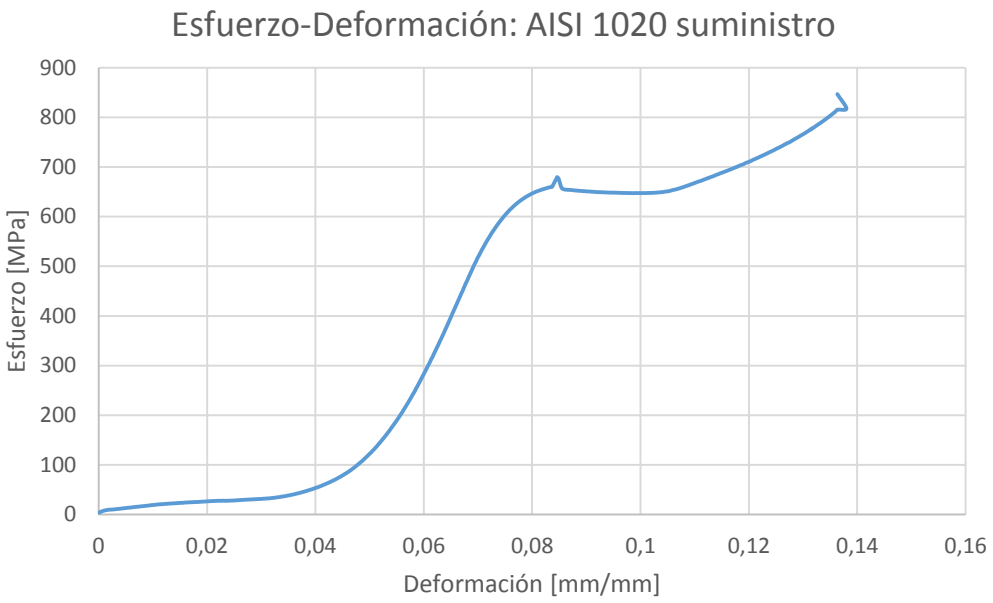


Ilustración 18. Curva de esfuerzo-deformación: AISI 1020 en estado de suministro.

La ilustración anterior muestra la curva de esfuerzo-deformación real obtenida a partir del ensayo de tensión realizado a una probeta de AISI 1020 en estado de suministro, a partir de este ensayo podemos determinar las características mecánicas del material:

Propiedad	Valor
Módulo de elasticidad [E]	226,749 [GPa]
Límite de fluencia [Sy]	631,734 [MPa]
Esfuerzo último a la tensión [Sut]	672,748 [MPa]

Tabla 7. Propiedades mecánicas: Acero AISI 1020 en estado de suministro

A continuación la curva de esfuerzo-deformación para probetas de AISI 1020 templadas a temperatura de 800°C

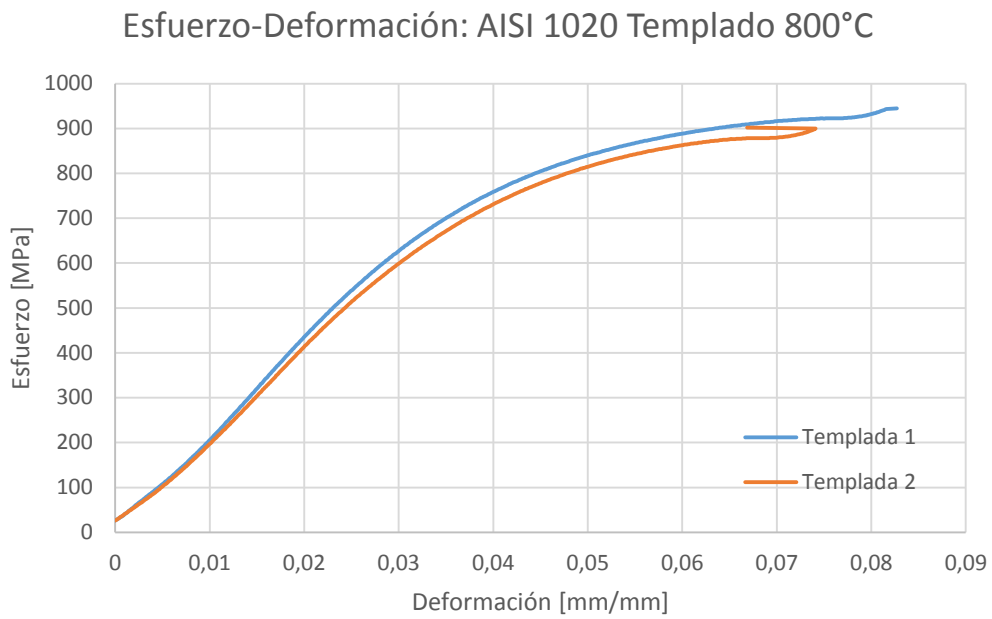


Ilustración 19 Esfuerzo-deformación: AISI 1020 templado a 800°C.

A continuación, se realiza una comparación entre las curvas de esfuerzo deformación para los dos ensayos realizados –material en estado de suministro y material templado a 800°C- lo que nos permite establecer diferencias entre el comportamiento del material según su estado, esto con el fin de ocupar un modelo matemático que se pueda ajustar a diferentes tendencias, y determinar cuál de los dos presenta un mayor ajusta entre el macromodelamiento y las pruebas experimentales.

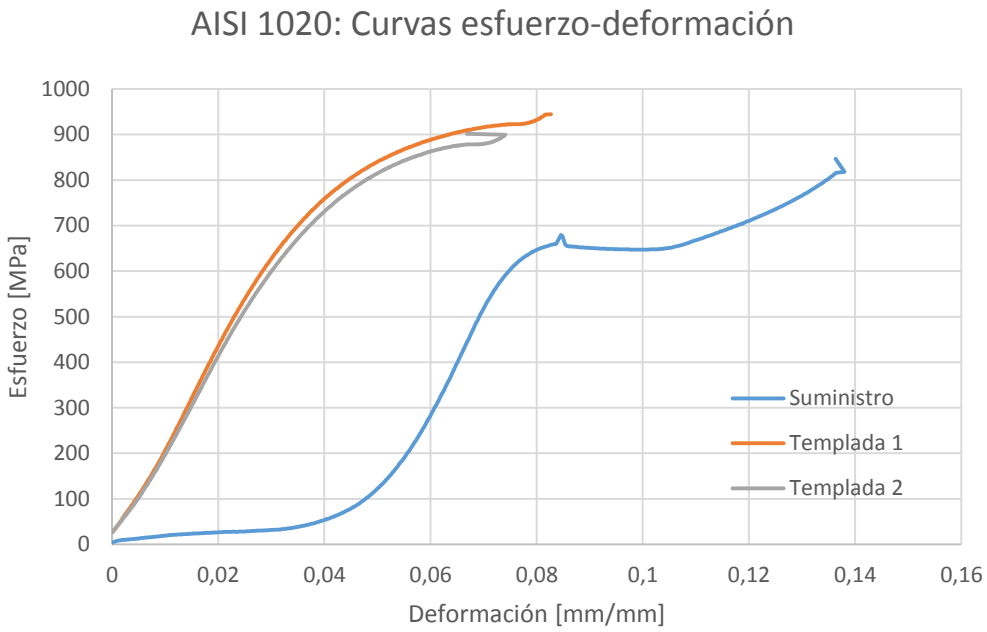


Ilustración 20. Esfuerzo-Deformación: AISI 1020 estado de suministro y templado 800°C

La ilustración 20 relaciona las curvas esfuerzo-deformación de las probetas analizadas, en estado de suministro y templadas. La gráfica evidencia diferencia entre la fragilidad de las probetas templadas y la probeta en estado de suministro, la deformación unitaria alcanzada por el AISI1020 en estado de suministro es casi el doble a las probetas templadas, también es remarcable el esfuerzo alcanzado por las probetas templadas, con un pico de 922,50 MPa, existe una superioridad mayor al 30% con respecto al esfuerzo máximo obtenido por el material en estado inicial (604,84 MPa).

5.3 Análisis metalográfico

Para comprobar y analizar la composición química del material, se realiza un análisis metalográfico; micrografía del material y composición volumétrica, las cuales permiten visualizar la estructura del material y el porcentaje volumétrico de cada uno de los componentes.

5.3.1 Preparación

Las probetas analizadas requieren una puesta a punto para iniciar ensayos metalográficos que consiste en *lapear* una de las caras transversales a través de un proceso de lijado y un proceso de pulido con un paño y alúmina, posterior a eso

se procede a atacar químicamente el material con Nital al 5%. Todo esto permite una correcta visualización de la microestructura del acero.

5.3.2 Metalografía

Para obtener imágenes de la estructura del material se utilizó el microscopio Axio Observer D1m del laboratorio de metalografía de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de caldas. Las imágenes extraídas corresponden a las dos probetas metalográficas, de las cuales una está en estado de suministro la otra probeta está templada (800°C). El microscopio permite obtener fotografías con aumentos de 100x, 500x y 1000x.

(a)  (b) 

Ilustración 21. (a) Microscopio Axio Observer D1m. (b) Probetas utilizadas en la prueba metalográfica.

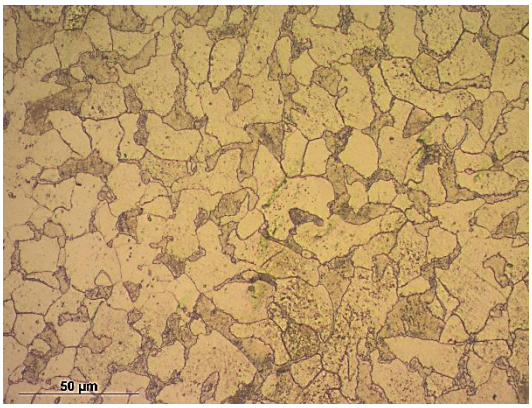
5.3.3 Fracción volumétrica

Cada micrografía se compone de dos fases una clara (amarilla) y otra oscura (negro/café), una herramienta de software del microscopio nos permite determinar el porcentaje en volumen de cada una de estas fases.

(a) 

(b) 

Ilustración 22. Micrografías 100x. : (a) Suministro. (b) Temple (800°C)

(c) 

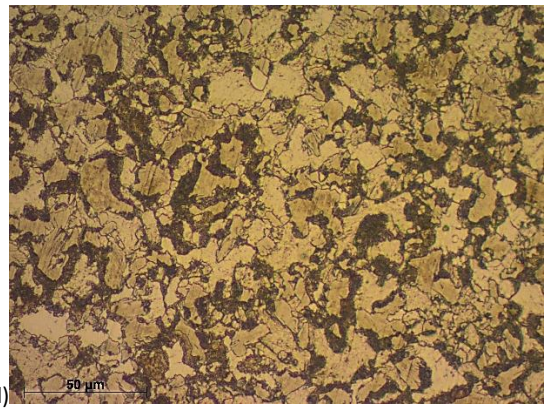
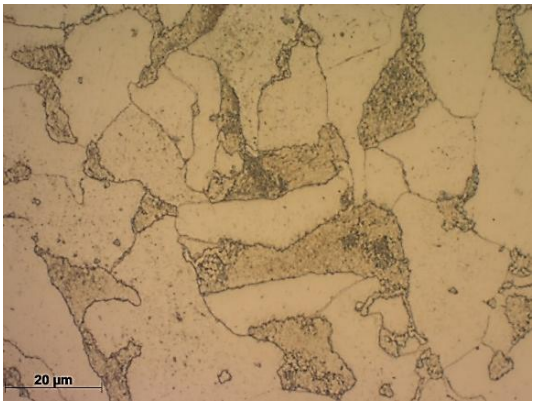
(d) 

Ilustración 23. Micrografías 500x: (c) Suministro. (d) Temple (800°C)

(e) 

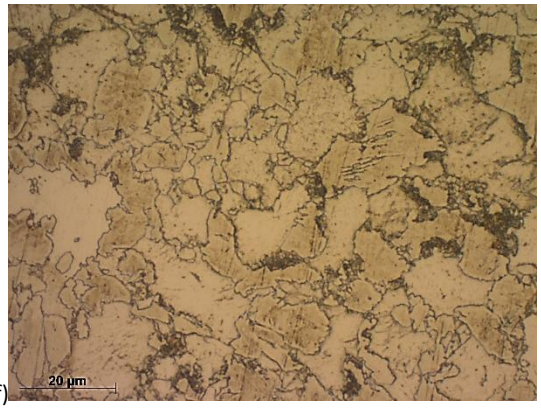
(f) 

Ilustración 24. Micrografías 1000x. (e) Suministro. (f) Temple (800°C)

Las ilustraciones 22, 23 y 24 muestran la composición microestructural de los materiales de estudio, las micrografías de AISI 1020 en estado de suministro nos muestra una fase clara que corresponde a granos de ferrita (*hierro α)* y una fase oscura que corresponde a granos de perlita.

En cuanto a las micrografías del AISI 1020 templado a 800°C se notan dos zonas, una clara que corresponde a una matriz de ferrita sobre la cual se ubica la zona oscura correspondiente a Martensita generada a partir del enfriamiento rápido del material que impide la difusión del carbono en el temple.

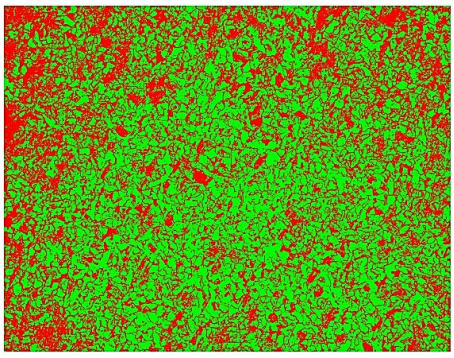
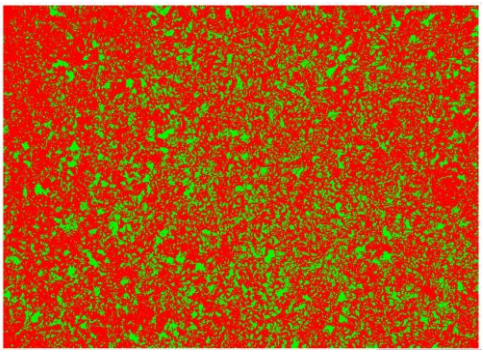
(g)  (h) 

Ilustración 25. Fracción volumétrica de las fases: (g) Suministro 100x. (h) Temple (800°C) 100x.

En la ilustración 30 utilizamos las micrografías a 100 aumentos para determinar los porcentajes de los componentes presentes en la microestructura, a partir de la separación de las fases según su color se pueden determinar sus proporciones en función del área capturada por el microscopio.

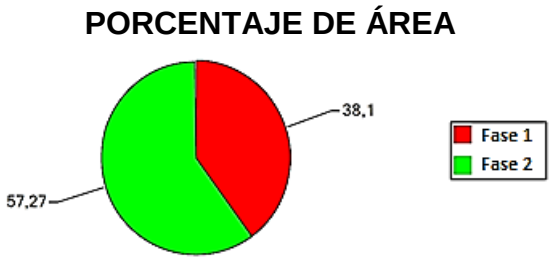


Ilustración 26. Fracción volumétrica de las fases: Estado de suministro

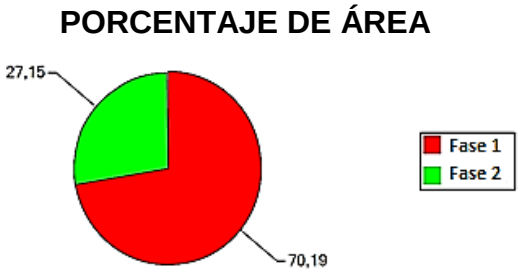


Ilustración 27. Fracción volumétrica de las fases: Temple (800 °C)

Por medio de un diagrama de equilibrio hierro-carbono podemos determinar las fases presentes en las micrografías en función del contenido de carbono en la aleación y la temperatura del tratamiento térmico, de esta forma se establece:

- *AISI 1020 en estado de suministro: Está compuesto por una matriz de Ferrita (α) + perlita en la siguiente proporción:*

  Ferrita (*α*): 57,27%
  Perlita: 38,10%

- *AISI 1020 templado (800°C): Está compuesto por una matriz de Ferrita (α) + Martensita en la siguiente proporción:*

  Ferrita (α): 27,15%
  Martensita: 70,19%

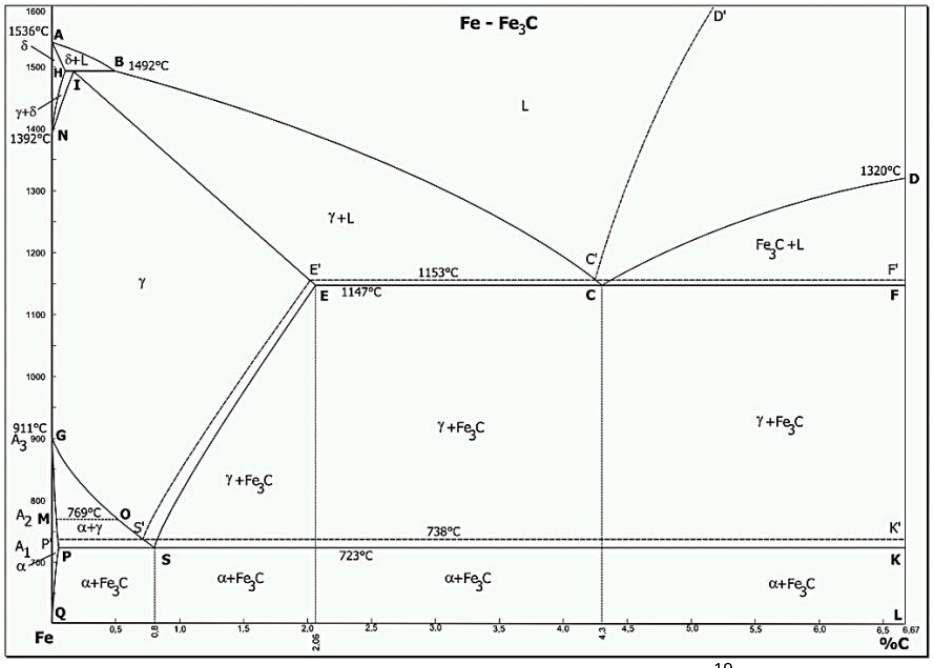


Ilustración 28.Diagrama de equilibrio Hierro-Carbono[19].

[19] WIKIPEDIA. Diagrama hierro-carbono. [En línea]. < https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_hierro-carbono> Consultado en [Mayo de 2018]

5.4 Selección del modelo constitutivo.

Es necesario un modelo de fallo constitutivo, que permita describir el comportamiento de las probetas a lo largo del ensayo de tensión con el menor margen de error posible, es por esto que se someten algunos modelos de fallo constitutivo a un proceso de selección mediante criterios ya sea conceptuales, o matemáticos para determinar el modelo que mejor se ajuste a los ensayos realizados.

A medida que se va desarrollando esta sección se muestran los diferentes modelos utilizados en la evaluación del proyecto, iniciando con los modelos menos convenientes y finalizando con los que mostraron mejores resultados para el análisis de este material.

5.4.3 Modelo Plástico Cinemático

Este modelo[20] permiten desarrolla y simular el comportamiento de un material en un gráfico de esfuerzo deformación, esta curva varía de acuerdo al límite elástico con la velocidad de deformación.

Básicamente lo que nos brinda este modelo definir el endurecimiento como isotrópico o como cinemático, en los cuales para el primero el valor del endurecimiento es (1) y en el segundo el endurecimiento corresponde a (0).Lo anterior se explica que en el proceso isotrópico, la superficie de la curva definida por las tensiones crece en su radio pero conserva el centro. Y para el proceso cinemático es lo contrario, se mueve el centro y se mantiene el radio.

$$\emptyset = \frac{1}{2}\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij} - \frac{\sigma^2 y}{3} = 0$$

Ecuación 12. Ecuación para hallar la condición de plastificación.

Donde:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ij} - \alpha_{ij}$$

$$\sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{eff}$$

[20]COLORADO R, Javier. Análisis de las características de los modelos de material recomendados para la simulación de procesos de embutición de chapa de acero. 2008. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID.

Lo anterior es bastante interesante ya que permite evidenciar el comportamiento de una curva en un acero de Esfuerzo vs Deformación, pero lamentablemente este modelo no se puede sustentar ni implementar ya que es un proceso bilineal, lo cual no aporta a esta investigación, adicionalmente no se tienen algunos de los parámetros necesarios para su implementación.

5.4.4 Modelo de plasticidad dependiente de la velocidad de deformación

Este modelo básicamente permite plasmar una curva de deformaciones producidas por cargas, en función de la velocidad de deformación efectiva[23].

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}\varepsilon'_{ij}\varepsilon''_{ij}}$$

Ecuación 12. Deformación en función de las velocidades en los diferentes componentes

Este modelo evalúa e implementa un criterio de ruptura debido a que su función fija un límite de ruptura que depende de la velocidad de deformación, permitiendo comparar satisfactoriamente los materiales, ya que luego de establecer y analizar el modelo, tras llegar a cierto límite de velocidad de deformación el material probablemente falle.

La formulación de este modelo es básicamente sencilla, obteniendo valores conocidos para nosotros como lo son modulo elástico, módulo de Young, deformación plástica efectiva; pero lamentablemente su formulación se encuentra en función de la velocidad de deformación, y para los ensayos de tensión realizados en la investigación, es complicado evaluar estos componentes de velocidad en los diferentes ejes, puesto que son valores que no se determinaron a lo largo de las practicas experimentales. Por lo tanto este modelo queda descartado para la investigación.

5.4.5 Modelo de Ottosen

Uno de los primeros modelos identificados para realizar el análisis e implementación al trabajo de investigación fue el modelo de Ottosen, este es un modelo construido en general para determinar y evaluar el comportamiento de los diferentes materiales en su comportamiento plástico cuando son sometidos a diferentes tipos de cargas.

Tomado de un proyecto de investigación de la universidad Nacional de Colombia[21] en el cual el autor se enfoca en demostrar el comportamiento plástico a tensión y compresión de un material como lo es el concreto, y demostrar este dicho comportamiento mediante modelos de fallo. Este modelo establece que la superficie de fluencia en el espacio de los esfuerzos principales tiene la siguiente forma.

$$f\left(I_1^{\prime}, I_1^{\prime}, \theta\right) = aJ_2{}^{\prime} + \lambda\sqrt{J_2}{}^{\prime} + bI_1{}^{\prime} - 1 = 0$$

Ecuación 13. Superficie de fluencia en el espacio (Modelo de Ottosen)

Donde:

$$I_1{}^{\prime} = \frac{I_1}{\sigma_{yc}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_{yc}}$$

$$J_2{}^{\prime} = \frac{J_{21}}{\sigma_{yc}} = \frac{1}{6\sigma_{yc}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]$$

$$\lambda = \begin{cases} k_1 \cos\left[\frac{1}{3}\cos -1(k_2 \cos(3\theta))\right] para\ \cos(3\theta) \geq 0 \\ k_1 \cos\left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3}\cos -1(-k_2 \cos(3\theta))\right] para\ \cos(3\theta) \leq 0 \end{cases}$$

Ecuación 14. Componentes de la ecuación de superficie de fluencia del modelo de Ottosen.

Aplicando para el material en estado de suministro obtenemos:

Factores							
I1´	J2´	λ	Σyc [MPa]	σ1 [MPa]	σ2 [MPa]	σ3 [MPa]	k1
2.256768	6.287312	576.798677	669.63	436.20	509.40	565.60	669.63

Tabla 8. Validación formulación modelo de Ottossen.

Estos valores se obtienen a partir de los resultados del ensayo de tensión para las probetas de acero AISI 1020 en estado de suministro y con temple a 800°C. Lo que se desarrolla es la implementación de las ecuaciones del modelo de Ottosen, utilizando los valores obtenidos en la curva esfuerzo-deformación de los aceros de estudio.

[21] "Modelación numérica del concreto simple con elementos finitos usando un modelo constitutivo de Plasticidad" del autor Luis Enrique Rodríguez. U. Nacional de Colombia.2011.

Según el autor este modelo representa muy bien el comportamiento de esfuerzos aplicados a materiales como el concreto, como lo muestra en la gráfica.

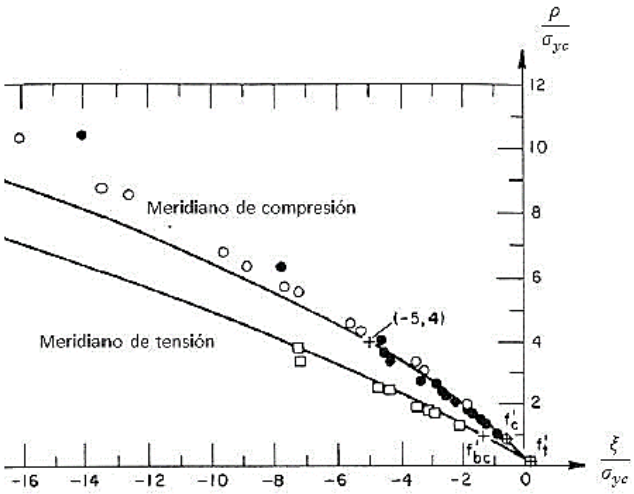


Ilustración 29. Comportamiento según modelo de Ottossen.

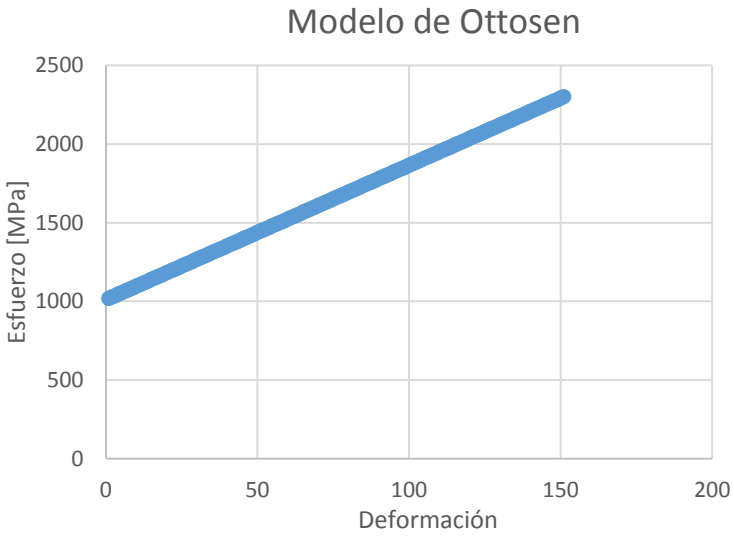


Ilustración 30. Esfuerzo-Deformación. Modelo de Ottossen aplicado a las curvas reales de tensión en la investigación.

Lo cual es muy diferente a los que se necesita implementar en este trabajo, por lo tanto no es óptimo para continuar evaluando el comportamiento del Acero AISI 1020 sobre este modelo, posiblemente se puede dar por el tipo de esfuerzos a los que son sometidos ya que el autor[22] plantea una serie de ensayos a tensión y

[22] "Modelación numérica del concreto simple con elementos finitos usando un modelo constitutivo de Plasticidad" del autor Luis Enrique Rodríguez. U. Nacional de Colombia.2011.

compresión, recordando que en los ensayos utilizados para el acero AISI 1020 solo se contempló ensayo de tensión, y la diferencia de materiales pues en el ejemplo tomado se hace el estudio a un material como lo es el concreto.

5.4.6 Modelo de Chaboche

El modelo de Chaboche se basa en teorías clásicas elasto-plásticas que describen la relación constitutiva de material bajo carga cíclica definiendo la superficie de producción, regla de flujo, regla de endurecimiento y estado crítico. Este modelo se obtuvo de la investigación realizada por un grupo de investigadores chinos[23] que buscaban demostrar las propiedades mecánicas de aceros de bajo rendimiento, utilizando modelos constitutivos de fallo.

Este modelo plantea que la mayoría de materiales se endurecen cuando se deforman plásticamente, lo cual determina que para continuar deformándolos luego de alcanzar el límite de fluencia el esfuerzo se incrementa en función de la deformación plástica acumulada que se describe de la siguiente forma.

$$p = \int dp = \int \dot{p}\, dt$$

Ecuación 15. Deformación plástica acumulada según el Modelo de Chaboche

Donde $\dot{p}$ es la tasa de deformación plástica efectiva y dp el incremento de la deformación, el cual se define así.

$$dp = \left(\frac{2}{3} d\varepsilon^p\right)^{1/2}$$

Ecuación 16. Incremento de la deformación

Este modelo calcula la función de endurecimiento isotrópico lineal, lo cual determina que la superficie de fluencia para un material con endurecimiento isotrópico puede definirse así.

$$f(\sigma, p)\sigma_e - \sigma_y(p) = 0$$

Ecuación 17. Función de fluencia

[23] "Mechanical properties and constitutive models of low yield point steels"Gang Shi a, Yang Gao , Xun Wang , Yong Zhang. Universidad de Beijing.China .2017.

Donde σ_e se define como el esfuerzo equivalente de Von Mises y σ_y(p) es la función de esfuerzo de fluencia.

Se inicia con la determinación de lo planteado por este modelo.

Incremento en la deformación plástica: *dp*	Deformación plástica: ε^p
121.8000978	22252.89575

Tabla 9. Formulación para el modelo de Chaboche

Pero se determina que no se es óptimo continuar, ya que este modelo estudia solo una parte del diagrama la cual es la deformación luego de alcanzar el límite de fluencia.

5.4.7 Modelo de Johnson-Cook

Es un modelo constitutivo muy utilizado en la teoría de la plasticidad, desarrollado en la década de los 80's por Gordon R. Johnson y William H. Cook, éste se compone de tres factores, cada uno comprende un comportamiento diferente del material, el primero relacionado al comportamiento elasto-plástico del material, el segundo un comportamiento visco-plástico y por último un comportamiento en función de la temperatura, debido a esto se define como un modelo constitutivo termo-visco-plástico.

$$\sigma = [A + B\epsilon^n] * \left[1 + C * In\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right] * \left[1 - \left(\frac{T - T_a}{T_m - T_a}\right)^m\right]$$

Ecuación 18. Modelo de Johnson-Cook[24]

A es el límite de fluencia del material y *B, C, n, m* son constantes del material, ϵ_0 es tasa de deformación en función del tiempo, ϵ es la deformación referenciada, *T* es la temperatura referenciada, *Ta* es la temperatura ambiente y *Tm* es la temperatura de fusión del material. Los datos de aplicación se obtienen a partir de un trabajo de investigación desarrollado por Johnson y Cook en múltiples materiales, entre ellos un acero de bajo carbono, inicialmente se aplica en el material de suministro:

[24] A CONSTITUTIVE MODEL AND DATA FOR METALS SUBJECTED TO LARGE STRAINS, HIGH STRAINS RATEAND HIGH TEMPERATURES. JOHNSON, G. COOK, W. U.S. Air Force and Honeywell Independent Development Program. 1983-1985.

Factor	Valor
A	632 MPa
B	275 MPa
C	0,022
n	0,36
m	1.00
ϵ_0	-9,8218E-04 s^{-1}
Ta	20 °C
Tm	1500 °C

Tabla 10. Constantes de aplicación para el modelo de Johnson-Cook para AISI 1020 en estado de suministro

Debido a que en este trabajo el ensayo no se encuentra en función de la temperatura, el tercer factor se toma como *1*[25], así obtenemos:

Deformación	Esfuerzo [Mpa]
0,000211916	545,2741791
0,003260249	563,8301052
0,008411443	575,8800693
0,026081995	596,8423045
0,04339392	609,4424206
0,064667047	621,0633275
0,073225202	625,0383018
0,079126253	627,6086275
0,081783356	628,7259621
0,093764773	633,494835
0,104996332	637,6226234
0,109951911	639,3540644
0,111092999	639,7456441
0,127459451	645,098995
0,136327329	647,8171252

Tabla 11. Deformación-Esfuerzo según el modelo de Johnson-Cook para AISI 1020 en estado de suministro

Se llevan estos datos a una representación gráfica para analizar el comportamiento arrojado por el modelo.

[25] A CONSTITUTIVE MODEL AND DATA FOR METALS SUBJECTED TO LARGE STRAINS, HIGH STRAINS RATEAND HIGH TEMPERATURES. JOHNSON, G. COOK, W. U.S. Air Force and Honeywell Independent Development Program. 1983-1985.

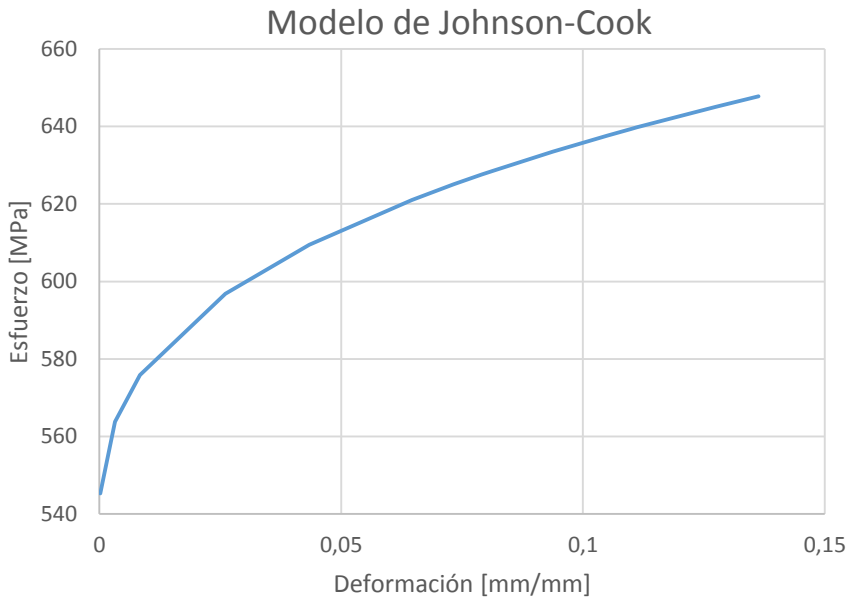


Ilustración 31. Esfuerzo-deformación: Modelo de Johnson-Cook para acero AISI 1020 en estado de suministro

A continuación una comparativa entre la curva de deformación esfuerzo obtenida según el modelo de Johnson-Cook y las pruebas experimentales realizadas al acero AISI 1020 en estado de suministro.

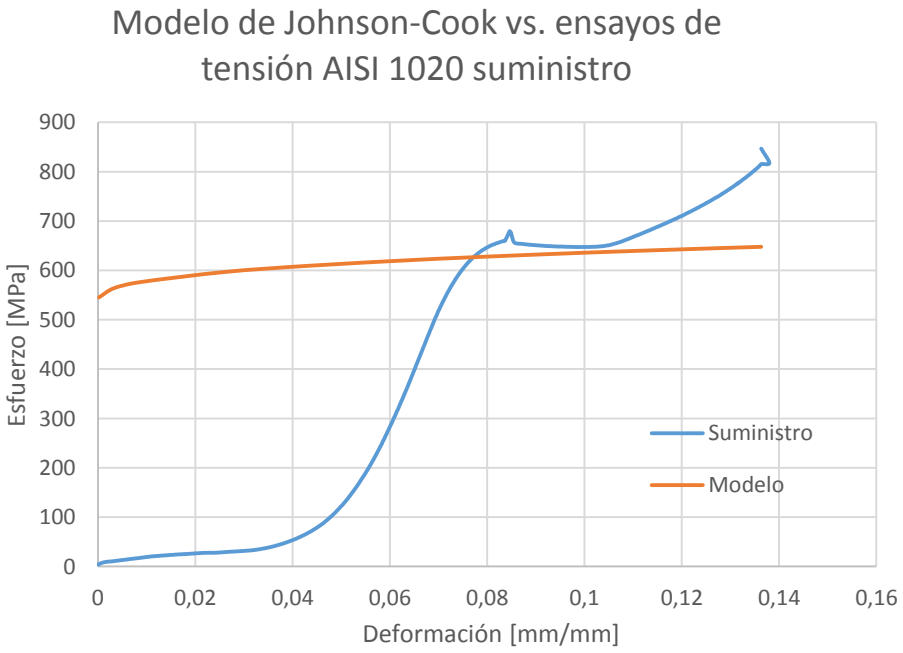


Ilustración 32. Esfuerzo-deformación: Modelo de Johnson-Cook v Ensayo de tensión AISI 1020 en estado de suministro.

En la ilustración 32 se compara la curva de deformación-esfuerzo obtenida a partir del modelo de Johnson-Cook respecto a la curva de deformación-esfuerzo experimental para acero AISI 1020 en estado de suministro, hay diferencias entre las tendencias de dichas gráficas como el hecho de que aquella generada según el modelo no define una zona de elasticidad para el material, adicionalmente vemos una diferencia significativa entre los valores del esfuerzo último a la tensión, otro factor importante a la hora de predecir el comportamiento de una curva de deformación esfuerzo. A continuación, se realiza el mismo procedimiento de aplicación del modelo para las probetas tratadas térmicamente:

Factor	Valor
A	729 MPa
B	275 MPa
C	0,022
n	0,36
m	1.00
ϵ_0	-9,8218E-04 s^{-1}
Ta	20 °C
Tm	1500 °C

Tabla 12. . Constantes promedio del modelo Johnson-Cook para material templado (800°C)

Para los cuales se obtienen los siguientes valores de esfuerzo y deformación, gráficamente se expresan en la ilustración 46:

Deformación	Esfuerzo [MPa]
0,00107588	611,38515
0,0026082	618,764771
0,00314614	620,652773
0,00445024	624,49857
0,00542832	626,928058
0,00736816	631,020576
0,00878637	633,591075
0,01009047	635,729421
0,01344853	640,523457
0,01617084	643,871347
0,02104491	649,058602
0,02430516	652,109538
0,0326677	658,891576
0,08271253	685,564712

Tabla 13. Deformación-esfuerzo según el modelo de Johnson-Cook para AISI 1020 templado (800°C)

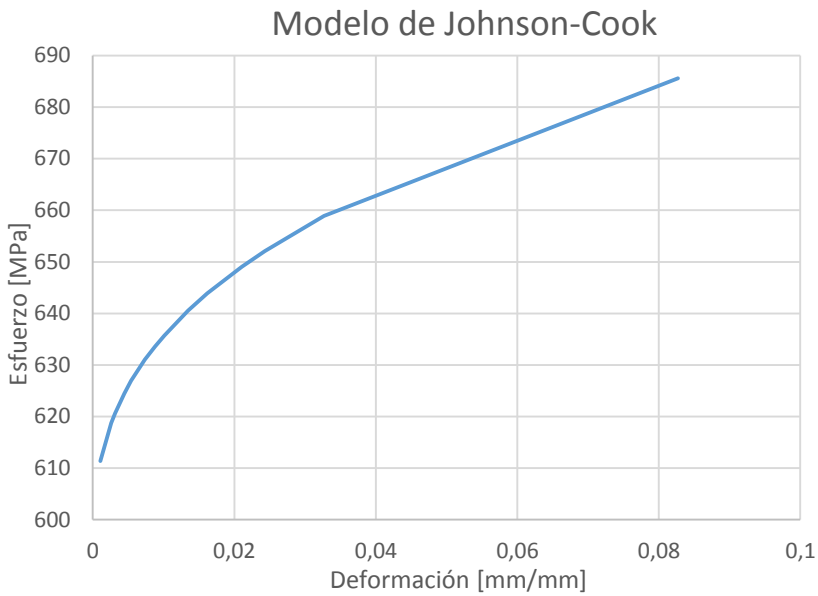


Ilustración 33. Esfuerzo-deformación: Modelo de Johnson-Cook para AISI 1020 templado (800°C)

Gráficamente el modelo de Johnson-Cook tiene un comportamiento similar a las curvas de deformación-esfuerzo para el material templado, pero al realizar la comparación entre estas se obtiene:

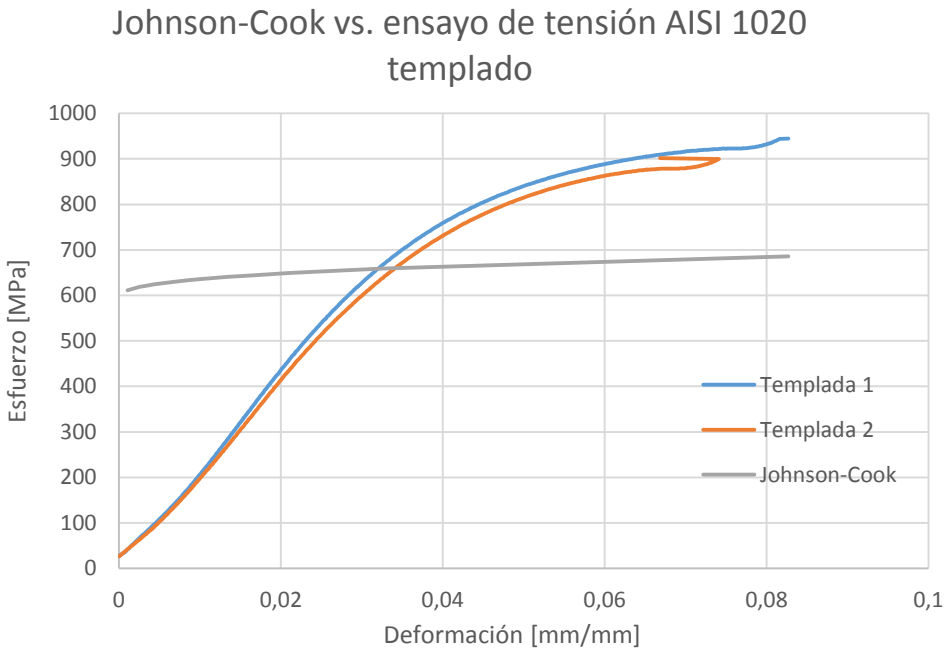


Ilustración 34. Esfuerzo-deformación: Modelo de Johnson-Cook v Ensayo de tensión AISI 1020 templado (800°C)

Aunque el modelo aquí aplicado asemeja el comportamiento de las pruebas realizadas por Johnson y Cook, se toma la determinación de que el modelo no se ajusta a las pruebas de tensión realizadas en este trabajo debido a que tras comparar las propiedades mecánicas según el modelo de Johnson-Cook con las experimentales se encuentra una diferencia en el esfuerzo último a la tensión mayor de 200 MPa, adicionalmente, no es perceptible la zona elástica dentro de la gráfica generada por el modelo, lo que determina que éste es puramente plástico, por lo que se abandona la aplicación del modelo de Johnson-Cook.

5.4.6 Modelo de Ramberg Osgood (1943)

El modelo de Ramberg-Osgood interpreta analíticamente ensayos experimentales de esfuerzo deformación. (1945). Aplicado en diversos ensayos e investigaciones en placas de acero, como Escobar y Sanchez en 1998[26] que tras someter a flexión placas de acero determinaron que su comportamiento no es elasto-plástico. La curva de esfuerzo deformación se puede establecer como:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} = \frac{\sigma}{E} + 0{,}5 * \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n$$

Ecuación19. Modelo de Ramberg-Osgood

Donde la relación entre la deformación y la deformación de fluencia, está en función del esfuerzo aplicado, el módulo de elasticidad, el límite de fluencia y un factor *n,* esta constante cambia según el comportamiento del material, para la zona elástica n=1 mientras que en la zona de deformación plástica n>1.

La siguiente figura, muestra el modelo de Ramberg-Osgood aplicado para diferentes valores de n:

[29,] MODELO HISTERÉTICO DE MATERIALES CON DETERIORO DE RIGIDEZ Y RESISTENCIA. AMATECO, Tomás. ESCOBAR, José. DYER, Juan. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Noviembre 2004

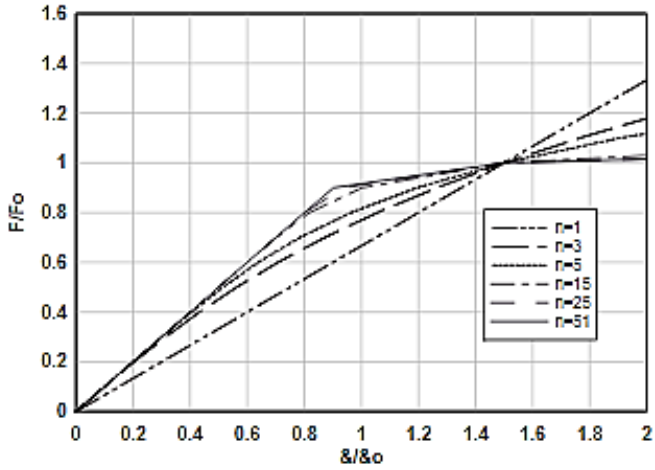


Ilustración 35. Modelo de Ramberg-Osgood para distintos valores de n[29]

La figura anterior nos permite observar un estimado del comportamiento de la gráfica y debido a esto, para la aplicación de este modelo utilizaremos una constante *n=5.* Teniendo en cuenta esto, las constantes del modelo son:

Módulo de Elasticidad [GPa]	Límite de fluencia [MPa]	Deformación de fluencia	n
226,749	631,734	0,07761124	1, 5

Tabla 14. Constantes del modelo de Ramberg-Osgood para AISI 1020 en estado de suministro

Los datos subrayados en amarillo, son aquellos que se encuentran en la zona elástica, para los cuales *n=1*. Al aplicar el modelo en diferentes puntos de deformación se obtiene:

Deformación	**Esfuerzo [MPa]**
0,000211916	3,430758
0,003260249	52,780946
0,008411443	136,174853
0,026081995	327,71161
0,04339392	422,247626
0,073225202	716,796587
0,07761124	725,207031
0,079126253	728,02363
0,081783356	732,8608

0,093764773	753,223939
0,104996332	770,498342
0,109951911	777,652115
0,111092999	779,262671
0,127459451	801,018775
0,136327329	811,885297

Tabla 15. Esfuerzo-deformación según Modelo de Ramberg-Osgood para AISI 1020 en estado de suministro

Los datos expresan el comportamiento según el modelo de Ramberg-Osgood. Se notan similitudes entre el modelo y el ensayo de tensión realizado, aunque el límite de fluencia posee un error considerable, el esfuerzo último a la tensión se encuentra más ajustado con respeto a la curva real.

Se procede a aplicar el modelo de Ramberg-Osgood a partir de los datos promedio de las probetas templadas. En este caso, los factores de la ecuación de comportamiento son:

Módulo de Elasticidad [GPa]	Límite de fluencia [MPa]	Deformación de fluencia	n
26,2374	728,5785	0,038522381	1, 5

Tabla 16. Constantes del modelo de Ramberg-Osgood para AISI 1020 templado (800°C)

Tras aplicar el modelo de Ramberg-Osgood, obtenemos los siguientes valores de esfuerzo para los puntos de deformación especificados.

Deformación	Modelo
0	0
0,001075882	39,637418
0,0026082	96,090756
0,003146141	115,909466
0,00445024	163,954808
0,005428315	199,988841
0,007368164	271,45635
0,008786372	323,705671

0,010090472	371,75105
0,01344853	495,467915
0,016170837	595,762581
0,02104491	736,441745
0,024305159	754,924165
0,032667699	794,11977
0,04658081	864,532611
0,0555954	896,327494
0,06386014	921,986797
0,07051104	940,746913

Tabla 17. Deformación-esfuerzo según el modelo de Ramberg-Osgood para AISI 1020 templado (800°C)

Los puntos subrayados en amarillo, hacen referencia a la zona elástica del material, aquella donde el valor de n es igual a *(1)* mientras que el resto de los puntos es para zona plástica con *n=5.* A partir de estos valores, se genera la curva esfuerzo-deformación según el modelo de Ramberg-Osgood.

5.5 Simulación del ensayo en software de elementos finitos: ANSYS

Uno de los objetivos del trabajo es poder representar a partir de un software de elementos finitos el problema de estudio. Mediante el software de diseño por método de elementos finitos ANSYS Workbench 14.5 se realiza la simulación del ensayo de tensión. Inicialmente, es necesario definir el comportamiento plástico que se va a definir para describir dicha característica del material.

Cuando un material es sometido a cargas cíclicas bien sea a tensión o compresión, según la teoría de la plasticidad, este material sufre cambios microestructurales que modifican sus propiedades físicas. Por lo general los aceros pueden sufrir un tipo de endurecimiento o ablandamiento cuando son sometidos a estas cargas cíclicas, este cambio se reduce a medida que aumenta el número de ciclos hasta alcanzar un límite de saturación, por eso es necesario definir el comportamiento del endurecimiento del material en su zona plástica; este endurecimiento puede ser endurecimiento isotrópico o endurecimiento cinemático.

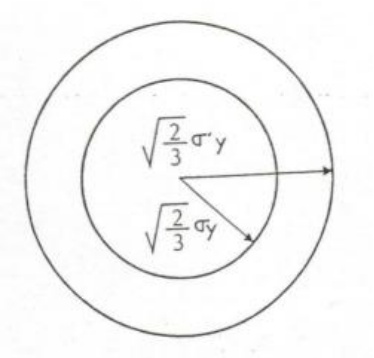


Ilustración 36.. Endurecimiento Isotrópico.

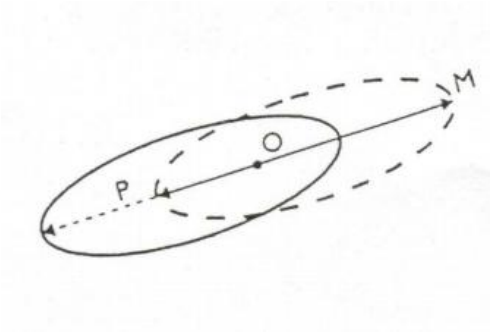


Ilustración 37. Endurecimiento Cinemático.

5.5.1 Endurecimiento Isotrópico

El endurecimiento isotrópico es una especie de transformación homotética, lo que quiere decir que existe una dilatación de la fluencia (Cedencia).

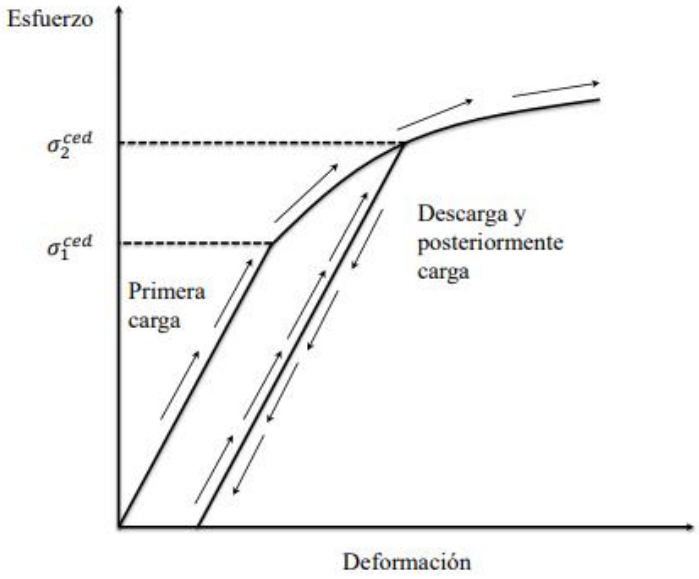


Ilustración 38. Diagrama Deformación-esfuerzo donde se aprecia el incremento en la fluencia debido a un endurecimiento isotrópico.

En la ilustración 31 se observa que el endurecimiento isotrópico corresponde a una expansión uniforme del criterio de fluencia inicial $\sigma_1 \; hasta \; \sigma_2$.

5.5.2 Endurecimiento Cinemático

El endurecimiento cinemático se puede identificar a una traslación de la fluencia en un esquema Esfuerzo- Deformación para un material.

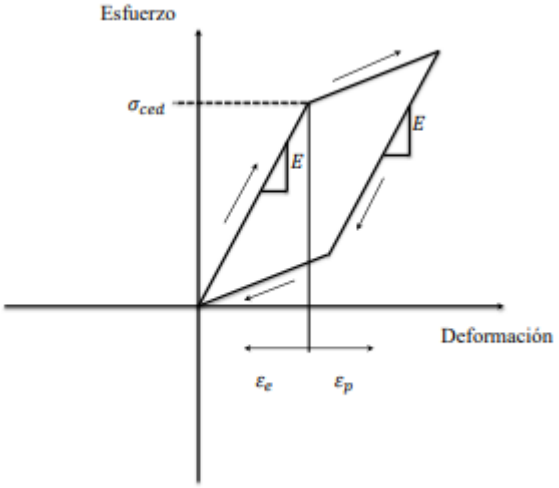


Ilustración 39. Diagrama Deformación-esfuerzo donde se aprecia la traslación del dominio elástico en una prueba uniaxial.

Debido a que en las curvas de esfuerzo-deformación se aprecia un comportamiento progresivo de características uniformes se decide utilizar ésta herramienta para definir las características de plasticidad del macromodelo realizado en ANSYS.

5.5.3 Modelamiento FEM (Finite Element Method)

ANSYS, en su herramienta *Static Structural* permite crear sistemas de simulación a elementos mecánicos que estén sometidos a cargas básicas como fuerzas, presiones, empotramientos, etc.

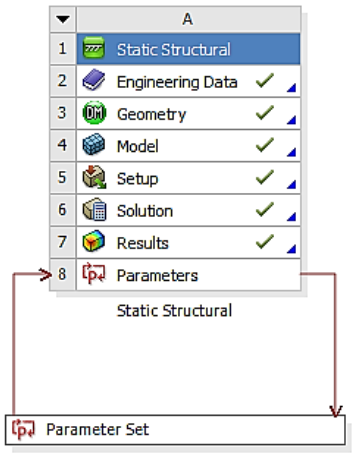


Ilustración 40. ANSYS Workbench 14.5: Static Structural

Inicialmente se definen las características físicas y mecánicas del material de trabajo, es necesario un valor de densidad, resistividad térmica, límite de fluencia, límite ultimo a la tensión, módulo de elasticidad y relación de Poisson, etc., estas propiedades se definen a continuación:

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad (22° C)	7850	Kg/m3
Coeficiente de expansión térmica	1,25 E-05	1/°C
Módulo de Young	2,2675 E+11	Pa
Relación de Poisson	0,29	-
Modulo cortante	1,7996E+11	Pa
Módulo de volumen	8,7888E+10	Pa
Límite de Fluencia	6,3174E+08	Pa
Esfuerzo último a la tensión	6,7275E+08	Pa

Tabla 18. Propiedades físicas y mecánicas para AISI 1020 en estado de suministro

El programa requiere definir el comportamiento plástico del material, ANSYS permite que dicho comportamiento sea definido a partir de una curva de esfuerzo deformación, por lo que se utilizan los datos obtenidos según el modelo de Ramberg-Osgood en la tabla 15.

Table of Properties Row 12: Multilinear Isotropic Hardening

	A	B	C
1	Temperature (C)	Plastic Strain (mm mm^-1)	Stress (Pa)
2	22	0,00021192	3,4308E+06
*		0,0032602	5,2781E+07
		0,0084114	1,3617E+08
		0,026082	3,2771E+08
		0,043394	4,2225E+08
		0,073225	7,168E+08
		0,077611	7,2521E+08
		0,079126	7,2802E+08
		0,081783	7,3286E+08
		0,093765	7,5322E+08
		0,105	7,705E+08
		0,10995	7,7765E+08
		0,11109	7,7926E+08
		0,12746	8,0102E+08
		0,13633	8,1189E+08

Ilustración 41. Comportamiento isotrópico multilineal según el modelo de Ramberg-Osgood (Tabla 15)

Posteriormente se debe modelar la probeta con las dimensiones establecidas inicialmente según la norma ASTM E8 para ensayos de tensión, *Static Structural* permite realizar el modelamiento, o de ser necesario ANSYS soporta archivos de programas de diseño tales como SolidWorks, Inventor, etc.

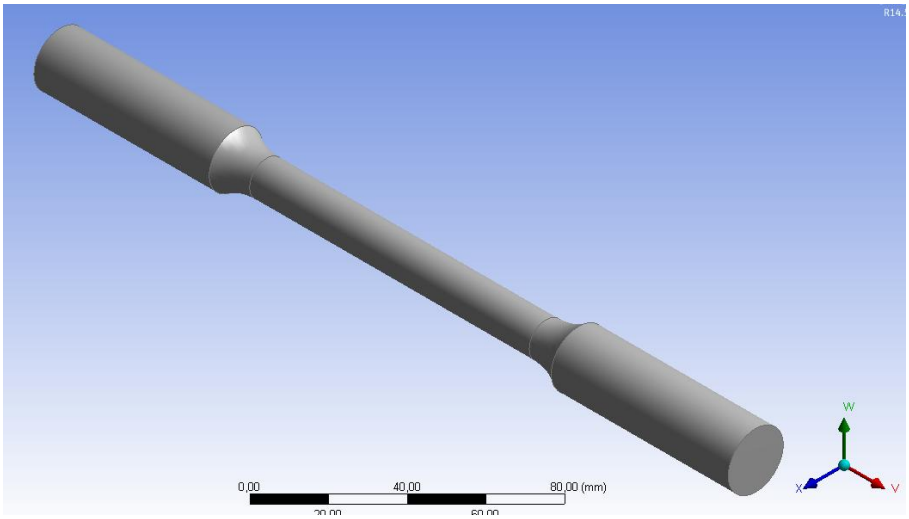


Ilustración 42. Probeta de tensión ASTM E8

El software soluciona el problema a partir de la división de la probeta en elementos con un tamaño de alrededor de *5 mm* los cuales analiza de manera individual y posteriormente genera un resultado general a partir de la recolección de todas las soluciones para cada elemento, a continuación el enmallado:

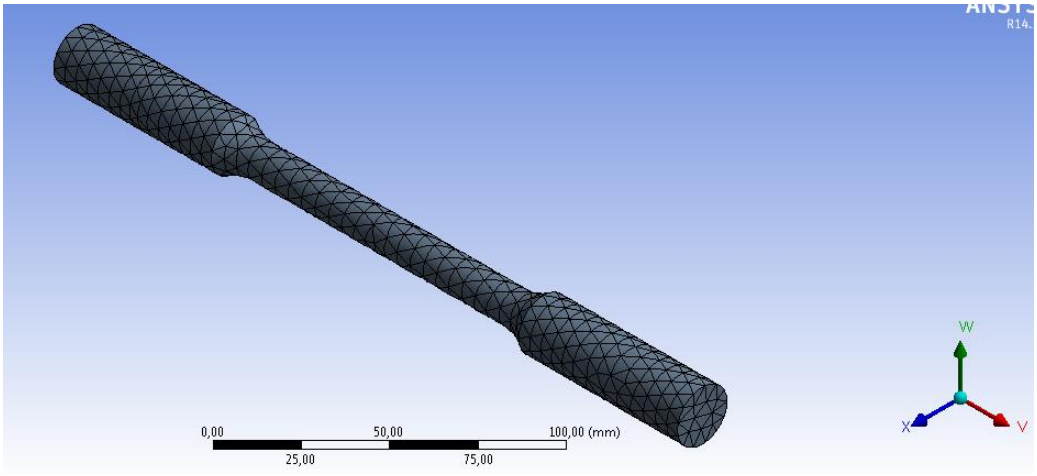


Ilustración 43. Probeta enmallada.

El siguiente paso es definir la interacción de la probeta con las distintas cargas del problema. Una fuerza aplicada perpendicular al área transversal de la probeta similar a la carga máxima aplicada en el ensayo de tensión, y una restricción de desplazamiento en la cara inversa a la de aplicación de las fuerzas define el problema mecánicamente. Definiremos la carga como el parámetro de entrada en el *Parameter Set*, una ayuda que nos permite desarrollar el programa de manera más eficiente.

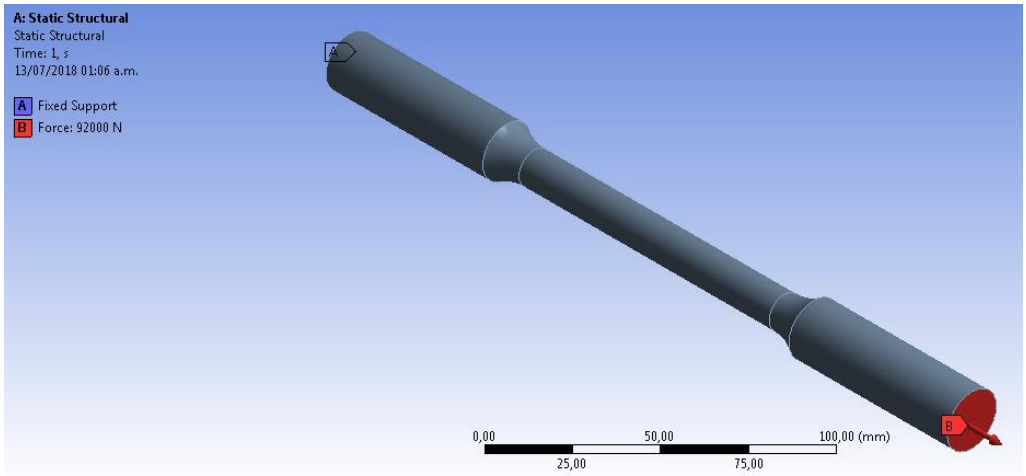


Ilustración 44. Modelo mecánico.

El esfuerzo equivalente de von Misses es uno de los distintos enfoques de solución de problemas, de igual forma, la deformación plástica equivalente nos permiten obtener los valores de esfuerzo-deformación necesarios para trazar la gráfica del ensayo simulado. Mediante lo cual se obtiene:

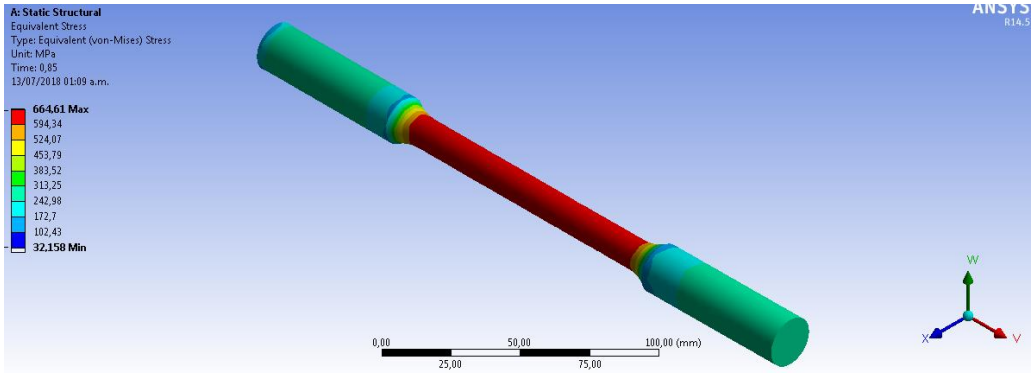


Ilustración 45. Esfuerzo equivalente de von Misses para probeta en estado de suministro

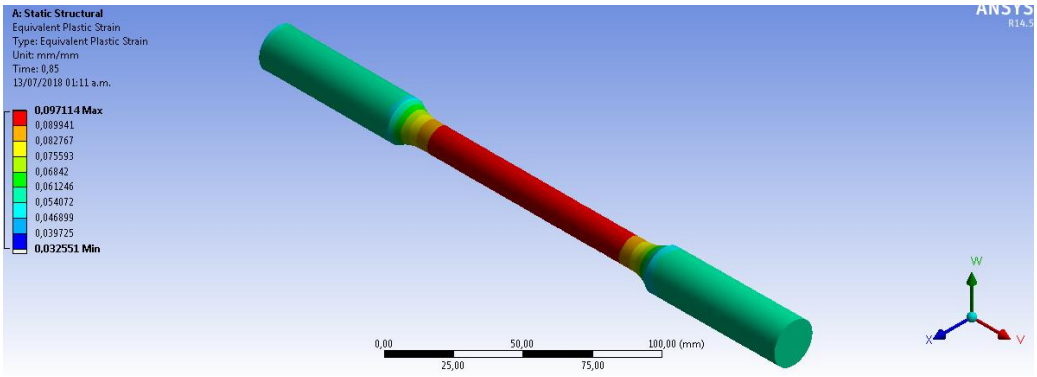


Ilustración 46. Deformación plástica equivalente para probeta en estado de suministro

La herramienta *Parameter Set* permite definir variables de entrada y de salida con el propósito de hacer la simulación en función de distintos valores de fuerza de aplicación, esto con el fin de hacer una progresión del esfuerzo y la deformación a partir de la carga aplicada.

La variable de entrada para el macromodelamiento es la fuerza aplicada, las variables de salida son el esfuerzo máximo equivalente de von Misses y la deformación plástica total, de esta forma se obtiene los siguientes valores de esfuerzo-deformación.

Table of Design Points

	A	B	C	D
1	Name	P1 - Force X Component	P2 - Equivalent Stress Maximum	P3 - Equivalent Plastic Strain Maximum
2	Units	N	MPa	mm mm^-1
3	Current	5000	42,68	0,0025931
4	DP 1	10000	85,523	0,0052831
5	DP 2	20000	170,5	0,011579
6	DP 3	30000	256,13	0,019479
7	DP 4	40000	340,24	0,028377
8	DP 5	50000	426,25	0,043802
9	DP 6	60000	514,51	0,052743
10	DP 7	70000	600,39	0,061441
11	DP 8	80000	685,05	0,070018
12	DP 9	90000	765,68	0,10187
13	DP 10	92000	782,74	0,11371

Ilustración 47. Esfuerzo-deformación tras la simulación del macromodelamiento para AISI 1020 en estado de suministro

El mismo procedimiento se realiza para las probetas tratadas térmicamente, pero en este caso, las propiedades del material se extraen del promedio de las dos probetas estudiadas.

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad (22° C)	7850	Kg/m3
Coeficiente de expansión térmica	1,25 E-05	1/°C
Módulo de Young	2,2374 E+10	Pa
Relación de Poisson	0,29	-
Modulo cortante	2,0829E+10	Pa
Módulo de volumen	1,017E+10	Pa
Límite de Fluencia	7,2858E+08	Pa
Esfuerzo último a la tensión	9,00E+08	Pa

Tabla 19. Propiedades mecánicas para AISI 1020 templado (800°C)

Table of Properties Row 12: Multilinear Isotropic Hardening

	A	B	C
1	Temperature (C)	Plastic Strain (m m^-1)	Stress (Pa)
2	22	0	1E-05
*		0,0010759	3,9637E+07
		0,0026082	9,6091E+07
		0,0031461	1,1591E+08
		0,0044502	1,6395E+08
		0,0054283	1,9999E+08
		0,0073682	2,7146E+08
		0,0087864	3,2371E+08
		0,01009	3,7175E+08
		0,013449	4,9547E+08
		0,016171	5,9576E+08
		0,021045	7,3644E+08
		0,024305	7,5492E+08
		0,032668	7,9412E+08
		0,046581	8,6453E+08
		0,055595	8,9633E+08
		0,06386	9,2199E+08
		0,070511	9,4075E+08
		0,082752	9,2947E+08

Ilustración 48. Comportamiento isotrópico multilineal según el modelo de Ramberg-Osgood para probetas templadas (800°C)

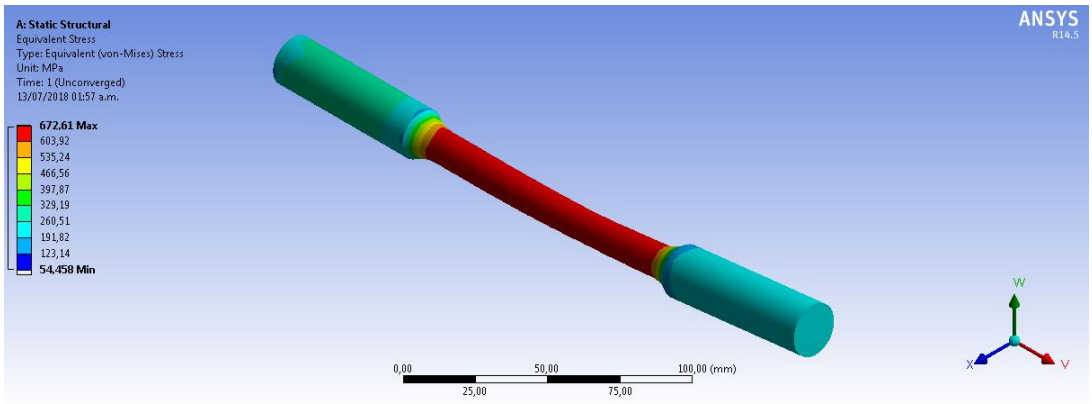


Ilustración 49. Esfuerzo equivalente de von Misses para probetas templadas

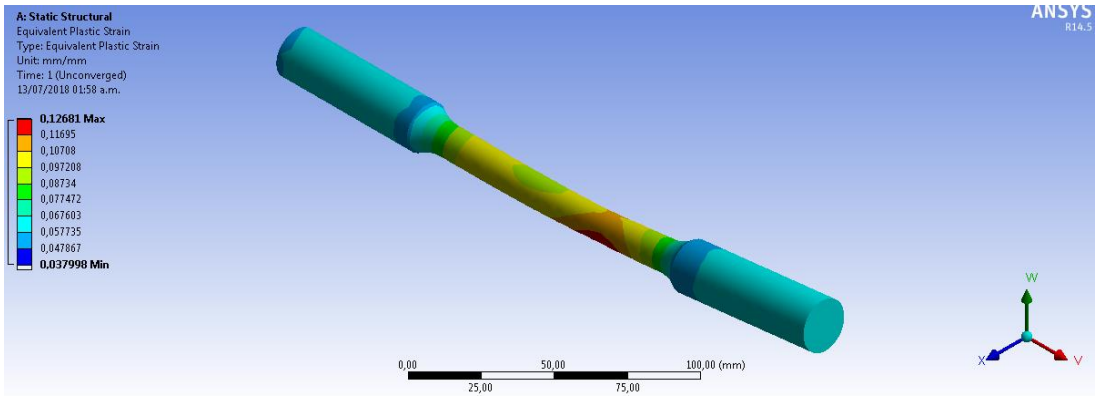


Ilustración 50. Deformación plástica equivalente para probetas templadas

Los resultados de Workbench tras efectuar la simulación se muestran en la siguiente ilustración.

Table of Design Points

	A	B	C	D
1	Name	P1 - Force X Component	P2 - Equivalent Stress Maximum	P3 - Equivalent Plastic Strain Maximum
2	Units	N	MPa	mm mm^-1
3	Current	5000	42,543	0,0011547
4	DP 1	10000	85,085	0,0023095
5	DP 2	20000	170,17	0,004619
6	DP 3	30000	255,26	0,0069285
7	DP 4	40000	340,34	0,0092379
8	DP 5	50000	425,43	0,011547
9	DP 6	60000	510,51	0,013857
10	DP 7	70000	595,59	0,016183
11	DP 8	80000	680,8	0,019117
12	DP 9	90000	766,32	0,026737
13	DP 10	1E+05	851,91	0,044105

Ilustración 51. Esuerzo-deformación: resultados de la simulación ANSYS bajo el criterio de Ramberg-Osgood

6. ANALISIS DE DATOS

6.1 Probeta en estado de suministro

Tras realizar el macromodelamiento, obtener los datos de esfuerzo-deformación a medida que varía la fuerza de aplicación, es necesario realizar la comparación de los resultados de la simulación y las pruebas experimentales, para esto, llevaremos los datos obtenidos en ANSYS a una tabla, para graficar el comportamiento.

A continuación, los resultados para una probeta de AISI 1020 en estado de suministro bajo el criterio del macromodelo de Ramberg-Osgood.

Deformación [mm/mm]	Esfuerzo [MPa]
0,002593097	42,6798783
0,005283075	85,5232724
0,011578739	170,497603
0,019479109	256,126002
0,028377183	340,244715
0,043802077	426,253256
0,052742666	514,509698
0,061440898	600,393685
0,070018224	685,050322
0,10186574	765,6813
0,11371302	782,743076

Tabla 20. Datos de esfuerzo deformación según el macromodelo de Ramberg-Osgood para AISI 1020 en estado de suministro

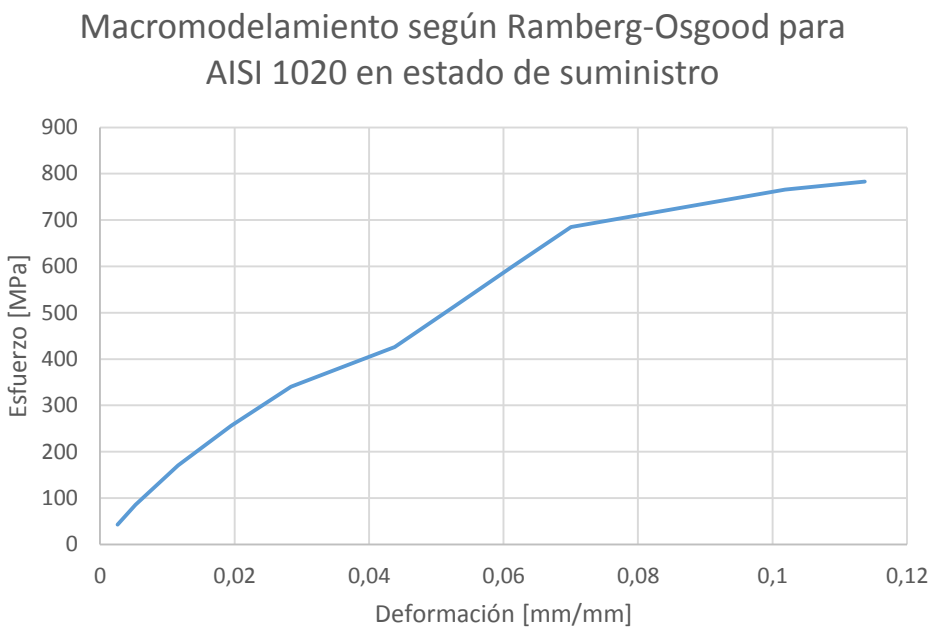


Ilustración 52. Esfuerzo-deformación: Macromodelamiento según el criterio de Ramberg-Osgood para AISI 1020 en estado de suministro

Para determinar la veracidad del modelo utilizado, es necesario realizar una comparación con los datos obtenidos en los ensayos de tensión para la probeta de AISI 1020 en estado de suministro relacionando las ilustraciones 18 (Curva de esfuerzo-deformación: AISI 1020 en estado de suministro) y 48 (Esfuerzo-deformación: (Macromodelamiento según el criterio de Ramberg-Osgood para AISI 1020 en estado de suministro).

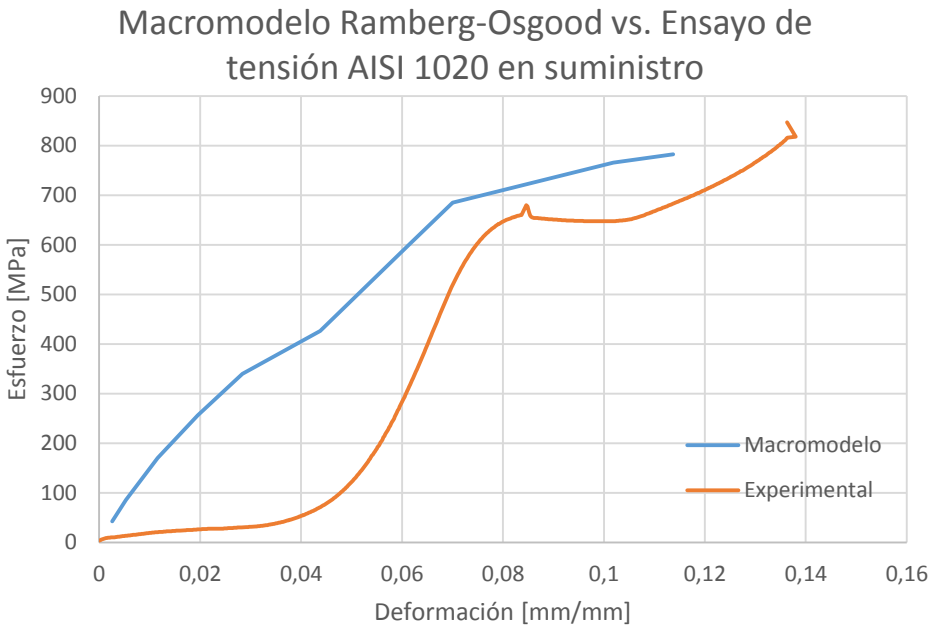


Ilustración 53. Esfuerzo deformación: Comparativa entre el macromodelo de Ramberg-Osgood y el ensayo de tensión a acero AISI 1020 en estado de suministro

Gráficamente se observa que el macromodelo posee una tendencia similar a la del ensayo de tensión, aunque al inicio de las gráficas hay diferencias notables, a medida que nos valores de esfuerzo y deformación aumentan las gráficas tienden a acercarse más.

A continuación se determina el error porcentual entre las gráficas, para así analizar los puntos de mayor ajuste y aquellos que presentan un error más grande, mediante la ecuación:

$$\%Error = \left| \frac{\sigma_{experimental} - \sigma_{macromodelo}}{\sigma_{experimental}} \right| * 100$$

Ecuación 20. Error porcentual.

Los resultados se evalúan a partir de los puntos de deformación obtenidos en la simulación de ANSYS, se toma el valor correspondiente de esfuerzo en la simulación y se compara con el valor correspondiente a una deformación similar de las pruebas de tensión, para lo que se obtiene:

Deformación	Esfuerzo real	Esfuerzo modelo	Error	Error %
0,002593097	10,10354752	42,67987832	3,224246803	322,4246803
0,005283075	13,46952743	85,52327237	5,349389228	534,9389228
0,011578739	20,79270877	170,497603	7,199874529	719,9874529
0,019479109	26,17653515	256,1260022	8,784564717	878,4564717
0,028377183	30,55783983	340,244715	10,13444919	1013,444919
0,043802077	71,36991126	426,2532561	4,972450415	497,2450415
0,052742666	155,9681644	514,5096981	2,298812293	229,8812293
0,061440898	313,9327727	600,3936853	0,912491264	91,24912641
0,070018224	518,6632613	685,0503216	0,32079978	32,07997804
0,10186574	647,8304921	765,6812999	0,181916117	18,19161173
0,11371302	682,632055	782,7430756	0,146654438	14,66544383

Tabla 21. Error porcentual entre el macromodelo de Ramberg-Osgood y las pruebas experimentales de tensión a un acero AISI 1020 en estado de suministro

Se observan valores de error muy grandes para los valores iniciales de deformación lo cual corresponde a una deficiencia a la hora de hacer los ensayos de tensión, la falta de extensómetro al momento de las pruebas genera valores de deformación altos para esfuerzos bajos. Cuando los valores de deformación en el ensayo de tensión superan el 6% las curvas tienden a acercarse y eventualmente el error entre ellas disminuye hasta un 14%, lo cual se traduce en una gran similitud.

6.2 Probetas tratadas térmicamente

La simulación arroja los valores contenidos en la siguiente tabla, de nuevo los criterios para obtener los valores son: Esfuerzo equivalente de von Misses y deformación plástica equivalente.

Deformación [mm/mm]	Esfuerzo [MPa]
0,001154742	42,54273635
0,002309485	85,08547271
0,00461897	170,1709454
0,006928454	255,256417
0,009237939	340,3418908
0,011547424	425,4273632
0,013856909	510,5128341
0,016182777	595,5941452
0,019117111	680,7993375

0,026736752	766,3154039
0,044104854	851,9114244

Tabla 22. Datos de esfuerzo deformación según el macromodelo de Ramberg-Osgood para AISI 1020 templado a 800°C

Ahora se muestra la gráfica que enseña el comportamiento del macromodelo de Ramberg-Osgood en probetas tratadas térmicamente.

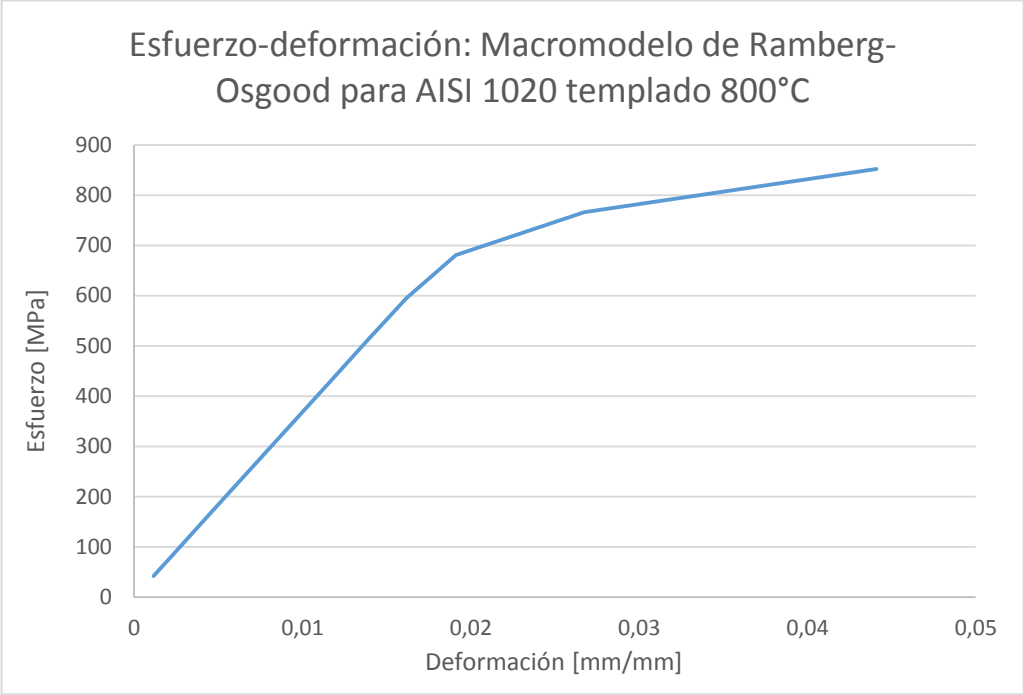


Ilustración 54. Esfuerzo-deformación: Macromodelo de Ramberg-Osgood para probetas templadas a 800°C

También se realiza una comparativa entre los resultados del macromodelo y las pruebas experimentales para determinar si hay consistencia y coherencia entre los comportamientos evaluados.

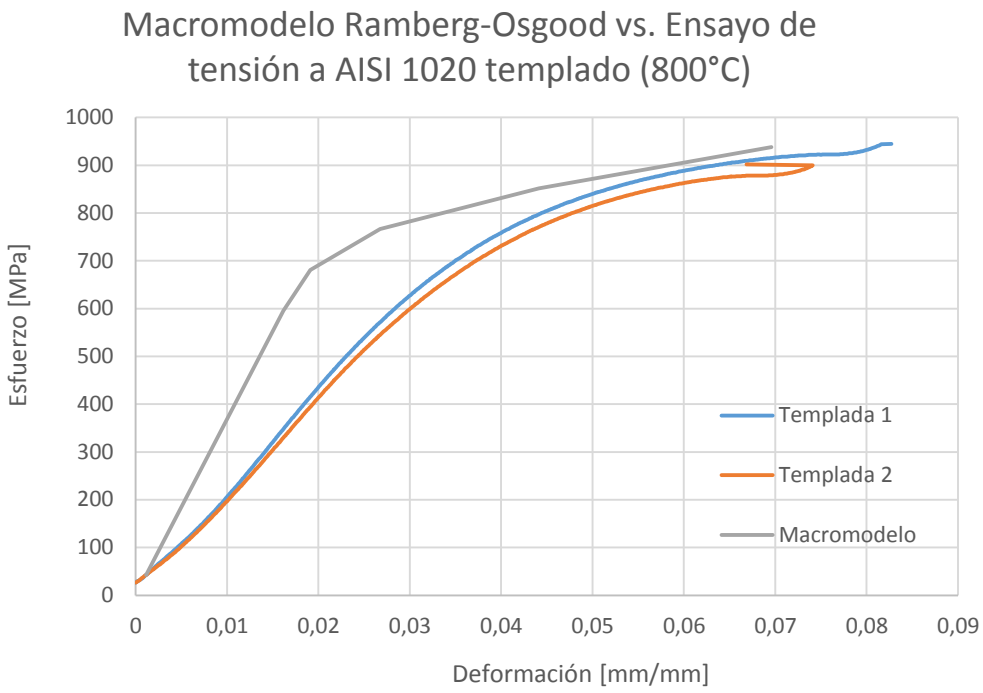


Ilustración 55. Esfuerzo-Deformación: Macromodelo de Ramberg-Osgood vs. Ensayos de tensión a probetas de AISI 1020 templadas a 800°C

A comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de tensión a material de suministro, acá se observa un margen más cerrado entre las gráficas obtenidas, si bien es cierto que cerca de la deformación (ϵ=0,02) hay una diferencia notable, eventualmente las gráficas concurren a valores muy similares de esfuerzo. Adicionalmente se analizan los resultados a partir del margen de error obtenido entre la gráfica otorgada por el macromodelo y el promedio de las gráficas del material templado.

Deformación	Esfuerzo real promedio	Esfuerzo modelo	Error	Error%
0,001154742	42,79243659	42,54273635	0,005835149	0,583514881
0,002309485	61,25679655	85,08547271	0,388996446	38,89964461
0,00461897	98,22177123	170,1709454	0,73251758	73,25175802
0,006928454	139,6733262	255,256417	0,827524439	82,75244385
0,009237939	187,5501909	340,3418908	0,814670991	81,46709913
0,011547424	234,5262902	425,4273632	0,813985813	81,39858129
0,013856909	286,3279034	510,5128341	0,782965712	78,29657118
0,016182777	338,717635	595,5941452	0,758379498	75,83794985
0,019117111	405,0943911	680,7993375	0,680594332	68,05943317

0,026736752	558,1218971	766,3154039	0,373025154	37,30251542
0,044104854	783,797017	851,9114244	0,086903122	8,690312156
0,069569071	897,102981	937,8937308	0,045469417	4,546941725

Tabla 23. Error porcentual entre el macromodelo de Ramberg-Osgood y los ensayos de tensión para AISI 1020 templado (800°C)

La tabla corrobora los comportamientos descritos en la ilustración 55, en un rango de deformación entre (0,002-0,02) existe un gran porcentaje de error entre las gráficas comparadas, esto podría atribuirse al modelo utilizado, ya que el comportamiento de éste está dado a partir de sus factores, los cuales al ser modificado pueden variar aquellos puntos en los cuales la gráfica se estabiliza (se reducen o se aumentan a partir de la variación de *n* en el modelo de Ramberg-Osgood) otro factor que puede ser causal de los porcentajes de error obtenidos puede ser la falta del extensómetro al momento de realizar los ensayos.

De igual forma, observamos un comportamiento muy similar entre los dos métodos, donde las curvas experimentales no tienen un punto que separe la zona elástica de la zona plástica, mientras que en el macromodelo se observa mejor esta característica.

Se alcanzan valores significativamente bajos de error entre el macromodelo y los ensayos cerca al límite último a la tensión, lo que significa que el modelo puede ser de gran utilidad a la hora de determinar hasta qué punto es posible llevar el material en ciertas condiciones de trabajo.

CONCLUSIONES

La implementación y análisis de distintos modelos multilineales de fallo, permiten garantizar y alimentar el trabajo desde distintos puntos de vista, encontrando resultados satisfactorios en algunos modelos y rechazando por distintos criterios modelos que no garantizaban un resultado lo suficientemente aplicable para la investigación. Encontrando principalmente en el modelo de Ramberg Osgoood (1943), resultados que comparándolos en un Diagrama Esfuerzo –Deformación, arrojan resultados y comportamientos de la curva satisfactorios en comparación con el ensayo experimental y el ensayo realizado por un software como lo es en ANSYS.

En el caso de la comparación entre el macro modelo y el ensayo experimental para el Acero AISI 1020 en estado de suministro mostrado en la ilustración 53, se logra evidenciar que la curva del modelo mantiene un comportamiento similar a las curvas de los ensayos experimentales y el realizado por medio del ANSYS, a pesar de que algún factor escalar aumenta verticalmente la curva en comparación a estas dos últimas; entre los 0 Mpa y los 500Mpa se evidencia la mayor diferencia entre curvas, pero a partir de los 600 Mpa las curvas son cada vez más similares, esta variación posiblemente se debe al sistema de sujeción que se tenía en el momento de las pruebas de tensión, las cuales pueden permitir que la probeta se deslice durante la prueba.

Por otra parte para la comparación entre el macro modelo y el ensayo experimental para el Acero AISI 1020 con tratamiento térmico (Temple) mostrado en la ilustración 55, es donde se obtuvieron mejores resultados. Evidenciando un comportamiento bastante similar entre todas las curvas, siendo característico que la curva del modelo y la del Software son muy similares, pero comparándolas con las del ensayo, se obtuvieron valores bastantemente exactos a partir de los 852 Mpa aproximadamente.

Esta investigación es un gran aporte para el desarrollo que se quiere llevar en marco al estudio de macro y micro modelos de fallo para materiales, plasmando resultados considerablemente buenos para la aplicación de modelos que permitan evidenciar el comportamiento de un material cuando es sometido a cargas, sin necesidad de desarrollar un ensayo experimental o practico.

Permitiendo investigaciones futuras con base en los diferentes modelos de fallo que existen, variando las diferentes características como lo son el material, la geometría, el tipo de carga, entre otros, que permitan desarrollar cada vez mejores resultados; y una investigación cada vez más completa que llegue a sustentar el comportamiento de cualquier pieza independientemente de su material.

BIBLIOGRAFÍA

ASKELAND, Donald R., PRADEEP P. Fulay y WENDELIN J. Wright, Ciencia e Ingeniería de Materiales, Sexta Edición, ISBN: 978-607-481-620-4, Cengage learning Editores S.A., 2012.

VUONG NGUYEN, Van Do. The Behavior of Ductile Damage Model on Steel Structure Failure. En: SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF CIVIL, URBAN AND TRANSPORTATION ENGINEERING CONFERENCE (2016: Viet Nam). ELSEVIER. Procedia Engineering 142. p. 26-33.

Universidad de pamplona. El Acero. Ing. José Manuel Ramírez Q <http://www.jacekleszczynski.com/images/5147/El%20acero.pdf>

CIA General de Aceros AISI/SAE 1020 y AISI/SAE 1045 Aceros Ingeniería al carbono. Bogotá. Marzo 2017.

Universidad Autónoma de Madrid. Aceros: Aleaciones Hierro-Carbono. Docencia y laboratorios.<https://www.uam.es/docencia/labvfmat/labvfmat/practicas/practica4/fases%20del%20acero.htm>

Aceros Bravos. Ficha Técnica- SAE 1020. Santiago de Chile

MOSCA, Sandra Mabel .LAS FUERZAS Y SU MEDICIÓN: LEY DE HOOKE. Escuela de Enseñanza Media N° 221 "Malvinas Argentinas", Villa Eloisa, Santa Fe. p. 1.

Jorge Eduardo Salazar Trujillo. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Resistencia de materiales básica para estudiantes de ingeniería. primera ed. Marzo 2017. I.S.B.N 978-958-8280-08-0.

RILEY, STURGES, MORRIS. Mecánica de Materiales: Propiedades de los materiales y las relaciones de esfuerzo-deformación unitaria. Primera edición. Ciudad de México: EDITORIAL LIMUSA DE C.V. GRUPO NORIEGA EDITORES, 2001. p 143-147 (ISBN 968).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, 2016. il. ASTM E8/E8M-16a

VALERO FRÍAS, Eduardo. APORTACIONES AL ESTUDIO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE FLUJO AXIAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS: El método de los elementos finitos (MEF ó FEM).

Barcelona, 2004, p 111. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

VALLEDOR BARRIENTOS Roberto. ANÁLISIS SÍSMICO LINEAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL DAÑO SÍSMICO ACUMULADO DE UNA ESTRUCTURA PATRIMONIAL DE ALBAÑILERÍA SIMPLE. EL CASO DEL PALACIO PEREIRA: Técnicas de modelación numérica en la albañilería. Santiago de Chile, 2016, p 38-40. Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería.

Facundo J. Bellomoa, Liz G. Nallima y Sergio Ollerb .MODELO PARA EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ ELASTOMÉRICA REFORZADA. Asociación Argentina de mecánica computacional.2008.

Luis A. Godoy. MODELOS Y ENFOQUES PARA PROBLEMAS CON ACOPLAMIENTO DE MICRO Y MACRO ESTRUCTURAS. Departamento de Estructuras, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba.2003.

Xin-cun Zhuang, Cheng Xu, Tao Wang, Zhen Zhao. Failure mode and ductility of dual phase steel with edge crack. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014,Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan.2014

Pu Xue a, Jian Cao a, Julie Chen. Integrated micro/macro-mechanical model of woven fabric composites under large deformation. University, Evanston USA.2004.

ZHOU Bo†, LIU YanJu, LENG JinSong† & ZOU GuangPing. A macro-mechanical constitutive model of shape memory alloys. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China.2009

Justin D. Littell. Experimental and Analytical Characterization of the Macromechanical Response for Triaxial Braided Composite Materials. University of Akron.2013

WIKIPEDIA. Diagrama hierro-carbono. [En línea]. < https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_hierro-carbono> Consultado en [Mayo de 2018]

“Análisis de las características de los modelos de material recomendados para la simulación de procesos de embutición de chapa de acero”. Javier Colorado Rodríguez.2008. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID.

“Modelación numérica del concreto simple con elementos finitos usando un modelo constitutivo de Plasticidad” del autor Luis Enrique Rodríguez. U. Nacional de Colombia.2011.

“Mechanical properties and constitutive models of low yield point steels”Gang Shi a, Yang Gao , Xun Wang , Yong Zhang. Universidad de Beijing.China .2017.

A CONSTITUTIVE MODEL AND DATA FOR METALS SUBJECTED TO LARGE STRAINS, HIGH STRAINS RATEAND HIGH TEMPERATURES. JOHNSON, G. COOK, W. U.S. Air Force and Honeywell Independent Development Program. 1983-1985.

MODELO HISTERÉTICO DE MATERIALES CON DETERIORO DE RIGIDEZ Y RESISTENCIA. AMATECO, Tomás. ESCOBAR, José. DYER, Juan. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Noviembre 2004