



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN
Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

CENTRO DE POSGRADOS

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MAGÍSTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS
POR COMPUTADOR**

**TEMA: “EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE FRACTURA EN LOS
ENSAYOS DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN PARA DURALUMINIO Y
ACERO INOXIDABLE AISI 304”**

AUTOR: IBUJÉS VILLACÍS, LUIS HOMERO

DIRECTOR: ING. PÉREZ ROSALES, JOSÉ EMILIO MSC.

SANGOLQUÍ

2018



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA
DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS
CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **“EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE FRACTURA EN LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN PARA DURALUMINIO Y ACERO INOXIDABLE AISI 304”** realizado por el señor **Ibujés Villacís Luis Homero**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido y/o plagio además cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo a autorizar al señor **Ibujés Villacís Luis Homero** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 19 de abril 2018



José Emilio Pérez Rosales
C. I.: 1706481957



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA
DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Ibujés Villacís, Luis Homero** con cédula de identidad N° 0501317754, declaro que este trabajo de titulación **“EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE FRACTURA EN LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN PARA DURALUMINIO Y ACERO INOXIDABLE AISI 304”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 19 de abril 2018

Luis Homero Ibujés Villacís

C.I.: 0501317754

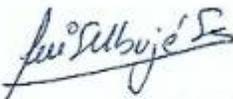


**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA
DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS**

AUTORIZACIÓN

Yo, **Ibujés Villacís, Luis Homero** con cédula de identidad N° 0501317754, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en su totalidad en el repositorio Institucional el trabajo de titulación **“EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE FRACTURA EN LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN PARA DURALUMINIO Y ACERO INOXIDABLE AISI 304”** cuyo contenido, ideas son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 19 de abril 2018


Luis Homero Ibujés Villacís
C.I.: 0501317754



DEDICATORIA

“Las grandes conquistas no se logran individualmente, se lo hace con un gran equipo”.

A **Dios**. Por sentir siempre su presencia en cada momento de mi vida

A mi esposa **Jeanneth**. Mi gran compañera, con quien encontré que la existencia tiene sentido cuando se vive por amor, compromiso y superación.

A mis hijos **Luis David** y **Montserrat**, Fuentes de inspiración en quienes tengo dos grandes razones para vivir y seguir adelante.

A mis Padres **Carlos y Luz**. Fuente de amor, ejemplo y sacrificio, siempre están presentes en cada momento de mi vida.

A mis once **hermanos**. Su permanente respaldo hace que la vida me muestre caminos más seguros de transitar.

Luis Homero Ibujés Villacís



AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento especial al **Ing. José Pérez** por su acertada conducción en los ensayos realizados y en el direccionamiento profesional y paciente de la tesis, al **Ing. Patricio Riofrío** por compartir sus conocimientos de plasticidad y permitir que la investigación abra nuevos espacios, al **Ing. Francisco Navas** por compartir su experiencia en la realización de los ensayos y a todos **mis maestros y compañeros** de la Maestría que permitieron que la actualización de conocimientos sea efectiva.

Luis Homero Ibjés Villacís

CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	I
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	II
AUTORIZACIÓN	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 DESARROLLO DEL PROBLEMA	1
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER	2
1.4 HIPÓTESIS	2
1.5 OBJETIVOS.....	3
1.6 ANTECEDENTES.....	4
1.7 JUSTIFICACIÓN	5
1.8 ALCANCE	6
1.9 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	6

2.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
2.1	EL DURALUMINIO.....	7
2.2	EL ACERO INOXIDABLE AISI 304.....	9
2.3	ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	11
2.4	ENSAYOS DE COMPRESIÓN.....	22
2.5	CRITERIOS DE FRACTURA.....	24
2.6	EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE FRACTURA.....	27
3.	EXPERIMENTACIÓN	34
3.1	MATERIALES.....	34
3.2	PROBETAS.....	38
3.3	EQUIPO PARA LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN.....	40
3.4	PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN.....	42
3.5	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	43
3.6	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN.....	56
3.7	MORFOLOGÍA DE LA FRACTURA.....	59
4.	SIMULACIÓN	65
4.1	OBJETIVO.....	65
4.2	GEOMETRÍA.....	66
4.3	PARÁMETROS Y CONSTANTES RELACIONADAS CON EL MATERIAL.....	67
4.4	APLICACIÓN DEL CRITERIO DE FRACTURA.....	69
4.5	ANÁLISIS PARAMÉTRICO.....	70

4.6 PARÁMETROS Y CONDICIONES PARA LA ETAPA DE PREPROCESO	76
4.7 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	77
5. DISCUSIÓN	89
5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	89
5.2 ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES	97
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
6.1 CONCLUSIONES.....	110
6.2 RECOMENDACIONES	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 Estructura metalográfica del duraluminio.....	8
Figura 2 Estructura metalográfica del acero inoxidable	10
Figura 3 Probeta típica de un ensayo de tensión.....	11
Figura 4 Diferentes sistemas de agarre de las probetas de tensión	12
Figura 5 Máquina de ensayos de tensión.	12
Figura 6 Secuencia de deformación de una probeta a tensión.....	13
Figura 7 Curva típica esfuerzo-deformación obtenida de un ensayo de tracción	14
Figura 8 Comparación entre las curvas de esfuerzo-deformación ingenieril y real.....	17
Figura 9 Construcción de los diagramas esfuerzo – deformación	18
Figura 10 Aproximaciones matemáticas para la curva esfuerzo-deformación real.....	19
Figura 11 Curvas esfuerzo-deformación reales en tensión a temperatura ambiente....	21
Figura 12 Abarrilamiento de una probeta a compresión	22
Figura 13 Proceso de compresión y efecto de la fricción	23
Figura 14 Esfuerzo y deformación en compresión para materiales dúctiles.....	24
Figura 15 Probetas de ensayos para la evaluación de los ocho criterios de fractura ...	28
Figura 16 Comparación de Cockroft y Latham con los puntos experimentales	29
Figura 17 Comparación de la predicción de los siete criterios de fractura.....	30
Figura 18 Probetas para la tracción.....	31
Figura 19 Fractura de las probetas a compresión	31
Figura 20 Relación entre el daño acumulado y la deformación	32

Figura 21 Valores del daño en la zona ecuatorial versus deformación plástica.....	33
Figura 22 Microestructura del duraluminio.....	36
Figura 23 Microestructura del acero inoxidable	37
Figura 24 Probetas tracción: a) y c) duraluminio y b) y d) acero inoxidable AISI 304 ...	39
Figura 25 Probetas para compresión de duraluminio y acero inoxidable.	39
Figura 26 Máquinas universales de ensayos.....	41
Figura 27 Mordazas utilizadas para tracción y compresión	41
Figura 28 Extensómetros.....	42
Figura 29 Carga y posición del software. a) Duraluminio. b) Acero inoxidable.....	44
Figura 30 Esfuerzo y deformación del software. a) Duraluminio. b) Acero inoxidable ..	45
Figura 31 Diagrama carga – desplazamiento del duraluminio.....	46
Figura 32 Diagrama esfuerzo – deformación ingenieril y real del duraluminio.....	48
Figura 33 Aproximaciones matemáticas para el duraluminio. a) lineal. b) potencial.....	48
Figura 34 Aproximación lineal para el esfuerzo – deformación real del duraluminio	49
Figura 35 Aprox. potencial para el esfuerzo – deformación real del duraluminio.....	49
Figura 36 Diagramas ingenieril, real y curva de aproximación para el duraluminio.....	51
Figura 37 Diagrama carga – desplazamiento del acero inoxidable AISI 304.....	53
Figura 38 Esfuerzo – deformación real e ingenieril del acero inoxidable.....	54
Figura 39 Aproximación lineal del esfuerzo – deformación real del acero inoxidable...	54
Figura 40 Esfuerzo – deformación real de los ensayos 2 y 3 del acero inoxidable.....	56
Figura 41 Diagrama Carga – desplazamiento de la compresión del duraluminio.....	57
Figura 42 Carga – desplazamiento de la compresión del acero inoxidable.....	58
Figura 43 Duraluminio a tracción: a) probeta fracturada b) fragmento extraído.....	59

Figura 44 Microscopía SEM del duraluminio a tracción: a) centro, b) costado	60
Figura 45 Acero inoxidable a tracción: a) probeta fracturada b) fragmento extraído ..	61
Figura 46 Microscopía SEM del acero inoxidable a tracción: a) centro, b) costado.....	62
Figura 47 Duraluminio a compresión: a) probeta fracturada, b) fragmento extraído.....	63
Figura 48 Microscopía SEM del duraluminio a compresión: a) centro, b) costado	63
Figura 49 Fractura del acero inoxidable a compresión	64
Figura 50 Geometría de las simulaciones	66
Figura 51 Curvas carga - desplazamiento según el número de elementos finitos.....	71
Figura 52 Carga – desplazamiento con diferentes coeficientes de fricción	74
Figura 53 Influencia del valor del daño en el criterio de Cockroft y Latham.....	75
Figura 54 Influencia de la constante a_0 en el criterio de Oyane	76
Figura 55 Carga – desplazamiento y fractura del duraluminio a tracción, C&L	78
Figura 56 Carga – desplazamiento y fractura del duraluminio a tracción, Oyane.....	79
Figura 57 Carga – desplazamiento experimental y simuladas del duraluminio	79
Figura 58 Carga – desplazamiento y fractura del acero inox. a tracción según C&L....	81
Figura 59 Carga – desplazamiento y fractura del acero inoxidable, Oyane.....	81
Figura 60 Carga – desplazamiento experimental y simuladas del acero inox.	82
Figura 61 Carga – desplazamiento y fractura del duraluminio a compresión, C&L	83
Figura 62 Carga – desplazamiento y fractura del duraluminio a compresión, Oyane...	83
Figura 63 Carga – desplazamiento experimental y simulada del duraluminio	84
Figura 64 Carga - desplazamiento y fractura del acero inoxidable, C&L	85
Figura 65 Carga – desplazamiento y fractura del acero inoxidable, Oyane.....	85
Figura 66 Carga – desplazamiento experimental y simulada del acero inox.	86

Figura 67 Oyane para compresión del acero inox. en la cercanía de la falla	87
Figura 68 Ajuste de la curva de compresión para el acero inoxidable, Oyane	88
Figura 69 Microestructuras comparadas del duraluminio	92
Figura 70 Microestructuras comparadas del acero inoxidable.....	92
Figura 71 Diagramas esfuerzo - deformación real comparados	93
Figura 72 Fractura dúctil por tracción según.....	94
Figura 73 Fractura dúctil por tracción para el acero inoxidable	95
Figura 74 Fractura por cortante en compresión.....	96
Figura 75 Fractura por cortante en el duraluminio	97
Figura 76 Lugar geométrico de los criterios de fractura para el duraluminio	101
Figura 77 Lugar geométrico de los criterios de fractura para el acero inoxidable.....	103
Figura 78 Deformación efectiva del duraluminio a tracción según C&L.....	105
Figura 79 Deformación efectiva del duraluminio a tracción según Oyane	106
Figura 80 Deformación efectiva del acero inoxidable a tracción según C&L	106
Figura 81 Deformación efectiva del acero inoxidable a tracción según Oyane	106
Figura 82 Deformación efectiva del duraluminio a compresión según C&L.....	107
Figura 83 Deformación efectiva del duraluminio a compresión según Oyane	107
Figura 84 Deformación efectiva del acero inoxidable a compresión según C&L	108
Figura 85 Deformación efectiva del acero inoxidable a compresión según Oyane.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Propiedades mecánicas del duraluminio</i>	8
Tabla 2	<i>Propiedades mecánicas del acero inoxidable</i>	10
Tabla 3	<i>Valores de K y n de algunos metales</i>	20
Tabla 4	<i>Composición química del Acero inoxidable AISI 304 y el Duraluminio</i>	35
Tabla 5	<i>Cantidad de probetas a ensayarse</i>	38
Tabla 6	<i>Propiedades mecánicas del duraluminio y el acero inoxidable AISI 304</i>	43
Tabla 7	<i>Geometría de la probeta de duraluminio para tracción</i>	46
Tabla 8	<i>Relaciones utilizadas para construir el diagrama ingenieril del duraluminio</i>	47
Tabla 9	<i>Relaciones utilizadas para construir el diagrama real del duraluminio</i>	47
Tabla 10	<i>Error de aproximación para el duraluminio</i>	50
Tabla 11	<i>Resultados experimentales del duraluminio a tracción</i>	51
Tabla 12	<i>Error de aproximación para el acero inoxidable</i>	55
Tabla 13	<i>Resultados experimentales del acero inoxidable AISI 304</i>	55
Tabla 14	<i>Resultados del ensayo de compresión para el duraluminio</i>	57
Tabla 15	<i>Resultados del ensayo de compresión para el acero inoxidable</i>	58
Tabla 16	<i>Parámetros y constantes para el número de elementos finitos</i>	72
Tabla 17	<i>Incidencia del coeficiente de rozamiento en la simulación de compresión</i>	74
Tabla 18	<i>Síntesis de parámetros y valores a ingresarse en las simulaciones</i>	77
Tabla 19	<i>Número de simulaciones realizadas</i>	77
Tabla 20	<i>Resultados experimentales. y criterios de fractura del duraluminio</i>	80
Tabla 21	<i>Resultados experimentales y criterios de fractura para el acero inoxidable</i> ..	82

Tabla 22	<i>Resultados experimentales y criterios de fractura para el duraluminio</i>	84
Tabla 23	<i>Resultados experimentales y criterios de fractura para el acero inox.</i>	86
Tabla 24	<i>Propiedades mecánicas obtenidas según tres fuentes de información.....</i>	90
Tabla 25	<i>Análisis químico del duraluminio</i>	91
Tabla 26	<i>Análisis químico del acero inoxidable.....</i>	91
Tabla 27	<i>Calidad del ajuste en las simulaciones según el criterio de fractura</i>	98
Tabla 28	<i>Valores de deformación efectiva y de triaxialidad para el duraluminio</i>	102
Tabla 29	<i>Deformación efectiva y de triaxialidad para el acero inoxidable.....</i>	103
Tabla 30	<i>Valor del daño de las simulaciones realizadas.....</i>	104
Tabla 31	<i>Deformación efectiva experimental y simuladas</i>	109

RESUMEN

En los procesos de formado, existe un gran interés por la evaluación de los criterios de fractura en cuanto a su aplicabilidad a los diferentes estados de carga y la facilidad de su calibración para su uso en rutinas y códigos de simulación. El presente trabajo evalúa dos criterios de fractura: Cockcroft y Latham, y Oyane, mediante simulación por el método del elemento finito de los ensayos de tracción y compresión para duraluminio y para acero inoxidable AISI 304. Con este fin se obtienen experimentalmente curvas carga-desplazamiento de los dos estados de carga para los dos materiales. Los ensayos de tracción sirven adicionalmente para determinar la curva esfuerzo-deformación real y su aproximación matemática. Se construye un modelo de simulación de los dos ensayos para generar las curvas carga-desplazamiento que son ajustadas, mediante los dos criterios de fractura, a los resultados experimentales. También se analiza la morfología de la fractura. Se obtuvo una adecuada concordancia entre los resultados experimentales y los de la simulación y se obtienen directrices sobre la aplicabilidad de los dos criterios de fractura para los dos materiales.

PALABRAS CLAVE:

- **TRACCIÓN**
- **COMPRESIÓN**
- **CRITERIO DE FRACTURA**
- **SIMULACIÓN**

ABSTRACT

In the forming processes, there is great interest in the evaluation of the fracture criteria in terms of its applicability to the different load states and the ease of its calibration for use in routines and simulation codes. The present work evaluates two criteria of fracture: Cockcroft and Latham, and Oyane, by means of simulation by the finite element method of tensile and compression tests for duralumin and for stainless steel AISI 304. For this purpose, load-displacement curves are experimentally obtained of the two states of charge for the two materials. The tensile tests serve additionally to determine the actual stress-strain curve and its mathematical approximation. A simulation model of the two tests is constructed to generate the load-displacement curves that are adjusted, by means of the two fracture criteria, to the experimental results. The morphology of the fracture is also analyzed. An adequate agreement was obtained between the experimental results and those of the simulation and guidelines are obtained on the applicability of the two fracture criteria for the two materials.

KEYWORDS:

- **TENSILE**
- **COMPRESSION**
- **FRACTURE CRITERIA**
- **SIMULATION**

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Objeto de estudio: materiales metálicos

Campo de acción: criterios de fractura de los materiales metálicos

La carencia de elementos de evaluación que permitan validar el criterio de fractura más adecuado para lograr el ajuste de los estados de esfuerzo y deformación obtenidos por simulación de los ensayos de tracción y compresión en el duraluminio y acero inoxidable AISI 304.

1.2 DESARROLLO DEL PROBLEMA

En la actualidad con el desarrollo tecnológico, las propiedades mecánicas de los materiales se obtienen con la simulación del ensayo que viene a sustituir al ensayo experimental que se lleva a cabo en laboratorios, definitivamente esta tendencia ha contribuido a disminuir los recursos que se invertían en el estudio de los materiales.

Sin embargo, al realizar las simulaciones muchos de los resultados obtenidos no se ajustan a la realidad y esto genera dudas al momento de aplicar estos resultados, en algunos casos los criterios de fractura utilizados para la simulación de los ensayos contribuyen a obtener estados de esfuerzo y deformación cercanos a la realidad en ciertos intervalos de estos o solo se aproxima a los resultados experimentales bajo ciertas condiciones.

Para complementar, muchos investigadores no sugieren cuál es el criterio de fractura más adecuado por lograr los fines mencionados y es por ello por lo que no se generaliza el criterio más conveniente de utilizar.

Existen varios criterios de fractura para lograr tal fin, en el presente estudio se va realizar la experimentación de los ensayos de tracción y compresión para dos materiales y por medio de la simulación se utilizarán dos criterios de fractura, los resultados que se obtengan pretenden establecer conclusiones que llevarán a tener elementos que permitan sugerir cuál es el criterio más adecuado para efectuar las simulaciones generando resultados de confianza que permitan que el estudio de los materiales se lo haga garantizando la veracidad de los resultados.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER

¿Cuál es el criterio de fractura que se ajusta con mayor efectividad a los resultados experimentales en los ensayos de tracción y compresión?

¿Cuáles son las características morfológicas que se obtienen como consecuencia de la fractura causada durante los ensayos de tracción y compresión del duraluminio y el acero inoxidable AISI 304?

1.4 HIPÓTESIS

Los criterios de fractura de Conckroft – Latham y Oyane utilizados para simular los ensayos de tracción y compresión en duraluminio y acero inoxidable AISI 304 permiten obtener valores confiables con un aceptable margen de error comparado con los valores

de los diagramas de estado de esfuerzo y deformación obtenidos mediante experimentación.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los criterios de fractura de Cockcroft y Latham y de Oyane mediante la simulación por el método del elemento finito que servirán para lograr el ajuste necesario a las curvas de estado de esfuerzo y deformación que se generen como consecuencia de los ensayos de tracción y compresión del duraluminio y el acero inoxidable AISI 304.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la recopilación de conceptos y principios que rigen el proceso de formado por tracción y compresión.
- Caracterizar al duraluminio y acero inoxidable AISI 304 determinando los esfuerzos máximos, de fluencia y de rotura, porcentaje de elongación, el coeficiente de resistencia **K** y el exponente de endurecimiento por deformación **n**.
- Realizar los ensayos de tracción y compresión para obtener las curvas de carga y desplazamiento y determinar las deformaciones presentes utilizando probetas de los materiales objetos de la investigación.
- Simulación por el método de los elementos finitos de los ensayos de tracción y compresión utilizando los criterios de fractura de Cockcroft – Latham y Oyane.

- Caracterizar la morfología de la falla producida por los ensayos a realizarse.

1.6 ANTECEDENTES

“En los últimos años ha existido un gran interés de los sectores automotriz y aeroespacial en la simulación de la fractura del aluminio y el acero por lo tanto existe una fuerte presión sobre las empresas que desarrollan software para lograr este cometido” (Wierzbicki, 2005).

A pesar de que existen varias opciones para abordar la fractura, no se dan directrices para determinar cuál es el criterio más adecuado. Se han hecho observaciones interesantes respecto al rango de aplicabilidad de los criterios además se establecen ciertos criterios de ajuste a las curvas obtenidas.

Existen varios criterios de fractura, pero cada uno de ellos tiene sus características que son propias de los autores de estas (Wierzbicki, 2005), sin embargo, los criterios de Cockcroft y Latham y de Oyane son los que se tomarán para el estudio de las propiedades mecánicas del duraluminio y el acero inoxidable AISI 304.

La fractura dúctil es uno de los mecanismos comunes de inicio de la fractura en los metales. Los modelos de fractura computacional utilizados para predecir la fractura dúctil en metales pueden clasificarse ampliamente en modelos acoplados y desacoplados (Spaniel M, 2014).

Los modelos acoplados utilizan simultáneamente para simular el daño debido a la fractura dúctil y a la plasticidad debido al movimiento de las dislocaciones. Los modelos desacoplados en cambio utilizan independientemente estas dos consideraciones (Li, 2011).

La elección de un modelo computacional se realiza dependiendo de las expectativas del analista en una aplicación particular convencional y se compara con los resultados experimentales para evaluar el rendimiento del nuevo criterio de fractura dúctil.

1.7 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se desarrolla con la finalidad de determinar cuál es el criterio de fractura más adecuado para realizar los ajustes de los diagramas de estado de esfuerzo y deformación del duraluminio y el acero inoxidable AISI 304 a partir de la experimentación y la utilización de elementos finitos para realizar la comparación entre los resultados alcanzados. Es además importante analizar la morfología de la fractura de las probetas ensayadas.

Los resultados a alcanzarse de los materiales propuestos para la investigación permitirán al sector metalmeccánico que realiza conformado tener valores confiables para la ejecución de sus procesos.

1.8 ALCANCE

En este trabajo se plantea la caracterización del Duraluminio y Acero inoxidable AISI 304, determinando las propiedades mecánicas por medio del ensayo de tracción, analizar la composición química, metalográfica y la morfología de la fractura.

Se construirán los diagramas de esfuerzo y deformación real para establecer un modelo matemático que permita la simulación utilizando software de elementos finitos aplicando los criterios de fractura de Cockroft y Latham y el de Oyane.

Además, se realizarán ensayos de compresión para que conjuntamente con los resultados de tracción se puedan evaluar los dos criterios de fractura.

1.9 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Capítulo 1 Introducción

Capítulo 2 Fundamentación teórica

Capítulo 3 Experimentación

Capítulo 4 Simulación

Capítulo 5 Discusión

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

Referencias Bibliográficas

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En el presente capítulo se realiza una recopilación bibliográfica de las características, propiedades y aplicaciones del acero inoxidable AISI 304 y del duraluminio, los ensayos de tracción y compresión, los diagramas esfuerzo deformación, criterios de fractura y la evaluación de algunos de ellos

2.1 EL DURALUMINIO

El duraluminio como aleación se consiguió por primera vez en Alemania en 1909. El duraluminio es idóneo para trabajar con deformación plástica, debido a su alta ductilidad y maleabilidad. Es muy bueno para ser mecanizado a altas velocidades con tiempos reducidos y bajo costo de herramental, posee bajo peso, aproximadamente la tercera parte del acero; también, presenta alta conductividad térmica; tiene buena resistencia a la corrosión; es apropiado para recibir tratamientos superficiales y presenta malas propiedades de soldabilidad.

Composición química: Cu%:2.5 a 4.5, Si%: 0.3 a 0.9, Mg%: 0.3 a 1.0, Mn%: 0.5 a 0.8 y el resto es Aluminio.

Desde el punto de vista metalográfico, figura 1, una aleación de aluminio puede presentar su microestructura de forma dendrítica que muestra la precipitación de la fase Al-Cr-Mn.



Figura 1 Estructura metalográfica del duraluminio

Fuente: (Metals-Handbook, 1985)

En la tabla 1 se resume las propiedades mecánicas del duraluminio.

Tabla 1

Propiedades mecánicas del duraluminio

Lím. fluencia	Resist. Tracción	Elongación	Mód. Elastic.	K	n
Mpa	Mpa	%	Mpa	Mpa	
167 - 431	304 - 490	8.0 - 37	71500	400 - 450	0.2 - 0.3

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

La aleación Duraluminio es ideal a realizar moldes, tanto de inyección, como soplado o termo formado de plásticos en diferentes aplicaciones.

En las construcciones automovilísticas y de aeronaves se usa para piezas estampadas, como brazos, palancas y detalles formados por embutición. Es ideal para el fotograbado debido a su estructura homogénea.

2.2 EL ACERO INOXIDABLE AISI 304

Los aceros inoxidable son aleaciones de hierro con un mínimo de un 10,5% de cromo. Sus características se obtienen mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo (Navarro Cortés, 2013).

La aleación 304 es un acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético, sólo puede endurecerse en frío. Su bajo contenido en carbono con respecto a otras aleaciones otorga una mejor resistencia a la corrosión en estructuras soldadas. Tiene excelentes propiedades para el conformado y el soldado. En general tiene buena resistencia a la corrosión en atmósfera marina e industrial (Kalpakjian, 2008).

Composición química: C%: 0.08 Máx., Mn%: 2 Máx., Si%: 1.00 Máx., Cr%: 18 a 20, Ni%: 8 a 10.5

La microestructura del acero inoxidable, figura 2, muestra a sus granos equiaxiales austeníticos y presenta inclusiones alargadas.



Figura 2 Estructura metalográfica del acero inoxidable

Fuente: (Metals-Handbook, 1985)

En la tabla 2 se resume las propiedades mecánicas del acero inoxidable.

Tabla 2

Propiedades mecánicas del acero inoxidable

Lím. fluencia	Resist. Tracción	Elongación	Mód. Elastic.	K	n
Mpa	Mpa	%	Mpa	Mpa	
460 - 1100	540 - 750 frío 520 - 750 caliente	30 % en 50 mm	193000	1275	0.45

Fuentes: (Navarro Cortés, 2013) (Kalpakjian, 2008)

En forma general, los aceros martensíticos representan el 10% del consumo mundial, los ferríticos un 20% y los austeníticos un 70%

Su utilización es amplia en la fabricación de electrodomésticos, equipos para la industria química, farmacéutica, frigorífica, de tejidos, papel, naval, de petróleo, válvulas y tuberías, tuberías de vapor, instalaciones criogénicas, industria de alimentos, industria láctea, almacenamiento de bebidas y otras.

2.3 ENSAYOS DE TRACCIÓN

Los ensayos de tracción tienen muchos usos y las propiedades que se obtienen de éstos tienen mucha importancia en la selección de los materiales, (Hosford, 2005).

Las propiedades obtenidas permiten la investigación de nuevos materiales o procesos y compararlos con los ya existentes.

Con las teorías de plasticidad los diagramas de esfuerzo - deformación pueden ser utilizados para predecir el comportamiento de los materiales bajo diferentes cargas aplicadas en tensión uniaxial (Dieter, 2003).

Mediante el ensayo de tracción se puede obtener el diagrama de esfuerzo - deformación utilizando probetas del material respectivo, dicha probeta debe estar sujeta a normas que garanticen la veracidad de los resultados.

La probeta de la figura 3 constituye la más común, ésta tiene los extremos agrandados para agarrarla a las mordazas, la parte importante es la sección del calibre que es menor que la de los extremos y es donde se analiza la deformación.

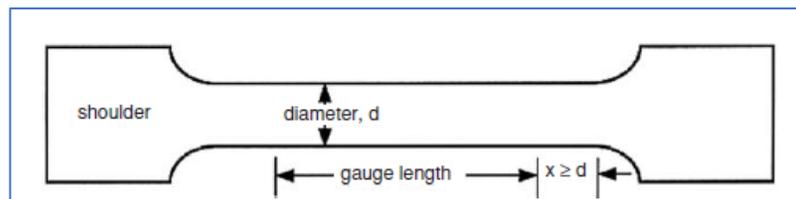


Figura 3 Probeta típica de un ensayo de tensión

Fuente: (Hosford, 2005)

Existen diferentes formas de agarrar las probetas, las cuales se muestran en la figura 4 El sistema de agarre debe asegurar que la carga máxima pueda ser aplicada sin deslizamiento o deformación apreciable en la zona de agarre.

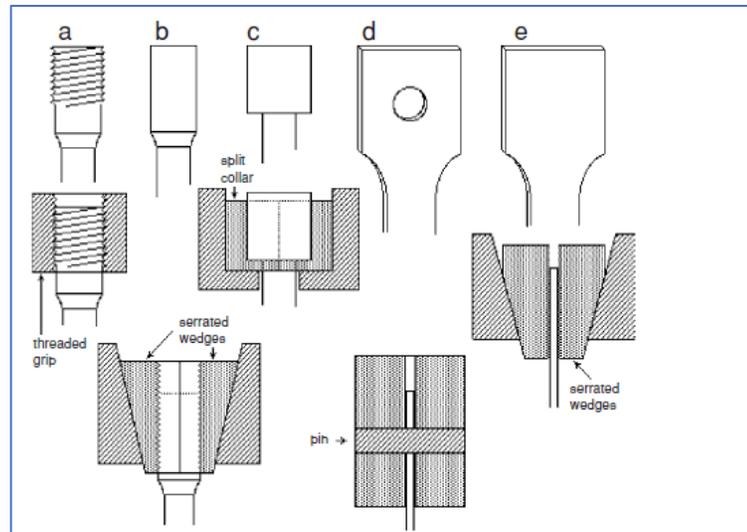


Figura 4 Diferentes sistemas de agarre de las probetas de tensión

Fuente: (Hosford, 2005)

La máquina universal de ensayos de la figura 5 es la utilizada para este efecto.



Figura 5 Máquina de ensayos de tensión.

Fuente: (Ferdinand P., 2012)

2.3.1 DIAGRAMAS DE ESFUERZO – DEFORMACIÓN

En la figura 6 se muestra la secuencia de una probeta sometida a tracción, la figura 6a, muestra la longitud calibrada y su longitud final en la fractura. En las figuras 6b se muestra las diferentes etapas en el alargamiento de la probeta. Al aplicar la carga por primera vez, la probeta se alarga proporcionalmente a ella, este es el comportamiento lineal elástico; al retirar esta carga la probeta vuelve a su condición inicial (Kalpakjian, 2008).

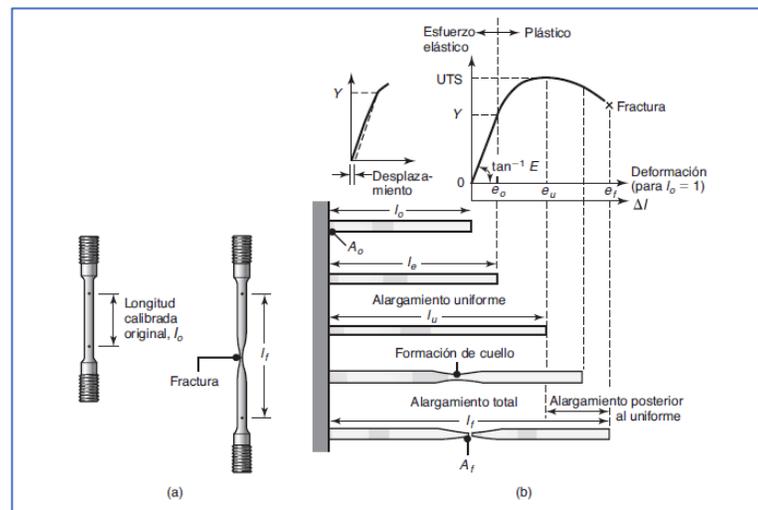


Figura 6 Secuencia de deformación de una probeta a tensión

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

La figura 7 muestra el típico diagrama esfuerzo – deformación obtenido en un ensayo de tracción, en él se pueden ver ciertas características.

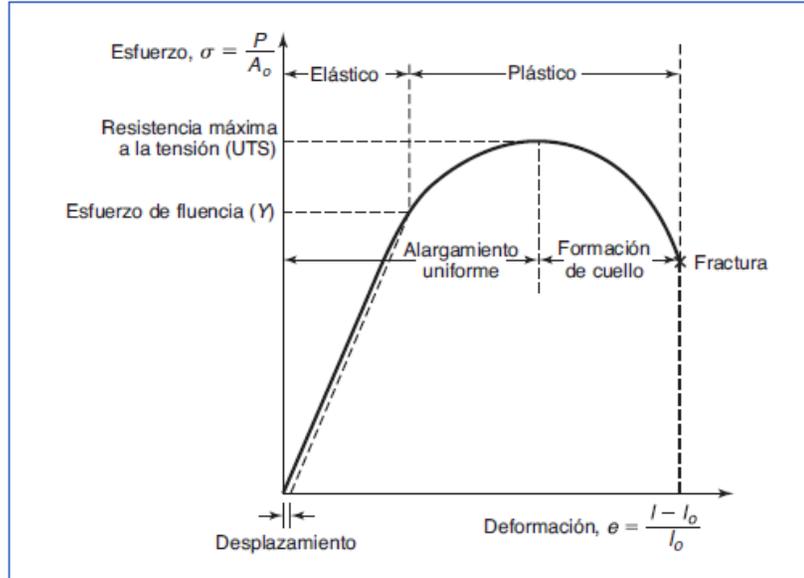


Figura 7 Curva típica esfuerzo-deformación obtenida de un ensayo de tracción

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

El esfuerzo ingenieril o esfuerzo nominal, se define como la relación de la carga aplicada (P) al área transversal original (A_o) de la probeta, (Kalpakjian, 2008).

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \quad \text{Ecuación 1}$$

La deformación ingenieril, se define como,

$$e = \frac{l - l_o}{l_o} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde l es la longitud instantánea del espécimen.

Al aumentar la carga, la probeta con cierto nivel de esfuerzo empieza a sufrir una deformación permanente o plástica. Después de esto la deformación y el esfuerzo ya no son proporcionales, el esfuerzo con el que ocurre este fenómeno es el de fluencia.

2.3.2 ESFUERZO REAL Y DEFORMACIÓN REAL.

El esfuerzo ingenieril se sustenta en el área transversal original A_o del espécimen. Sin embargo, el área instantánea se reduce conforme se aplica la carga, por lo tanto, el esfuerzo ingenieril no es el esfuerzo verdadero (Hosford, 2005).

Por lo tanto, el esfuerzo real se define como la relación de la carga (P) al área transversal real (A) instantánea y por ello verdadera de la probeta.

$$\text{Esfuerzo real, } \sigma = s = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para determinar la deformación real, primero se considera que el alargamiento del espécimen consiste en incrementos de cambio instantáneo de su longitud. La deformación real (natural o logarítmica) se calcula como, (Schey, 2002):

$$\text{Deformación real, } \varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_o}\right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Siempre y cuando la deformación sea uniforme a lo largo de la longitud, el esfuerzo y la deformación verdaderos pueden ser calculados a partir de longitudes ingenieriles, (Hosford, 2005).

Utilizando el principio del volumen constante:

$$lA = l_o A_o \quad \text{Ecuación 5}$$

De tal forma que:

$$\frac{A_o}{A} = \frac{l}{l_o} \quad \text{Ecuación 6}$$

Utilizando la deformación real en la ecuación 6, se tiene:

$$\frac{A_0}{A} = 1 + e$$

Ecuación 7

Expresando el esfuerzo real de la forma:

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

Ecuación 8

Se tiene:

$$\sigma = s(1 + e)$$

Ecuación 9

También sustituyendo en la ecuación 4 de la deformación real,

$$\frac{l}{l_0} = 1 + e$$

Ecuación 10

Se tiene finalmente que:

$$\varepsilon = \ln(1 + e)$$

Ecuación 11

En la figura 8 se establece la comparación entre las curvas esfuerzo-deformación ingenieril y real para un mismo material.

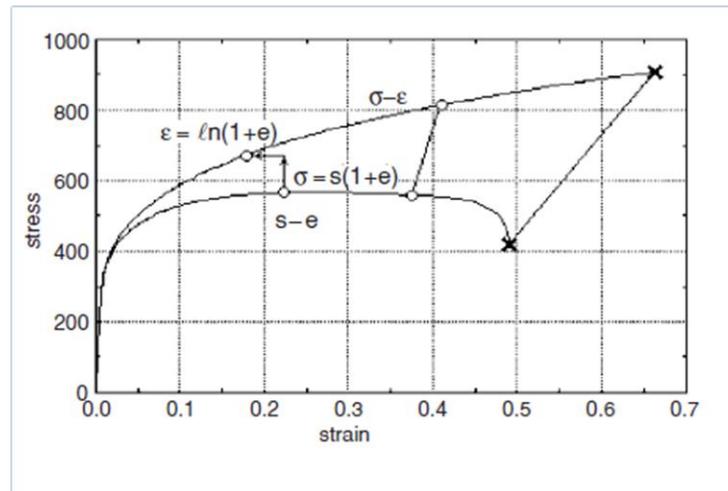


Figura 8 Comparación entre las curvas de esfuerzo-deformación ingenieril y real

Fuente: (Hosford, 2005)

Antes del encuellamiento, un punto de la curva esfuerzo-deformación real ($\sigma - \epsilon$) puede ser construido desde un punto de la curva esfuerzo- deformación ingenieril ($s-e$) con las ecuaciones 9 y 11. Después del encuellamiento, el área de la sección transversal del cuello puede ser medido para encontrar el esfuerzo y deformación real.

2.3.3 CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN

Para construir una curva esfuerzo – deformación ingenieril se toma la curva carga – alargamiento (figura 6b y figura 7) y luego dividir la carga (eje vertical) respecto al área transversal original (A_0), esto se representa en eje vertical; y, el alargamiento (eje horizontal) respecto a la longitud original (l_0), (Kalpakjian, 2008).

En la figura 9 se describe el proceso de construcción de las curvas.

Debido a que estas dos cantidades se dividen entre constantes, la curva esfuerzo-deformación ingenieril obtenida mostrada en la figura 9b, tiene la misma curva carga-alargamiento de la figura 9a.

Las curvas de esfuerzo- deformación real se obtienen de manera similar, dividiendo la carga entre el área transversal instantánea y en el eje horizontal, la deformación verdadera. Esto se muestra en la figura 9c.

Además, es necesario observar la corrección de la curva; ésta refleja que la región del cuello del espécimen está sometida a esfuerzos tridimensionales de tensión; también se observa que la pendiente es positiva lo que indica que el material se está haciendo más fuerte al ser deformado. Este estado da valores de esfuerzo más altos que el esfuerzo real verdadero; de ahí que, para compensar, la curva debe corregirse hacia abajo como se observa en la figura 9c, la misma que debe ser graficada con una función logarítmica – logarítmica como se observa en la figura 9d.

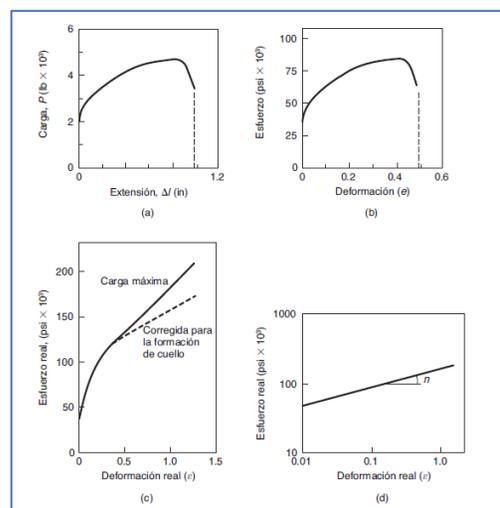


Figura 9 Construcción de los diagramas esfuerzo – deformación

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

Nótese que, al aumentar la tensión, el esfuerzo y la deformación ya no son proporcionales, después que comienza la deformación plástica, la deformación total es la suma de la deformación elástica más la deformación plástica; mas, dado que la deformación plástica es mucho mayor que la elástica, solo se considerará ε como deformación total plástica.

2.3.4 LEY DE POTENCIAS

Existen algunas aproximaciones matemáticas que se pueden utilizar para la curva esfuerzo-deformación real como se muestra en la figura 10.

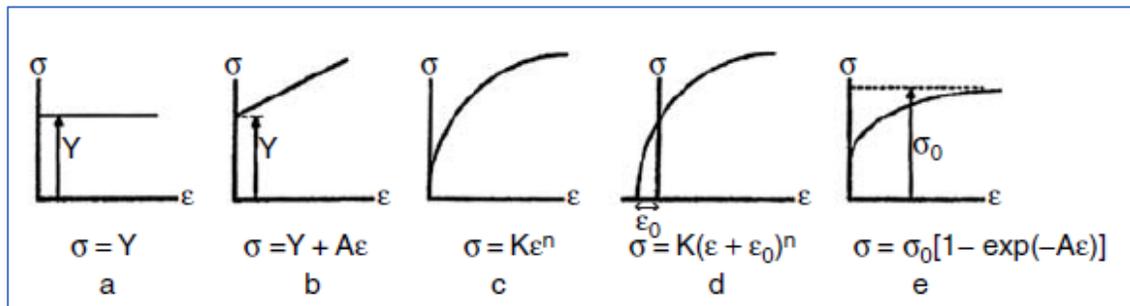


Figura 10 Aproximaciones matemáticas para la curva esfuerzo-deformación real

Fuente: (Hosford, 2005)

Para la figura 9c, se puede utilizar la ley de las potencias que corresponde a la aproximación matemática 10c.

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

Ecuación 12

Donde:

K: coeficiente de resistencia

n: exponente de endurecimiento por deformación (por trabajo)

El rango más común para n está entre 0.1 y 0.6. En la tabla 3 se aprecian algunos valores de K y n para diferentes metales.

Tabla 3

Valores de K y n de algunos metales

Valores característicos para K y n a temperatura ambiente		
	K (Mpa)	n
Aluminio		
1100-O	180	0.20
2024-T4	690	0.16
6061-O	205	0.20
6061-T6	410	0.05
7075-O	400	0.17
Latón		
70-30, recocido	900	0.49
85-15, laminado en frío	580	0.34
Aleación con base cobalto, tratado térmicamente		
	2070	0.50
Cobre recocido		
	315	0.54
Acero		
Bajo carbono recocido	530	0.26
4135 recocido	1015	0.17
4135 laminado en frío	1100	0.14
4340 recocido	640	0.15
Inoxidable 304 recocido	1275	0.45
Inoxidable 410 recocido	960	0.10

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

Por regla general, los materiales de alta resistencia tienen valores n más bajos que los de baja resistencia, por lo tanto, los materiales de menor resistencia tendrán n más altos.

Algunas curvas de esfuerzo-deformación reales para ciertos metales se observan en la figura 11.

El área bajo la curva esfuerzo-deformación real representa la energía por unidad de volumen del material deformado, también llamada energía específica e indica el trabajo necesario para deformar plásticamente una unidad de volumen del material.

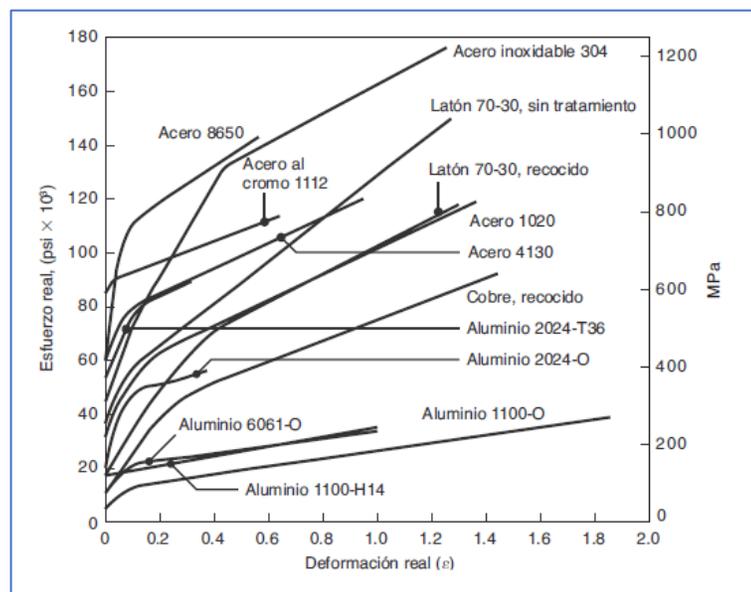


Figura 11 Curvas esfuerzo-deformación reales en tensión a temperatura ambiente

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

El área bajo la curva esfuerzo-deformación real hasta el punto de fractura representa la tenacidad del material es decir la cantidad de energía por unidad de volumen que disipa

el material antes de la fractura. Se debe notar que la tenacidad comprende tanto la altura como el ancho de la gráfica; mientras que la resistencia se relaciona con la altura de la curva y la ductilidad con el ancho de la curva.

2.4 ENSAYOS DE COMPRESIÓN

Existen varios procesos de conformado mecánico como el forjado, laminado y extrusión que se los realiza aplicando cargas compresivas. El realizar un ensayo o prueba de compresión permite obtener las características de potencia para efectuar estos procesos.

Es posible alcanzar valores más altos de esfuerzo al realizar ensayos de compresión; sin embargo, aparecen la fricción y el pandeo que limitan la utilidad del ensayo.

La forma más común de realizar este ensayo es colocando una probeta cilíndrica entre dos matrices planas bien lubricadas. Como consecuencia de la fricción, representado en la figura 12, la probeta cilíndrica se abomba y sufre un abarrilamiento.

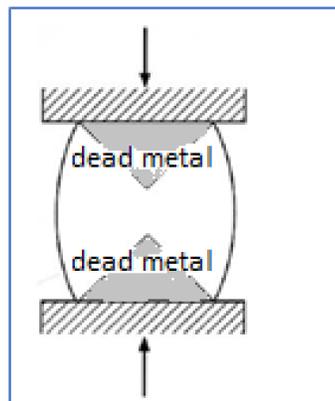


Figura 12 Abarrilamiento de una probeta a compresión

Fuente: (Hosford, 2005)

La fricción impide que las superficies en contacto con las matrices se expandan con libertad, además los elementos esbeltos podrían pandear durante esta prueba, por ello se recomienda que la relación entre la altura y el diámetro de la probeta cilíndrica sea menor que la relación 3:1.

En la figura 13, que se muestra a continuación se puede observar el proceso de la compresión y el efecto de la fricción.

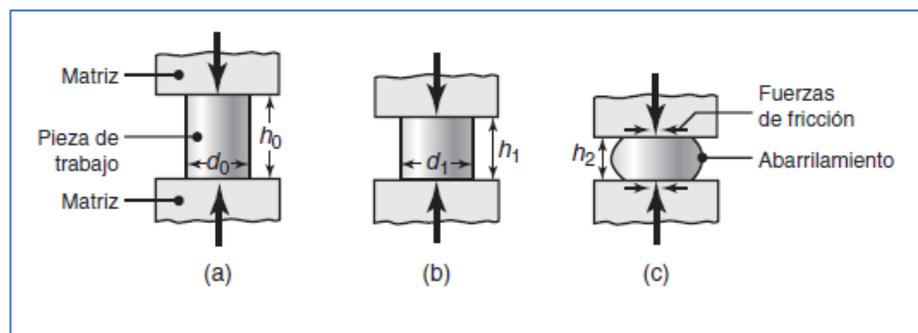


Figura 13 Proceso de compresión y efecto de la fricción

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

Un diagrama esfuerzo-deformación podría resultar difícil obtenerlo a partir de un ensayo de compresión, debido a que la sección transversal de la probeta cambia a lo largo de su altura, siendo máxima en el centro. Nótese que si la fricción disipa energía, la fuerza compresiva debe ser mayor debido a trabajo requerido para superar esta fricción. Mediante la utilización de lubricante es posible minimizar los efectos de la fricción y mantener un área de sección transversal constante durante la prueba.

Las curvas esfuerzo-deformación obtenidos por los ensayos de tracción, suelen coincidir cuando los metales son dúctiles, no así cuando son frágiles.

La curva de tensión-deformación ingenieril en compresión puede predecirse a partir de la curva tensión-deformación real, suponiendo que los valores absolutos de tensión verdadera en tensión y compresión son los mismos a los mismos valores de deformación absoluta como se observa en la figura 14. Las ecuaciones 9 y 11 se aplican, pero hay que recordar que tanto el esfuerzo como la deformación son negativos en la compresión.

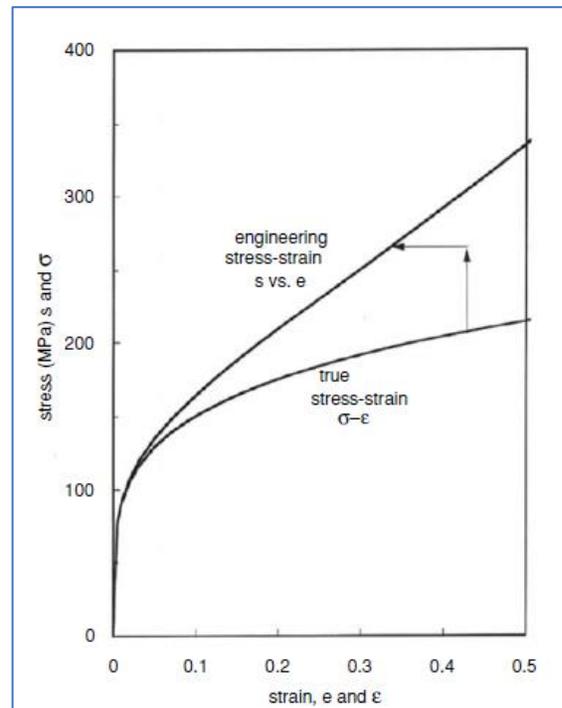


Figura 14 Esfuerzo y deformación en compresión para materiales dúctiles.

Fuente: (Hosford, 2005)

2.5 CRITERIOS DE FRACTURA

Existe una variedad de criterios en estudios científicos para predecir la falla por fractura dúctil en materiales metálicos. A pesar de ello no se dan directrices para los usuarios en cuanto a qué criterio de fractura es adecuado para una aplicación particular

y cómo calibrar un material dado para fractura; para ello, se hacen interesantes observaciones sobre el rango de aplicabilidad y los errores esperados de algunos de los criterios de fractura más comunes (Wierzbicki, 2005).

A lo largo del tiempo se han propuesto varios criterios para describir la fractura dúctil. Estos criterios han sido divididos en dos grupos: los que tienen el enfoque de un modelo acoplado, es decir que el daño influye en las ecuaciones constitutivas y el modelo desacoplado en el cual el daño no es tomado en cuenta en las ecuaciones constitutivas. Los modelos acoplados utilizan simultáneamente para simular el daño debido a la fractura dúctil y a la plasticidad debido al movimiento de las dislocaciones. Los modelos desacoplados en cambio utilizan independientemente estas dos consideraciones (Li, 2011).

El “damage” o daño acumulado que se produce durante la deformación plástica por tracción; muchos materiales sufren daños a nivel microestructural. La velocidad a la que progresa este daño varía mucho con diferentes materiales. Puede ser indicado por una disminución en el endurecimiento por deformación en el ensayo de tracción, pero como la tasa de acumulación de daños depende del estado de tensión en el proceso, los datos de tracción pueden no ser indicativos de daños en otros estados de tensión (Hu, 2002).

Por lo general un criterio de fractura dúctil tiene la forma

$$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} f(\sigma) d\bar{\epsilon} = C^*$$

Ecuación 13

Donde $f(\sigma)$ es una función del estado de esfuerzos, $d\bar{\epsilon}$ es la deformación equivalente, $\bar{\epsilon}_f$ es la deformación a la que se produce la fractura y C^* es una constante del material.

Cuando la integral se iguala a C^* se produce la fractura.

A continuación, se plantean dos criterios de fractura dúctil convencionales (Lou, 2011).

Cockroft y Latham plantea que la fractura está dada por la integral del esfuerzo principal máximo σ^* a la tensión con respecto a la deformación equivalente $\bar{\epsilon}$. Cuando la integral se iguala a la constante C_1 , se produce la fractura.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* d\bar{\epsilon} = C_1 \quad \text{Ecuación 14}$$

En la forma normalizada el criterio de Cockroft y Latham, se desarrolla

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_8 \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde $\bar{\sigma}$ y C_8 representan el esfuerzo equivalente y la constante del material respectivamente.

Oyane plantea la siguiente ecuación:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left(\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} + C_4 \right) d\bar{\epsilon} = C_5 \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde σ_m es el esfuerzo medio y $\bar{\sigma}$, el esfuerzo equivalente, C_4 y C_5 representan las constantes del material. Cuando la integral se iguala a C_5 , se produce la fractura como en el caso anterior.

Existen otros criterios de fractura que se presentan (Wierzbicki, 2005), (Lou, 2011), más para el presente trabajo se presentan los que serán objeto de análisis.

En general desde el punto de vista fenomenológico, a nivel macroscópico se plantea que la fractura de un material se debe principalmente a la historia de la deformación plástica que sufre el material o a la acumulación del daño en un elemento del material.

2.6 EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE FRACTURA

Para la evaluación de la fractura se utilizará software de elementos finitos que permita realizar la simulación de los ensayos de tracción y compresión para determinar el estado de esfuerzos de la probeta y la fractura de esta y que para ello contenga varios criterios de fractura para su evaluación.

En (Wierzbicki, 2005) se evalúan siete criterios de fractura para una aleación de aluminio a los cuales le adiciona el de Cockroft y Latham por ser un criterio que también considera la triaxialidad del esfuerzo. En la figura 15 se visualiza las probetas utilizadas para los ensayos.

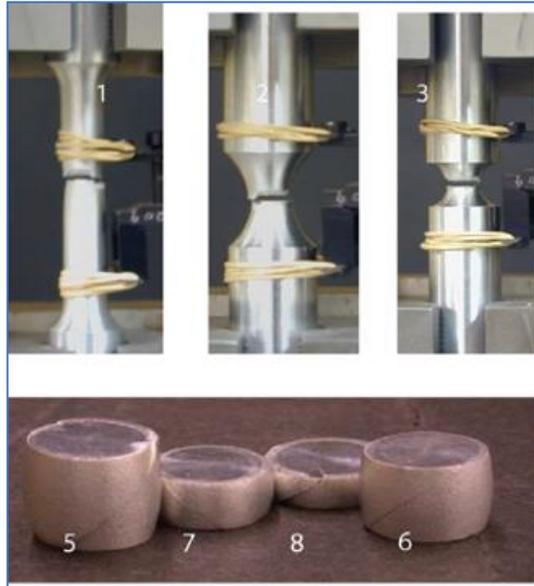


Figura 15 Probetas de ensayos para la evaluación de los ocho criterios de fractura

Fuente: (Wierzbicki, 2005)

En este estudio utiliza el sistema de coordenadas con la deformación equivalente en el eje vertical y como horizontal la triaxialidad del esfuerzo, que para el criterio de Cockroft y Latham utiliza la relación analítica en el sitio de la fractura:

$$\bar{\epsilon}_f = \frac{c_8}{\sqrt{3}} \frac{3\eta + \sqrt{12 - 27\eta^2}}{2(1 + \eta\sqrt{12 - 27\eta^2})} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde $\bar{\epsilon}_f, \eta$ representan la deformación equivalente y la triaxialidad del esfuerzo.

Dentro de los análisis realizados se establece que el criterio de Cockroft y Latham es aplicable para rangos en los cuales la triaxialidad es negativa.

Se presenta el criterio normalizado de la forma:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_{\theta\theta}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = \frac{4}{3} C_8 \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde $\sigma_{\theta\theta}$ es el esfuerzo en la zona ecuatorial del cilindro sometido a compresión.

En la figura 16 se presenta el lugar geométrico de este criterio.

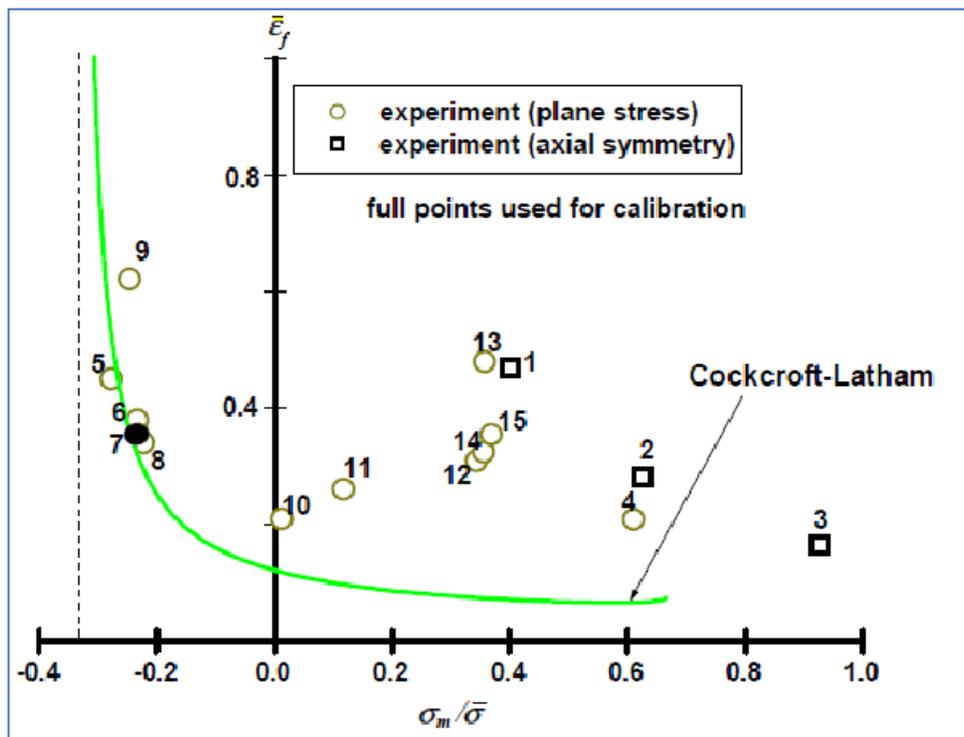


Figura 16 Comparación de Cockcroft y Latham con los puntos experimentales

Fuente: (Wierzbicki, 2005)

También es conveniente observar en la figura 17 cómo los criterios de fractura utilizados en el citado estudio se ajustan a 12 puntos obtenidos experimentalmente en

muestras del aluminio 2024-T351. Nótese que cada criterio se ajusta de mayor o menor forma según el lugar geométrico de incidencia.

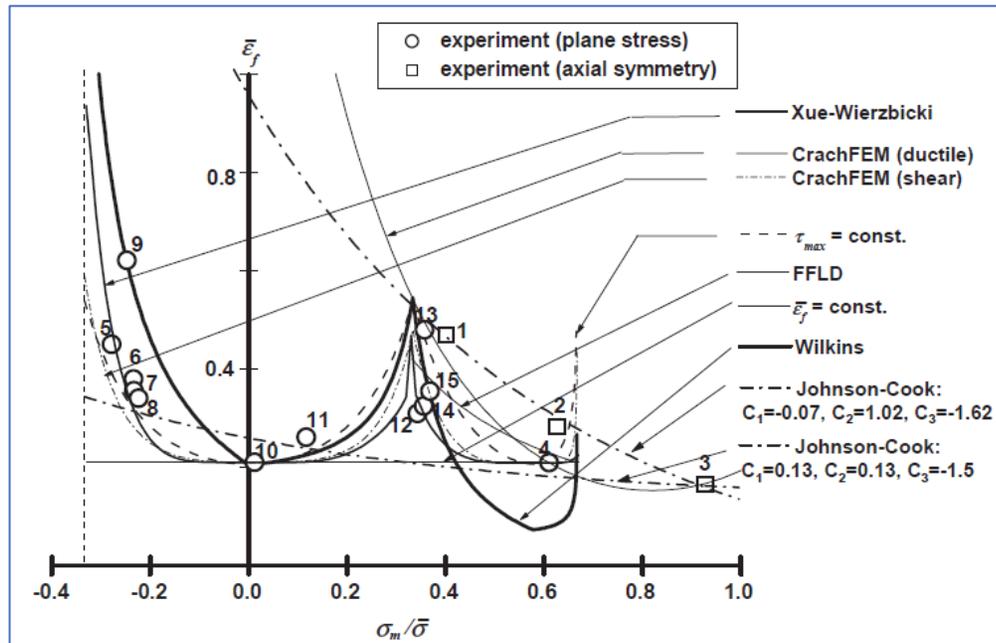


Figura 17 Comparación de la predicción de los siete criterios de fractura

Fuente: (Wierzbicki, 2005)

Según (Li, 2011) para crear diversos estados de tensión y deformación y modos de fractura, se generan diferentes escenarios de deformación usando ensayos de tracción y compresión de la aleación de Aluminio 6061 (T6) con diferentes geometrías de muestra y dimensiones.

En la figura 18 se observan las probetas utilizadas para tracción, la primera es lisa y las otras dos están marcadas en su región central.

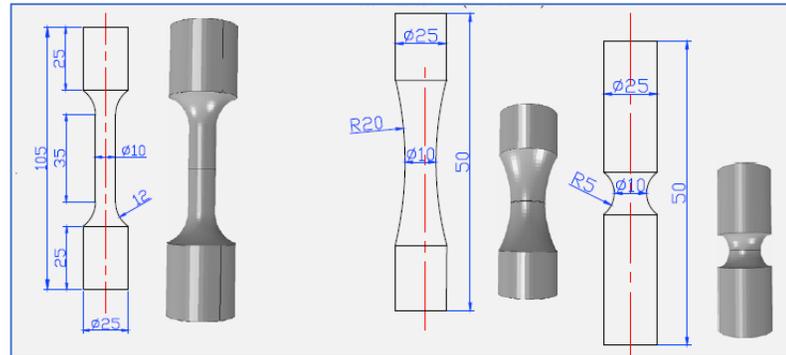


Figura 18 Probetas para la tracción

Fuente: (Li, 2011)

En la figura 19 se observan las probetas luego de haberlas sometidas a la compresión. La figura a) muestra cilindros con relación $H/D=2$, y la b), cilindros con relación $H/D=1$.

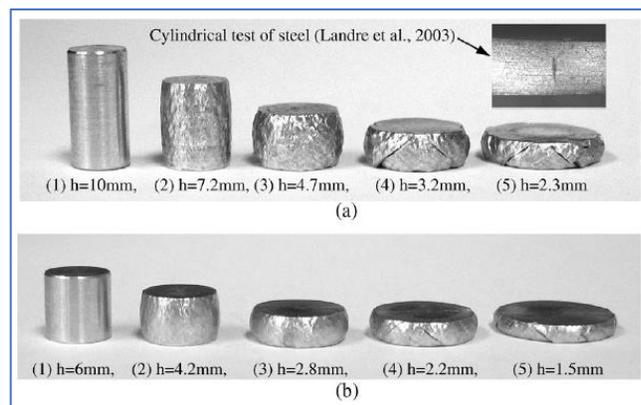


Figura 19 Fractura de las probetas a compresión

Fuente: (Li, 2011)

Realiza en análisis de nueve criterios de fractura convencionales, entre ellos los de Cockroft y Latham y de Oyane.

La caracterización del material y la calibración del proceso lo hace graficando el daño acumulado como ordenada, y como abscisa la deformación verdadera como en la figura 20, para ello parte de la ecuación.

$$D = k\varepsilon + d$$

Ecuación 19

El daño acumulado D , se lo calcula mediante:

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde E es el módulo de Young del material sin deformar y \tilde{E} es el módulo de Young del material deformado

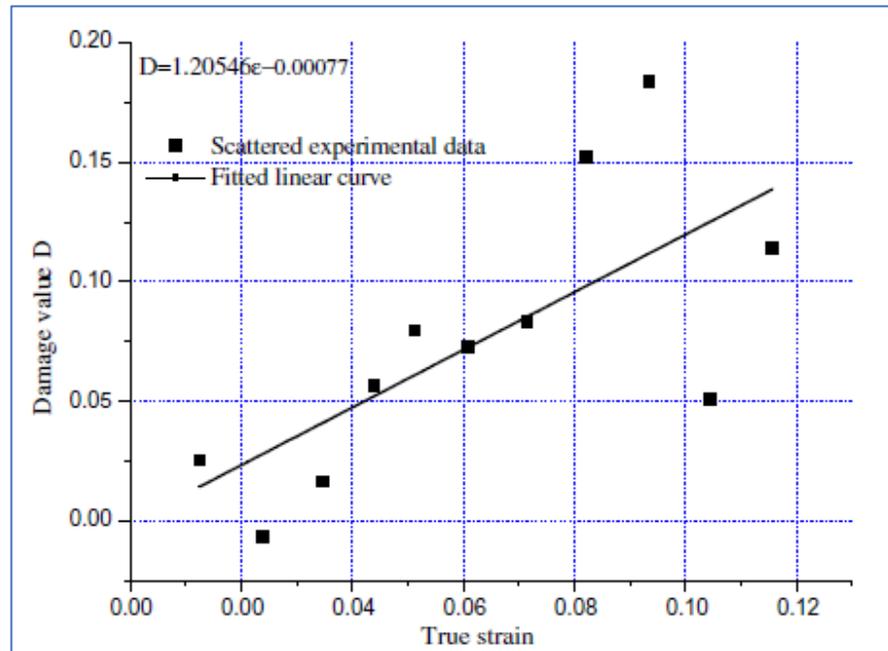


Figura 20 Relación entre el daño acumulado y la deformación

Fuente: (Li, 2011)

Al realizar la evaluación se puede visualizar como el valor del daño del material aumenta progresivamente con la deformación plástica equivalente, esto coincide con el hecho de que la probabilidad de la fractura aumenta con la deformación plástica como se muestra en la figura 21. Además, según el criterio de Oyane el daño crece más rápidamente que según Cockroft y Latham. Este análisis se lo hace en un cilindro $H/D=1$.

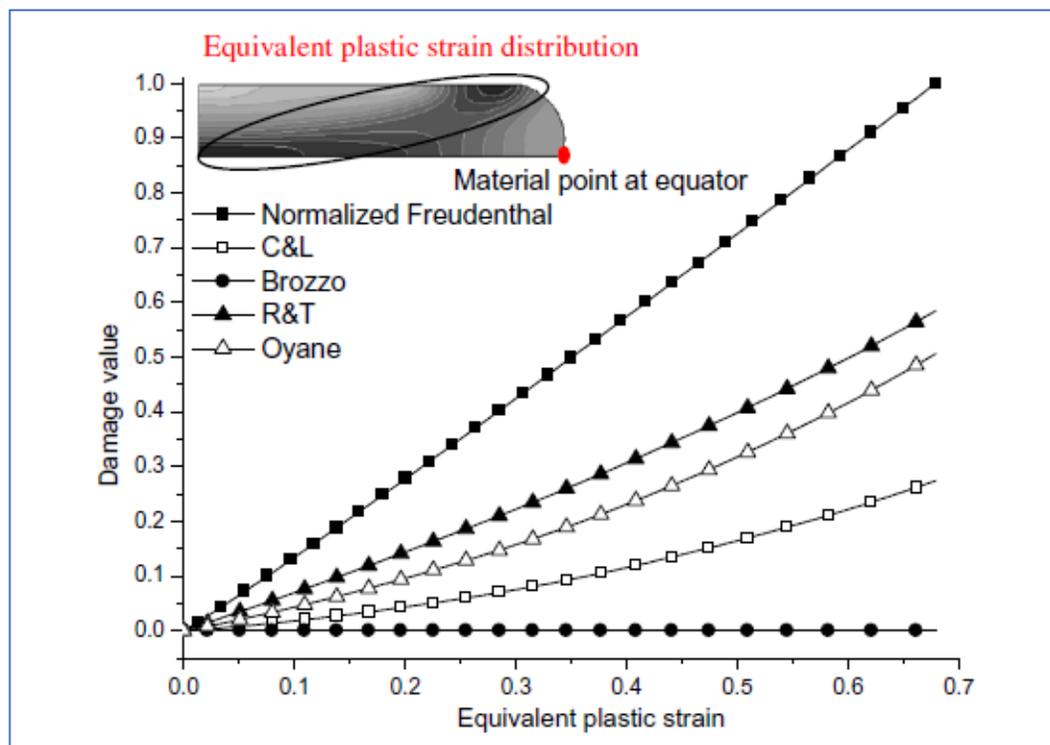


Figura 21 Valores del daño en la zona ecuatorial versus deformación plástica

Fuente: (Li, 2011)

CAPÍTULO III

3. EXPERIMENTACIÓN

En el presente capítulo se describe los ensayos de tracción y compresión para los dos materiales propuestos. Se trata: materiales, análisis químico y metalográfico, probetas, equipo utilizado, procedimiento experimental, los resultados con los diagramas de esfuerzo y deformación y la morfología de la fractura.

3.1 MATERIALES

Los materiales usados para la elaboración de las probetas son duraluminio y acero inoxidable y fueron adquiridos en el medio local, en forma de barra cilíndrica de 20mm y de 19.1mm respectivamente, que según el proveedor corresponde a un aluminio AW 7021 y un acero inoxidable AISI 304, en el Anexo 1 se presenta las características técnicas.

3.1.1 ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis químico se lo realizó por espectrometría de chispa utilizando un espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION de la Escuela Politécnica Nacional. En la

tabla 4 se presentan los resultados que son el promedio de 3 mediciones por muestra.

Los reportes constan en el Anexo 2.

Tabla 4

Composición química del Acero inoxidable AISI 304 y el Duraluminio

Muestra			
M.Acero inox. AISI 304		M. Duraluminio	
Componente	Valor [%]	Componente	Valor [%]
Carbono [C]	0,097	Silicio [Si]	0,102
Silicio [Si]	0,522	Hierro [Fe]	0,215
Manganeso [Mn]	1,435	Cobre [Cu]	2,057
Fósforo [P]	0,053	Manganeso [Mn]	0,091
Azufre [S]	0,006	Magnesio [Mg]	2,225
Cromo [Cr]	12,79	Cromo [Cr]	0,145
Molibdeno [Mo]	0,081	Níquel [Ni]	<0,0050
Níquel [Ni]	9,346	Zinc {zn}	5,743
Cobre [Cu]	0,150	Titanio [Ti]	0,055
Aluminio [Al]	0,010	Plomo [Pb]	<0,0050
Cobalto [Co]	0,335	Aluminio [Al]	89,36
Niobio [Nb]	<0,010		
Titanio [Ti]	0,0037		
Vanadio [V]	0,029		
Hierro [Fe]	75,15		

Los elementos químicos principales de las aleaciones son:

ACERO INOXIDABLE: % C 0.097 Si0.522 Mn1.435 Cr12.79 Ni9.346

DURALUMINIO: %Al89.36 Zn5.743 Mg2.225 Cu2.057 Fe0.215 Cr0.145

Al ser comparados con los valores de bibliografía que se analiza más adelante en el capítulo cinco, se confirman que están químicamente dentro del grupo de los materiales propuestos.

3.1.2 ANÁLISIS METALGRÁFICO

Se realiza el análisis metalográfico del duraluminio y el acero inoxidable en la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE para determinar la microestructura presente en las dos aleaciones.

3.1.2.1 DURALUMINIO

La aleación de duraluminio se atacó con el reactivo compuesto por 2 ml HF, 3 ml HCl, 5ml HNO₃, 190 ml H₂O, durante 60 segundos después del pulido con alúmina de 1 micra. En La microestructura de la figura 22 se observa una estructura dendrítica que corresponde a la precipitación del Al-Cr-Mn, visible en las partes oscuras de la matriz.

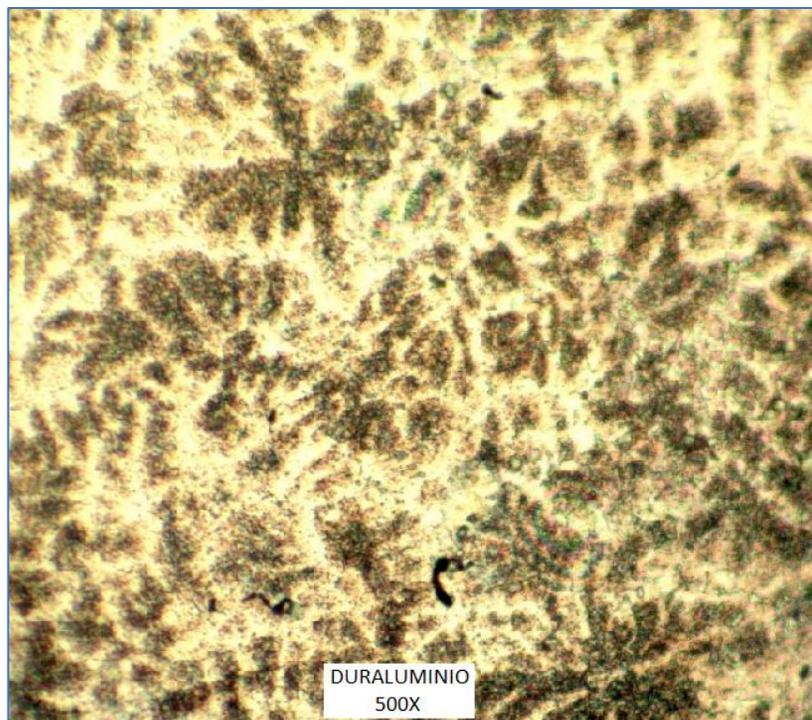


Figura 22 Microestructura del duraluminio

3.1.2.2 ACERO INOXIDABLE

La aleación de acero inoxidable se atacó con el reactivo compuesto por 5 ml HCl, 1 gr. ácido pícrico, 100 ml etanol al 95%, durante 3 minutos después del pulido con alúmina de 1 micra.

En la figura 23 es visible una microestructura compuesta por granos austeníticos equiaxiales muy definidos y también posee pequeñas picaduras que responderían al ataque químico realizado. La observación está realizada a 500X de ampliación.

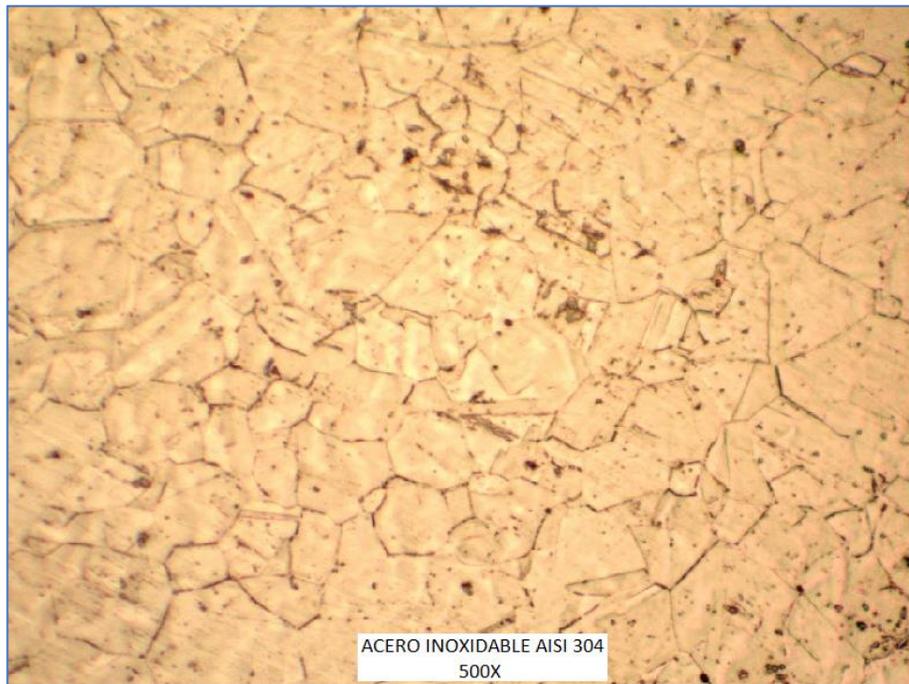


Figura 23 Microestructura del acero inoxidable

Para los dos materiales las microestructuras observadas concuerdan con la bibliografía.

3.2 PROBETAS

En la tabla 5 se describe el total de probetas a construirse, distribuidas según el tipo de ensayo que se realice de los dos materiales.

Tabla 5
Cantidad de probetas a ensayarse

NÚMERO DE PROBETAS	DURALUMINIO	ACERO INOX.	Total parcial
	Unidades	Unidades	Unidades
Tracción (Caracterización)	3	3	6
Tracción (Diagramas esfuerzo - deformación real)	4	3	7
Compresión (Diagramas carga - desplazamiento)	2	2	4
Análisis químico	1	1	2
Metalografía	1	1	2
TOTAL	11	10	21

Para tracción se utilizan dos tipos de probetas, para caracterizar el material se lo hace en una máquina de ensayos con mordazas roscadas y para determinar los diagramas de esfuerzo y deformación real se lo hace en otra máquina con mordazas rugosas. En la figura 24 se observa las probetas para tracción construidas bajo la norma AISI E8.

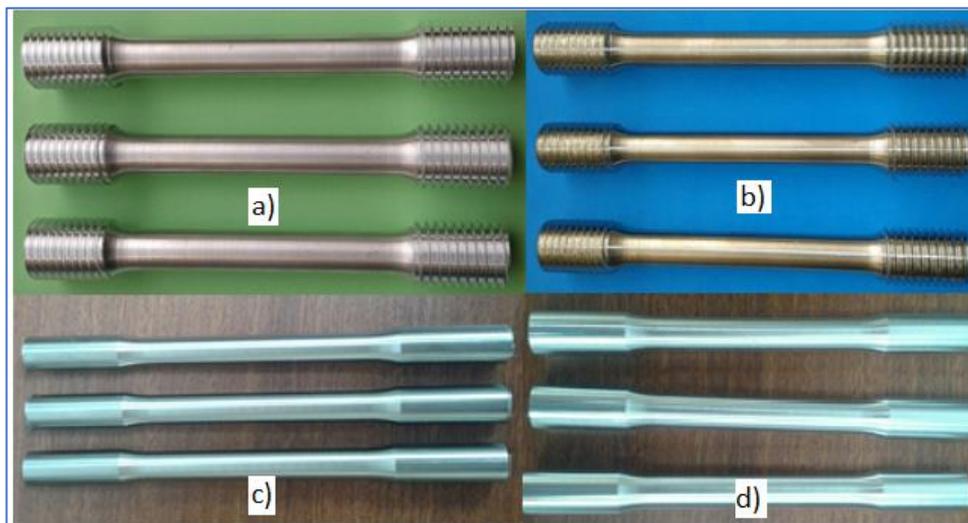


Figura 24 Probetas tracción: a) y c) duraluminio y b) y d) acero inoxidable AISI 304

En la figura 25 se aprecian las probetas para compresión con diferentes relaciones de diámetro y altura.



Figura 25 Probetas para compresión de duraluminio y acero inoxidable.

Las dimensiones de las probetas son:

Duraluminio: Diámetro 14 mm Altura 16 mm

Acero inoxidable: Diámetro 14 mm Altura 16 mm

Las probetas para análisis químico y metalografía son similares a las de compresión.

Para la morfología de la fractura se extraen 3 segmentos de las probetas fracturadas para observación: 1 de tracción del duraluminio, 1 de tracción del acero inoxidable y 1 de compresión del duraluminio.

3.3 EQUIPO PARA LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN.

La experimentación se realiza en tres máquinas de ensayos universales disponibles en la Escuela Politécnica Nacional, Universidad Politécnica Salesiana y Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE respectivamente con las siguientes características.

- Tinius Olsen Super L-120 Capacidad: 120.000 lbf (533.786 N)
- Testresources Capacidad: 33.750 lbf (150.000 N)
- Amsler MRM – 29 Capacidad: 200 Ton. (Compresión)

En la figura 26 se muestran según el orden siguiente las máquinas a utilizarse.



Figura 26 Máquinas universales de ensayos

Para los ensayos de tracción y compresión se observa en la figura 27 las mordazas y platos respectivos.



Figura 27 Mordazas utilizadas para tracción y compresión

Además se dispone de extensómetros, mostrados en la figura 28, para los ensayos de tracción:

- Tinius Olsen: Longitud calibrada: 50 mm Elongación: 20% (10 mm)
- Epsilon: Longitud calibrada: 50 mm Elongación: 25% (12.5 mm)

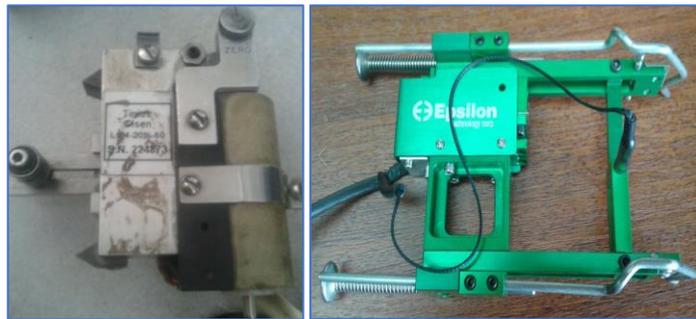


Figura 28 Extensómetros

3.4 PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN

En forma general el ensayo de tracción se desarrolla en los siguientes pasos:

- Realizar el montaje de las mordazas de tracción en la máquina de ensayos.
- Ubicar y sujetar con las mordazas la probeta para tracción.
- Se ubica el extensómetro en los casos que se quiera determinar las propiedades mecánicas del material a ensayarse.
- Se somete a las probetas a la aplicación de la carga hasta llegar a la rotura
- Se obtiene los datos y la gráficas del computador de la máquina para realizar el posterior procesamiento y análisis.

Para los ensayos de compresión se procede de la siguiente manera:

- Realizar el montaje de los platos para la compresión
- Colocar teflón como lubricante en los extremos de las probetas

- Ubicar las probetas entre los platos
- Se aplica la carga hasta llegar a la rotura
- Se obtiene los datos y las gráficas del computador de la máquina universal.

3.5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

Se presenta los resultados de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas, los diagramas generados por el software y la construcción de la curva Esfuerzo – Deformación real y su aproximación para cada material.

3.5.1. PROPIEDADES MECÁNICAS

En la tabla 6 se presenta las propiedades mecánicas obtenidas por el ensayo de tracción y en el Anexo 3, se adjunta el informe técnico respectivo.

Tabla 6

Propiedades mecánicas del duraluminio y el acero inoxidable AISI 304

ID	Diám. prom.	Carga máx. registrada		Límites fluencia		Resist. a tracción		% Elong.	Mód. Elast.
	mm	lbf	N	ksi	Mpa	ksi	Mpa	en 50 mm	Mpa
D T-1	12,45	18075	80400	88,5	610	95,8	660	8,4	73305
D T-2	12,44	18075	80400	88,8	612	95,9	661	8,7	72791
D T-3	12,49	18142	80700	88,2	608	95,5	659	8,3	74643
AIT-1	12,58	19828	88200	50,2	346	102,9	709	61,2	194685
AIT-2	12,74	20615	91700	46,3	319	104,3	719	62	197015
AIT-3	12,47	19738	87800	45,1	311	104,3	719	62,2	190306

La identificación (ID) es asignada por el material y número de probetas utilizadas para los ensayos, el primer grupo es duraluminio (D T) y el segundo, acero inoxidable (AIT).

3.5.2 DIAGRAMAS GENERADOS POR EL SOFTWARE DE LA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS TESTRESOURCES

Al realizar los ensayos de tracción, el software incorporado a la máquina universal genera las gráficas de carga y desplazamiento como también los de esfuerzo y deformación observados en las figuras 29 y 30. Además proporciona los datos necesarios para la elaboración de los respectivos diagramas.

En el Anexo 4 se presentan los datos representativos que entrega el software de la máquina universal, y el procesamiento que se dan a estos para hallar los diagramas.

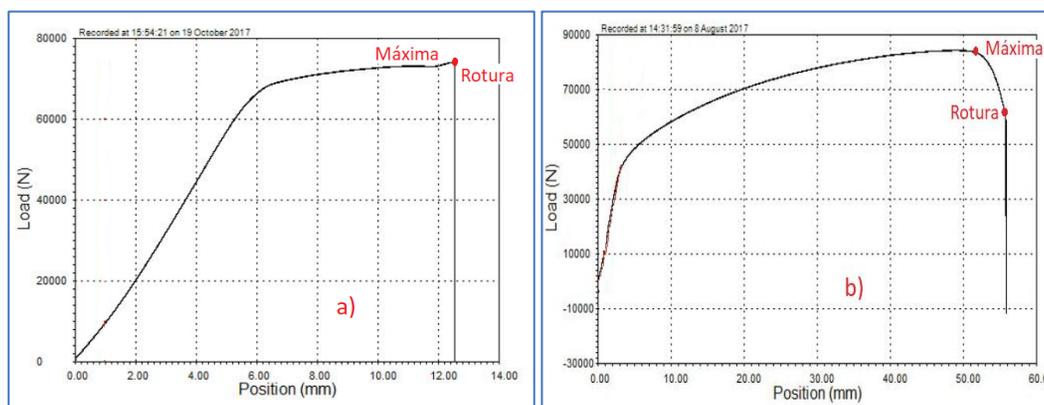


Figura 29 Carga y posición del software. a) Duraluminio. b) Acero inoxidable

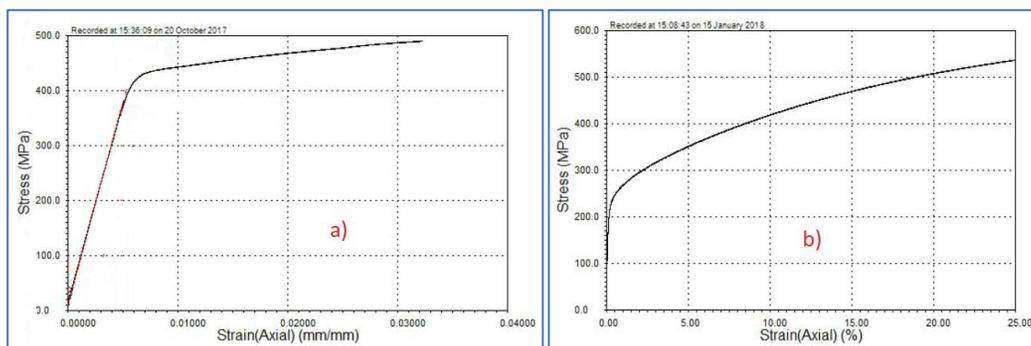


Figura 30 Esfuerzo y deformación del software. a) Duraluminio. b) Acero inoxidable

3.5.3 DETERMINACIÓN DE LA CURVA REAL Y LA LEY DE APROXIMACIÓN DEL DURALUMINIO

Para la construcción de los diagramas del duraluminio se procesan los datos de un ensayo realizado con extensómetro, en el cual es posible disponer los valores de carga y desplazamiento desde el inicio hasta la rotura de la probeta, adicionalmente uniendo las dos partes de la probeta se puede hallar su desplazamiento máximo. Se presentan los resultados de 4 probetas, 2 de las cuales se ensayan considerando el desplazamiento del pistón que permitirán obtener valores de carga máxima y de rotura y 2 probetas se ensayan con extensómetro que proporcionan la información para construir los diagramas reales.

Se procesan los datos de carga y desplazamiento del ensayo número 4 hasta los valores de carga máxima, esto se lo hace con la finalidad de encontrar una aproximación matemática que se ajuste de mejor manera al ensayo. A continuación se procede a realizar los diagramas carga y desplazamiento según se observa en la figura 31.

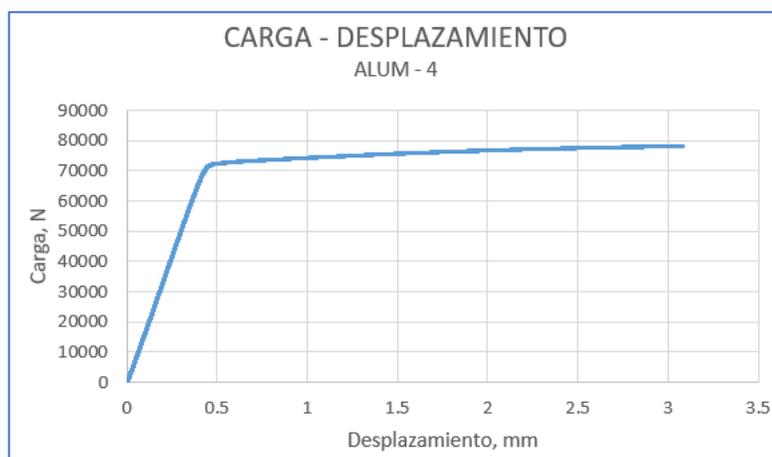


Figura 31 Diagrama carga – desplazamiento del duraluminio

El diagrama esfuerzo y deformación ingenieril se construye a partir de la geometría de la probeta como se lo observa en la tabla 7 y también de los datos carga y desplazamiento obtenidos en el ensayo.

Tabla 7

Geometría de la probeta de duraluminio para tracción

Probeta	ALUM - 4
Lo (mm)	50
do (mm)	12.44
Ao (mm ²)	121.50
Aolo	6075.24

A continuación se determina la longitud instantánea que es igual a la longitud inicial más el desplazamiento utilizando la constancia del volumen y con ello se determina el esfuerzo y la deformación ingenieril con las relaciones establecidas en la tabla 8.

Tabla 8

Relaciones utilizadas para construir el diagrama ingenieril del duraluminio

DIAGRAMA INGENIERIL			
Carga (N)	desplaz. (mm)	Esfuerzo Ing. (Mpa)	Deformación Ing.
		Carga / Ao	desplaz / 50

Para el diagrama esfuerzo y deformación real, primero se encuentra la longitud instantánea que es la longitud inicial más el desplazamiento, luego aplicando la constancia del volumen se encuentra el área instantánea. Para encontrar el esfuerzo real se divide la carga para el área instantánea y para la deformación real se lo hace con el logaritmo natural de la longitud instantánea dividido para la longitud inicial de la probeta.

Las relaciones utilizadas para la elaboración del diagrama esfuerzo y deformación real se encuentran en la tabla 9.

Tabla 9

Relaciones utilizadas para construir el diagrama real del duraluminio

DIAGRAMA REAL					
Carga (N)	desplaz. (mm)	longitud instantánea	Area. Instant.	Esfuerzo Real (Mpa)	Deformación Real
		Lo + desplaz.	Aolo / long. Instant	Carga / Area Instant	LN(long. Instant./ 50)

Los dos diagramas se presentan en la figura 32. Nótese que en la zona elástica los dos diagramas coinciden plenamente.

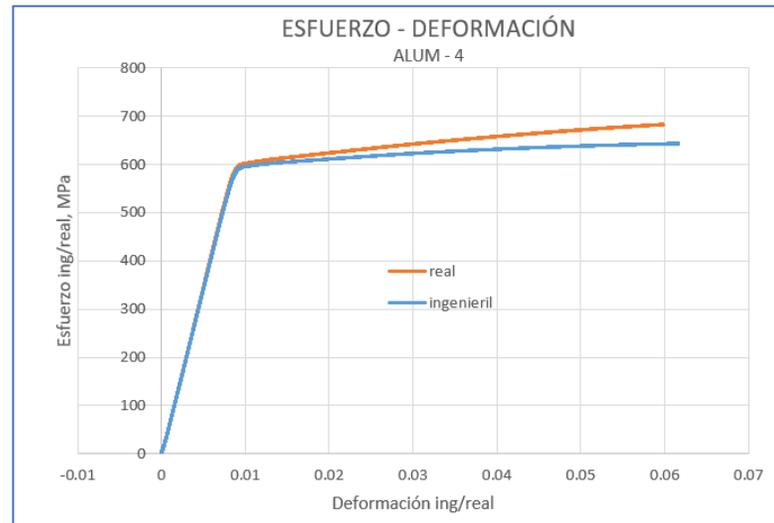


Figura 32 Diagrama esfuerzo – deformación ingenieril y real del duraluminio

Para establecer el comportamiento matemático del diagrama esfuerzo y deformación real, necesario para la simulación del ensayo, se realiza la aproximación matemática, se plantean dos opciones, la primera es aproximándola a una recta y la segunda a la ley de potencias o potencial como se advierte en la figura 33.

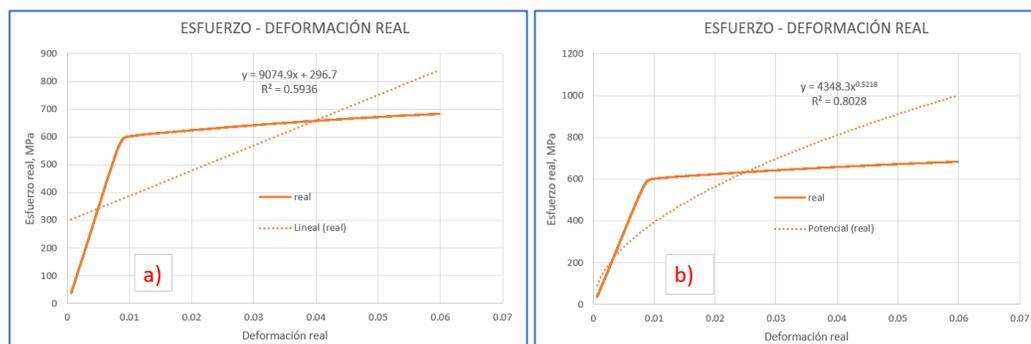


Figura 33 Aproximaciones matemáticas para el duraluminio. a) lineal. b) potencial

Las aproximaciones matemáticas no se ajustan adecuadamente a la curva real, por lo que se procede a construir el diagrama real con los datos comprendidos entre la etapa final de la zona elástica y los de la fractura del material.

En la figura 34 se realiza la aproximación con una función lineal y en la figura 35, se lo hace con la ley de potencias.

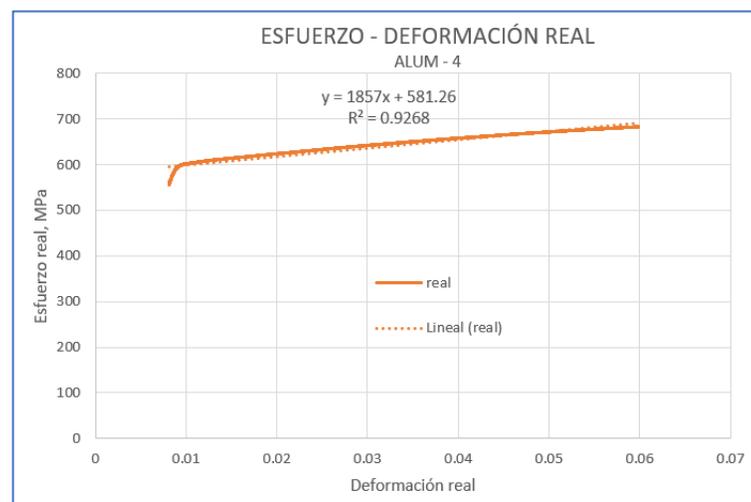


Figura 34 Aproximación lineal para el esfuerzo – deformación real del duraluminio

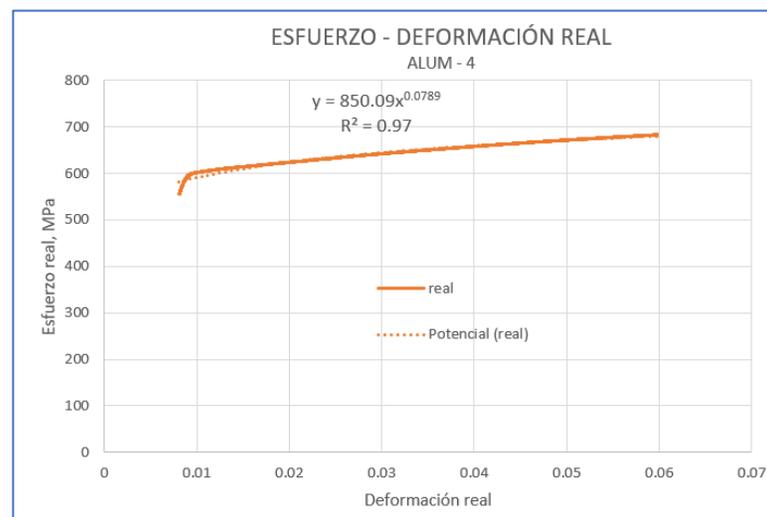


Figura 35 Aprox. potencial para el esfuerzo – deformación real del duraluminio.

Observando el valor de R^2 de los dos ajustes, resulta que la aproximación potencial es mejor.

En la tabla 10 se representa el error generado por la aproximación matemática potencial entre los esfuerzos máximos.

Tabla 10

Error de aproximación para el duraluminio

DURALUMINIO		
Esf. Real máx	Esf. Aprox. máx	error
Mpa	Mpa	%
682.7	680.7	0.3

De los dos análisis se concluye que el diagrama real se ajusta adecuadamente a ley de potencias. Por lo tanto la función a ingresarse a la simulación es:

$$\sigma = 850.09\varepsilon^{0.0789} \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 21}$$

Es decir, para el duraluminio:

Coefficiente de resistencia, $K = 850.09 \text{ MPa}$

Exponente de endurecimiento, $n = 0.0789$

Se presenta a continuación la gráfica en la figura 36 que resume los diagramas ingenieril, real y la función matemática que tiene la mejor aproximación al diagrama real.

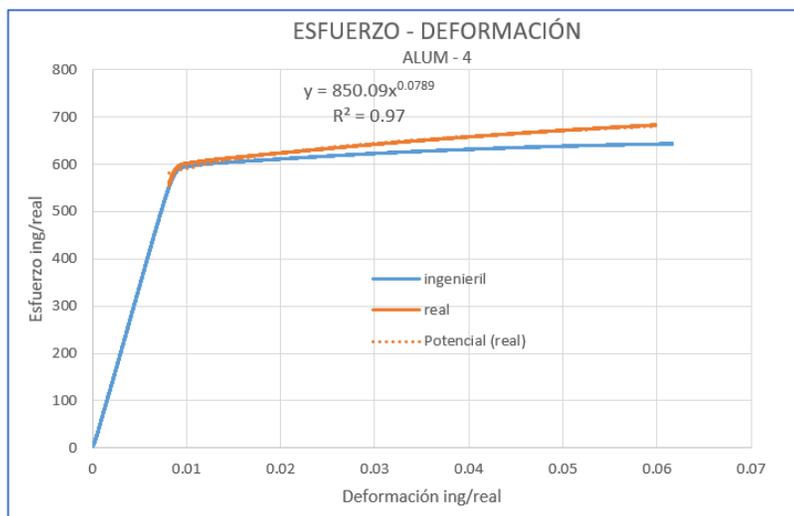


Figura 36 Diagramas ingenieril, real y curva de aproximación para el duraluminio

Ahora se presenta la tabla 11 con los ensayos realizados, en donde se muestra las características mecánicas y geométricas como resultado de los ensayos realizados.

Tabla 11

Resultados experimentales del duraluminio a tracción

ID	Diám. Prom.	Carga máx.	Carga rotura	Despl. Máx	k	n	R2*	Observación
	mm	N	N	mm	Mpa			
ALUM - 1	12.54	71894	70100	13.33				Despl. Pistón
ALUM - 2	12.54	72253	70800	13.23				Despl. Pistón
ALUM - 3	12.51	67726	67185	4.13	735.38	0.0848	0.976	Extensómetro
ALUM - 4	12.44	78234	78133	3.85	850.09	0.0798	0.97	Extensómetro

R2* representa la calidad del ajuste

Debe aclararse que se realiza el análisis y posterior simulación del ensayo 4, su selección se debe a que se lo hace con extensómetro que proporciona datos desde el inicio hasta el final del ensayo; y debido a que las condiciones de la experimentación son mejores que el ensayo 3, fue realizada en fechas posteriores tomando precauciones mayores en la manipulación de la máquina, probeta y extensómetro.

3.5.4 DETERMINACIÓN DE LA CURVA Y LA LEY DE APROXIMACIÓN DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304

El acero inoxidable es un material muy dúctil, y al hacer el ensayo de tracción utilizando extensómetro, se consigue datos hasta el 25% de la elongación de material, luego de ello se retira el extensómetro y se carga a la probeta hasta llegar a la fractura, con esto se puede obtener el valor de la carga de fractura en los datos de la máquina de ensayos; y, realizando mediciones con calibrador se obtiene la longitud final uniendo las dos partes de la probeta fracturada y el área final, con lo cual se tiene la información de la fractura del acero inoxidable.

Se presentan los resultados de 3 probetas, la primera ensayada con el desplazamiento del pistón que permite obtener valores de carga máxima y de fractura y las otras 2 probetas cuyos datos proporcionan la información para construir los diagramas reales.

Ahora se obtiene el gráfico carga y desplazamiento del ensayo 2 en la figura 37 obtenido con extensómetro con datos del 25% de elongación y los valores de la fractura. La línea de segmentos representa la unión del dato final entregado por la máquina de ensayos utilizando el extensómetro y el punto de la rotura con su respectivo desplazamiento medido al final del ensayo.

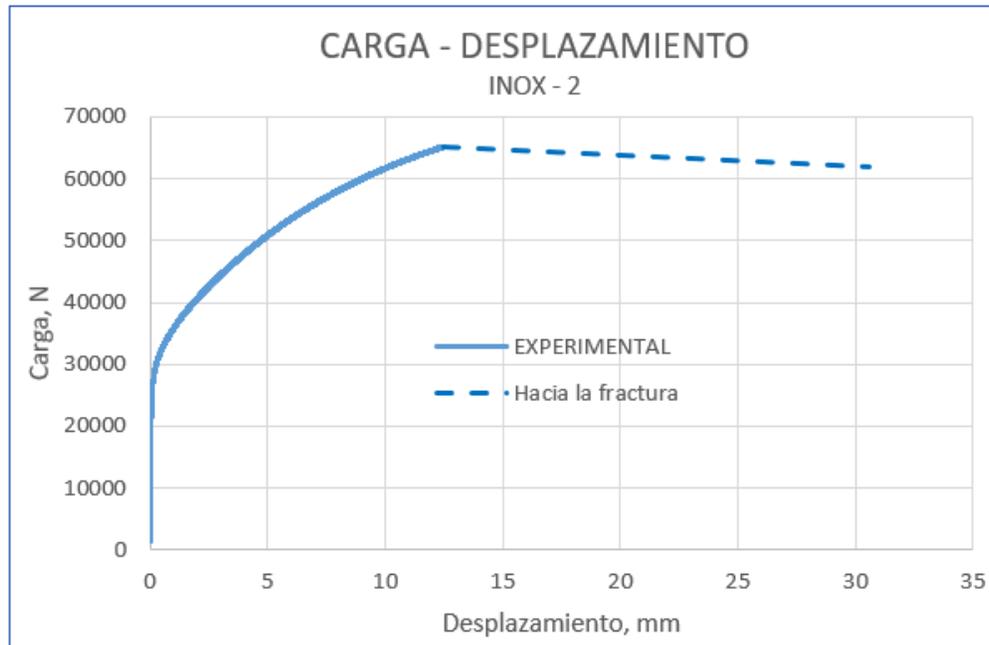


Figura 37 Diagrama carga – desplazamiento del acero inoxidable AISI 304

Se construye los diagramas de esfuerzo y deformación tanto ingenieril como real observados en la figura 38, con el mismo procedimiento explicado anteriormente para el duraluminio, y se realiza la aproximación matemática en el diagrama real en la figura 39, para ello se restringe una parte de los datos de la zona elástica. Se debe destacar que a diferencia con el duraluminio, el mejor ajuste de la curva es proporcionado por la función lineal.

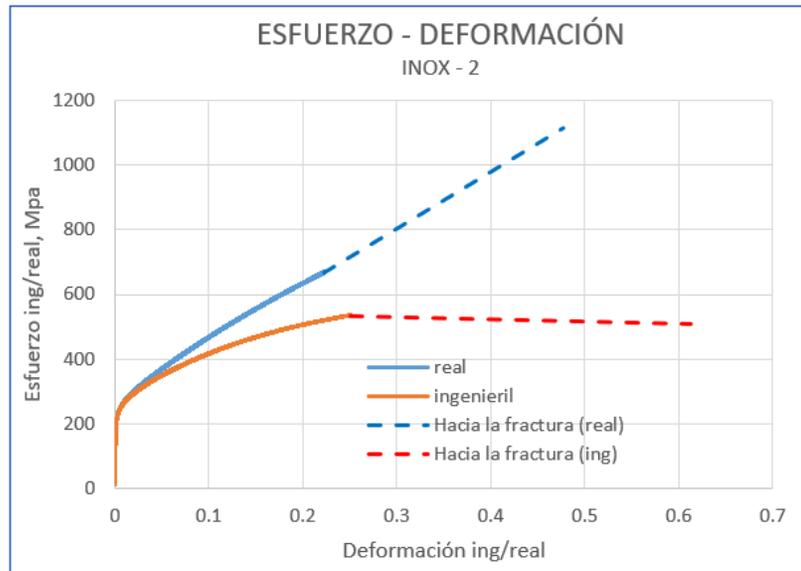


Figura 38 Esfuerzo – deformación real e ingenieril del acero inoxidable

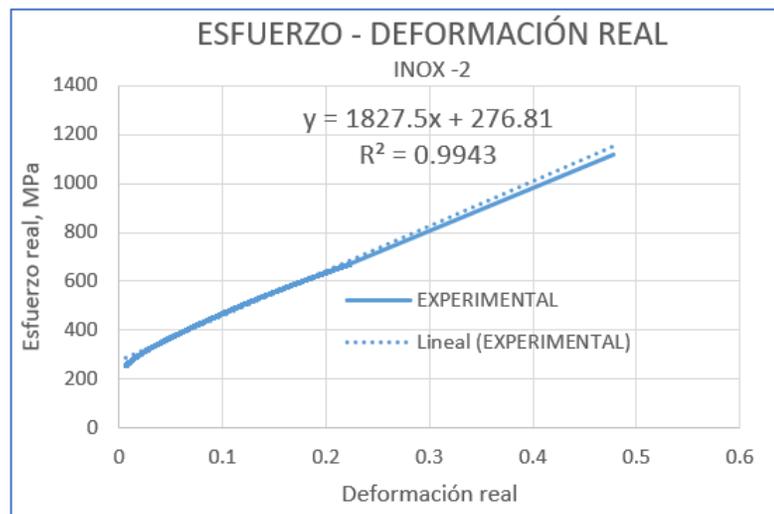


Figura 39 Aproximación lineal del esfuerzo – deformación real del acero inoxidable

En la tabla 12 se representa el error generado por la aproximación matemática entre los esfuerzos máximos para el acero inoxidable.

Tabla 12*Error de aproximación para el acero inoxidable*

ACERO INOXIDABLE		
Esf. Real máx	Esf. Aprox. máx	error
Mpa	Mpa	%
1117.3	1149.4	-2.9

Se concluye que el diagrama real se ajusta a la función lineal, por lo tanto la función a ingresarse a la simulación es:

$$\sigma = 1827.5\varepsilon + 276.81 \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 22}$$

Se presenta en la tabla 13 los resultados para el acero inoxidable, en donde se muestra las características mecánicas y geométricas como resultado de los ensayos realizados.

Tabla 13*Resultados experimentales del acero inoxidable AISI 304*

ID	Diám. Prom.	Carga max	Carga rotura	Despl. Máx	m	b	R2*	Observación
	mm	N	N	mm	Mpa	MPa		
INOX - 1	12.6	84159	57781	55.91				Despl. Pistón
INOX - 2	12.45	72954	61918	80.6	1827.5	276.81	0.9943	Extensómetro
INOX - 3	12.47	80796	55451	80.9	1867.5	364.93	0.9955	Extensómetro

R2* representa la calidad del ajuste

Se selecciona el ensayo 2 para el análisis y posterior simulación porque la curva tiene un mejor ajuste en el diagrama esfuerzo deformación real en la fractura que en el ensayo 3 como se lo observa en la figura 40.

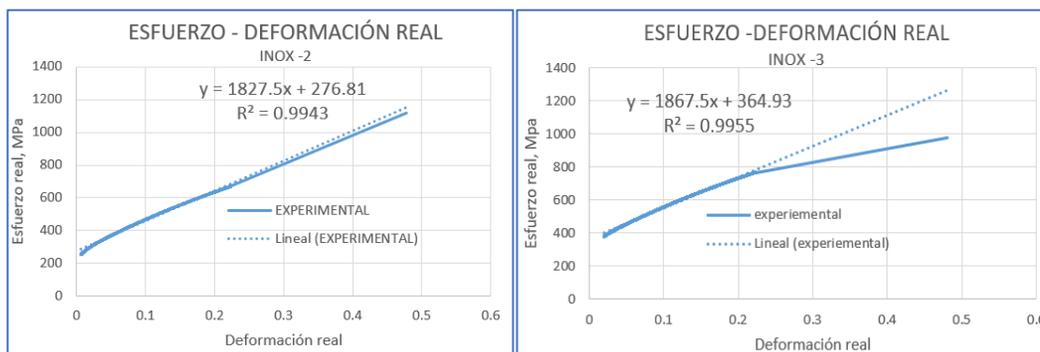


Figura 40 Esfuerzo – deformación real de los ensayos 2 y 3 del acero inoxidable

3.6 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN

Se ensayaron 4 probetas, dos para duraluminio y dos para acero inoxidable. En estos ensayos se considera los datos de carga y desplazamiento del pistón aplicadas a las probetas de las dimensiones especificadas.

En el Anexo 5 se presentan los datos representativos proporcionados por el software de la máquina universal y el procesamiento de los datos, además sus gráficas generadas.

3.6.1 CURVA CARGA – DESPLAZAMIENTO PARA EL DURALUMINIO

Las gráficas que se presentan en la Figura 41 resultan del procesamiento de los datos proporcionados para los dos ensayos.

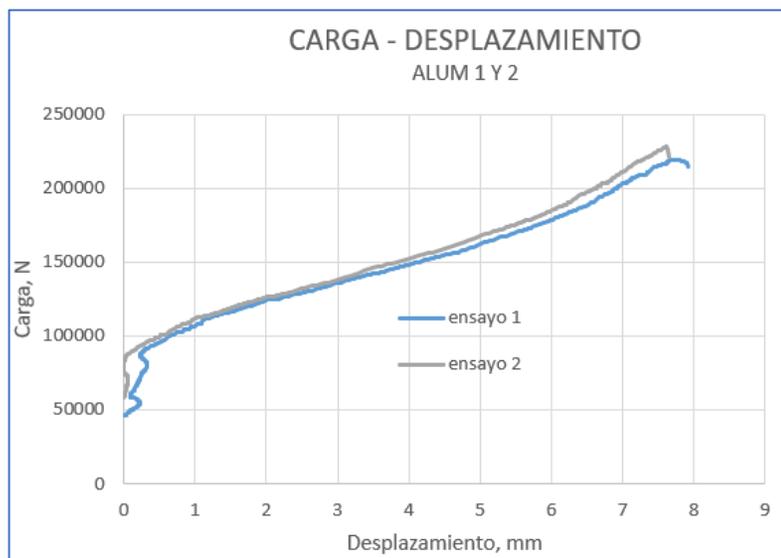


Figura 41 Diagrama Carga – desplazamiento de la compresión del duraluminio

En la tabla 14 se presentan el tamaño de probetas ensayadas y los resultados que se obtuvieron de los mismos al momento de la fractura. En el ensayo de compresión el valor máximo de la carga corresponde al valor de la carga de la fractura.

Tabla 14

Resultados del ensayo de compresión para el duraluminio

ID	Diámetro inic.	Altura inic.	Carga fractura	Despl. Máx	Altura final	Diám. Final prom.
	mm	mm	N	mm	mm	mm
ALUM - 1	14	16	219592	7.78	8.22	21.95
ALUM - 2	14	16	227974	7.6	8.4	21.18

Los dos ensayos tienen comportamientos similares, para la simulación y análisis se trabajará con el ensayo realizado con la probeta 1.

3.6.2 ACERO INOXIDABLE AISI 304

Los datos procesados permiten generar la gráfica de los dos ensayos representado en la figura 42 para la compresión del acero inoxidable.

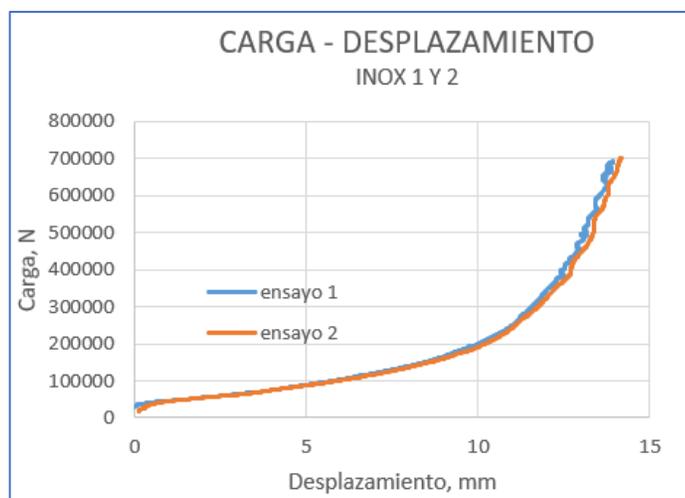


Figura 42 Carga – desplazamiento de la compresión del acero inoxidable

En la tabla 15 se presentan los ensayos con las probetas y los resultados obtenidos al momento de la fractura.

Tabla 15

Resultados del ensayo de compresión para el acero inoxidable

ID	Diámetro prom	Altura inic.	Carga fractura	Despl. Máx	Altura final	Diám. Final prom.
	mm	mm	N	mm	mm	mm
INOX - 1	8	16	691073	13.92	2.08	19.6
INOX - 2	8	16	700165	14.14	1.86	20

En estos ensayos también se observa un comportamiento similar, por lo tanto se seleccionará para la simulación al ensayo 2.

3.7 MORFOLOGÍA DE LA FRACTURA

La fractura producida por los ensayos de tracción y de compresión es observada y analizada desde dos puntos de vista, primero realizando una observación macroscópica con tomas realizadas con cámara fotográfica casera y luego microscópicamente con fotografías obtenidas en un microscopio electrónico de barrido (SEM) de la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE.

En la figura 43a se observa una probeta de duraluminio la cual presenta una fractura de baja ductilidad, pues apenas hay estricción. Macroscópicamente la superficie de falla forma un ángulo de 90° con la carga de tensión, tiende a ser plana y no existe mayor deformación plástica en la cercanía de la fractura. Tanto su parte central como la del costado presentan una gran aspereza, sin embargo macroscópicamente la parte lateral presenta estrías como consecuencia de la dirección de la aplicación de la carga.

La figura 43b, se visualiza el fragmento extraído de la probeta, en la cual se representan con flechas los sitios a ser observados en el SEM.

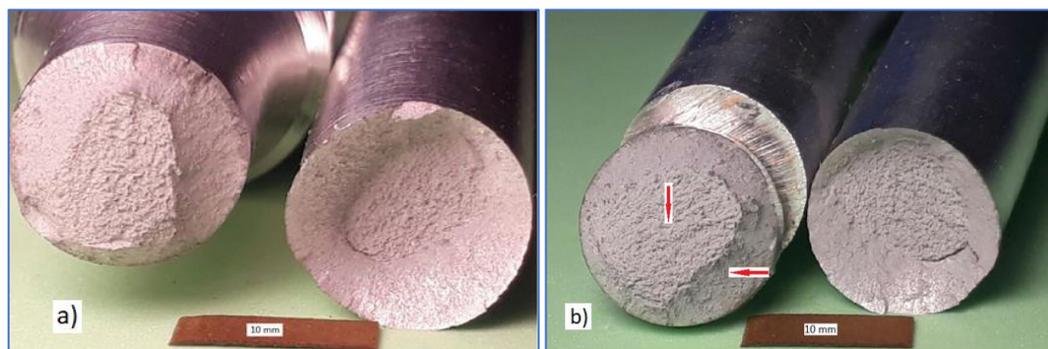


Figura 43 Duraluminio a tracción: a) probeta fracturada b) fragmento extraído

En la figura 44 se presenta la microscopía obtenida mediante SEM. Se realiza la observación en la parte central del fragmento según la figura 44a, la cual presenta superficies con cavidades amorfas no muy profundas orientadas perpendicularmente a la carga aplicada, microscópicamente se presenta como un superficie relativamente lisa.

La figura 44b, presenta la observación realizada en la parte lateral del fragmento que corresponde a una superficie con un ángulo aproximado de 45° , se muestra un estriado con cierta direccionalidad hacia el sentido de la carga y sus microcavidades no son tan definidas como en su parte central.

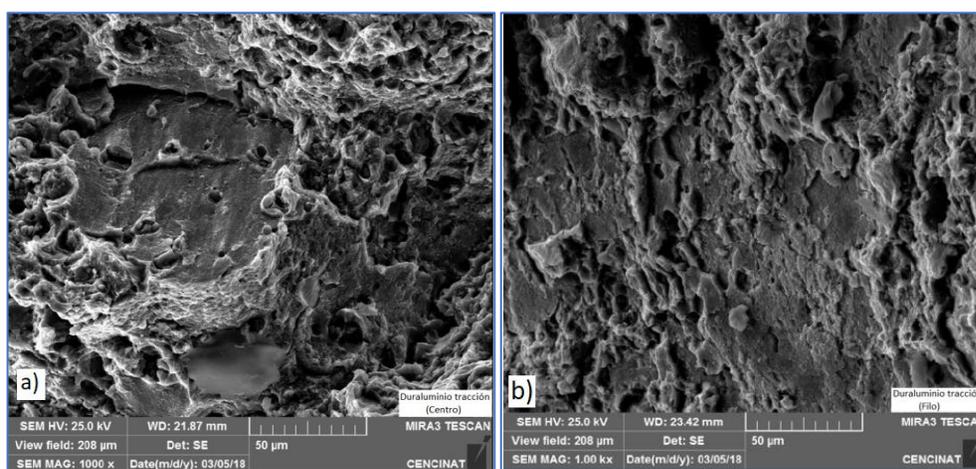


Figura 44 Microscopía SEM del duraluminio a tracción: a) centro, b) costado

En las figura 45a se muestra que la probeta de acero inoxidable ha fallado por fractura dúctil, presenta una marcada zona de estricción, la fractura muestra la típica forma cono – copa, el plano de la falla forma un ángulo de 45° con la carga de tensión que se origina por tensiones de cizalladura. La deformación plástica es apreciable en la cercanía de la grieta. Además presenta mayor aspereza en la parte central de la fractura, que en su parte lateral.

La figura 45b, se visualiza el fragmento extraído señalando con flechas los sitios a ser observados en el SEM.

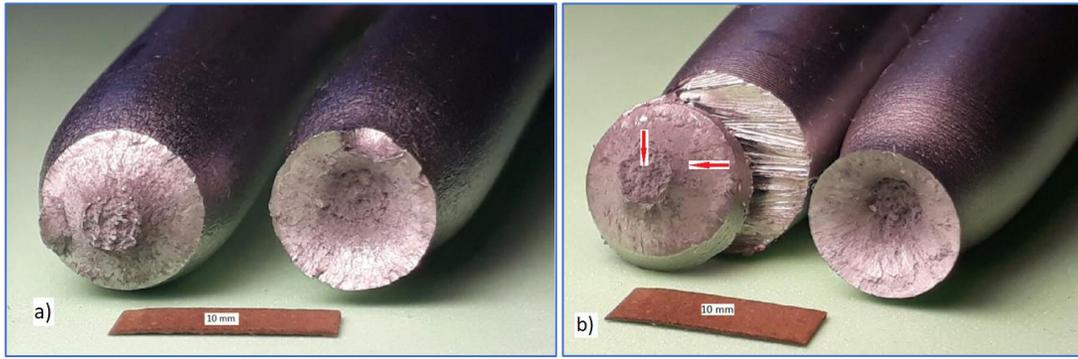


Figura 45 Acero inoxidable a tracción: a) probeta fracturada b) fragmento extraído

La figura 46a, representa la observación realizada al centro del fragmento y muestra la formación de microcavidades profundas producto de una fractura por desgarre, presentan perpendicularidad al plano de observación por lo que no se identifica coalescencia,

en tanto que en la figura 46b se observa que las microcavidades también son profundas pero, presentan cierta inclinación orientadas en la dirección de la carga, en este caso el plano de fractura no es perpendicular.

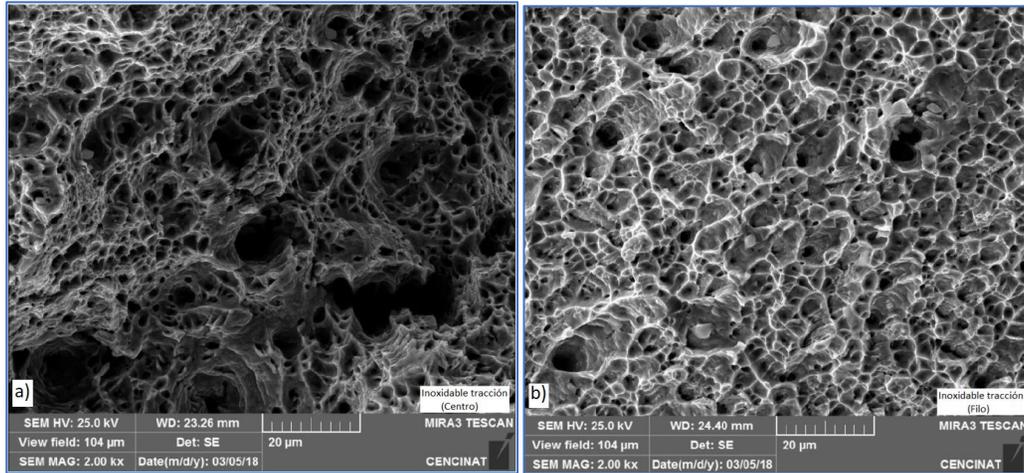


Figura 46 Microscopía SEM del acero inoxidable a tracción: a) centro, b) costado

En la figura 47a se visualiza la fractura de la probeta de duraluminio a compresión, se aprecian claramente la falla por cortante. Es notorio el abarrilamiento como consecuencia de la deformación y también el uso de teflon como lubricante para el ensayo.

En la figura 47b se observa un fragmento de la probeta fracturada para ser visualizada en el SEM, el centro y un costado para la observación, son indicados por flechas.

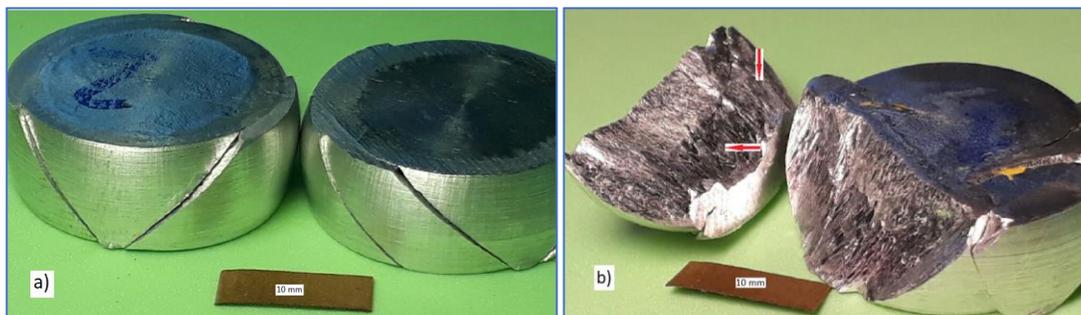


Figura 47 Duraluminio a compresión: a) probeta fracturada, b) fragmento extraído

Las figuras 48a y 48b, muestran microscópicamente la fractura del duraluminio sometido a compresión, en el primer caso con la imagen tomada en el centro de la fractura se observa que existió deslizamiento de los planos de corte, pues se obtiene una superficie lisa orientada, en su parte lateral este deslizamiento resulta ser mayor, las líneas generadas por este deslizamiento están muy definidas.

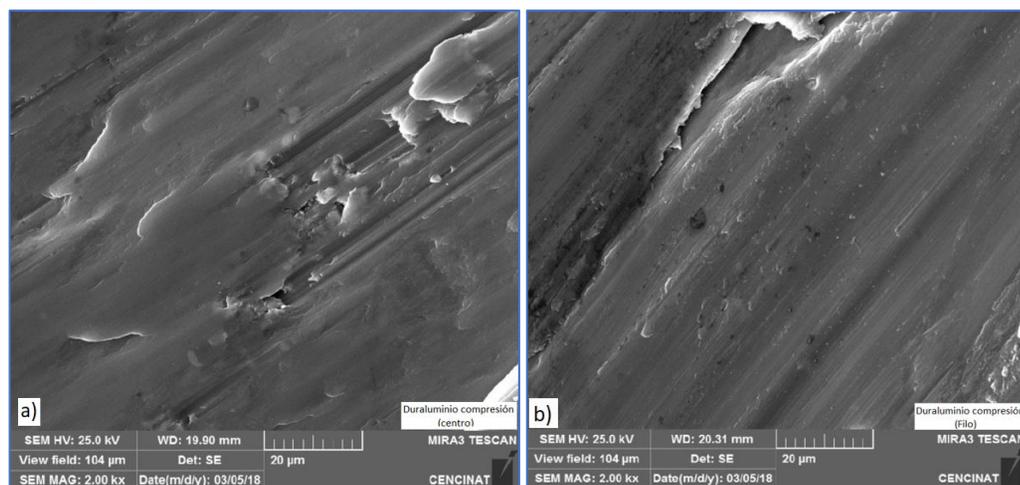


Figura 48 Microscopía SEM del duraluminio a compresión: a) centro, b) costado

En el caso del acero inoxidable al ser sometido a cargas compresivas según la figura 49, se aprecia la falla por cortante pero esta no es muy marcada como en el duraluminio,

también se aprecia el abarrilamiento y su deformación puede continuar debido a la ductilidad.

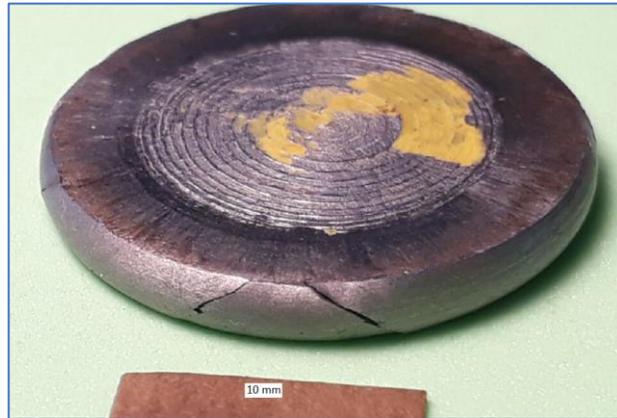


Figura 49 Fractura del acero inoxidable a compresión

Para este ensayo no se hizo el análisis microscópico por la dificultad de extraer un fragmento para visualización en el SEM.

CAPÍTULO IV

4. SIMULACIÓN

En este capítulo se presenta la simulación de los ensayos de tracción y compresión para el duraluminio y el acero inoxidable, para ello se utilizará un software de elementos finitos. Para la simulación se plantea un objetivo, se propone y analiza los elementos fundamentales para la construcción del modelo a simularse como son geometría, restricciones, propiedades del material, curva de flujo y criterio de fractura.

Como parte inicial de la simulación se realiza un análisis paramétrico del número de elementos finitos, la fricción en el caso de compresión y el criterio de fractura mediante las constantes que lo definen. Finalmente se efectuará la etapa del postproceso en donde se visualiza el efecto del ensayo y se obtiene los resultados de la simulación de carga y desplazamiento. Se comparan los resultados de simulación con los experimentales determinando el error. En el Anexo 6 se presente una corta rutina del ingreso de datos en el software de elementos finitos.

4.1 OBJETIVO

Obtener un ajuste adecuado tanto en la forma de la curva como en los valores de carga y desplazamiento de fractura mediante las constantes de los criterios de Cockroft y Latham y el de Oyane para el duraluminio y el acero inoxidable AISI 304.

Mejorar la exactitud de la predicción de los ensayos de tracción y compresión para el duraluminio y el acero inoxidable AISI 304 en el instante de la fractura mediante la valoración del daño producido en el material, el número de elementos finitos, la fricción en la compresión y el criterio de fractura.

4.2 GEOMETRÍA

Se utilizan dos tipos de geometrías como en la figura 50, una para tracción y otra para compresión.

En el caso de tracción se utiliza una probeta cilíndrica que representa la longitud calibrada del ensayo realizado con extensómetro; y, para el caso de compresión se utilizan probetas cilíndricas con diámetro y altura determinadas para el duraluminio y el acero inoxidable AISI 304.

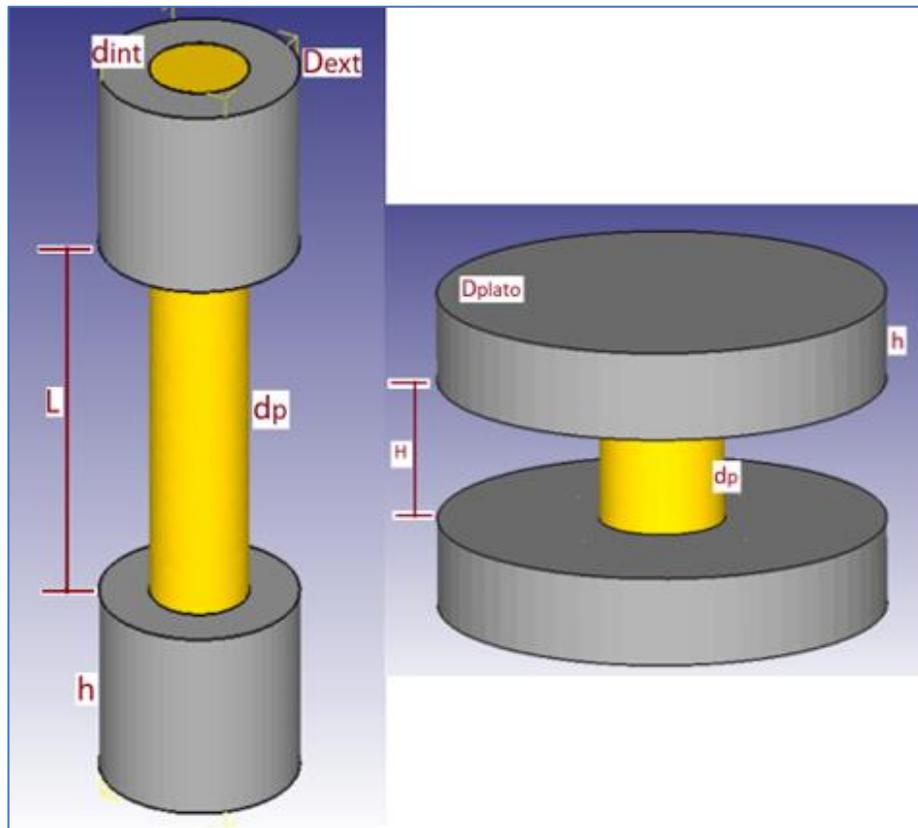


Figura 50 Geometría de las simulaciones

En el caso de las simulaciones para tracción se utilizan mordazas con diámetro exterior (D_{ext}), diámetro interior (d_{int}) y altura (h) que sujetan las probetas de diámetro (d_p).

Para compresión se utilizan platos de diámetro exterior (D_{plato}) y espesor (h) que comprimen a las probetas de diámetro (d_p) y altura (H).

Las dimensiones generales de las probetas simuladas son:

Tracción: $L = 50 \text{ mm}$, $d_p = 12.5 \text{ mm}$

Compresión duraluminio: $d_p = 14 \text{ mm}$, $H = 16 \text{ mm}$

Compresión acero inoxidable: $d_p = 8 \text{ mm}$, $H = 16 \text{ mm}$

4.3 PARÁMETROS Y CONSTANTES RELACIONADAS CON EL MATERIAL

Las características del material a ingresar en la simulación provienen de la aproximación matemática realizada al diagrama esfuerzo - deformación real, de la curva de fluencia y el modelo de endurecimiento.

4.3.1 CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN REAL

Un material posee un desempeño plástico el cual va determinando cómo se puede ir endureciendo durante el proceso de conformado, la relación que exista entre el esfuerzo y la deformación causada muestra este desempeño, la gráfica que representa este comportamiento se denomina curva de fluencia.

Para realizar una simulación se debe establecer cuál es el comportamiento matemático que posee el ensayo en un material en su proceso de conformado, esta es la condición inicial pues es parte de la caracterización de un material.

En el capítulo 3 se realizó el ajuste matemático del diagrama esfuerzo – deformación real, por lo tanto:

Para el duraluminio se trabajará con la función potencial mostrada en la ecuación 21 en donde:

$$K = 850.09 \text{ y } n = 0.0798$$

Para el acero inoxidable AISI 304, con la función lineal mostrada en la ecuación 22, en donde:

$$m = 1827.5 \text{ y } b = 276.81$$

4.3.2 CURVA DE FLUENCIA Y MODELO DE ENDURECIMIENTO

Cuando un material se deforma plásticamente se establece una relación entre los esfuerzos principales y las deformaciones. Existen en la bibliografía varias curvas de flujo y el software presenta algunas de estas, Tresca y Von Mises son los criterios más utilizados en deformación plástica para materiales isotrópicos (Budynas Richard G., 2008). El software por utilizarse dispone de estos criterios, para el presente trabajo se utilizará el criterio de Von Mises.

En cuanto al lugar de la fluencia, este puede tener un comportamiento complejo, a medida que la deformación avanza, suele cambiar de tamaño y de forma. El software considera esta situación en el modelo de endurecimiento que puede ser isotrópico cuando se da un cambio en el tamaño del lugar de la fractura, y el criterio cinemático cuando cambia el tamaño y la forma (Riofrío Villena, 2014).

Dadas las condiciones del material para los ensayos, en la simulación se utilizará el modelo de endurecimiento isotrópico.

La regla de flujo establece las relaciones entre esfuerzo y deformaciones cuando un material es deformado plásticamente, (Valberg, 2010). Para un estado de tensión isotrópico se establece que:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} [(\sigma_x)^2]^{1/2} = \sigma_x \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\bar{\epsilon} = \left\{ \frac{2}{3} \left[\epsilon_x^2 + \frac{\epsilon_x^2}{4} + \frac{\epsilon_x^2}{4} \right] \right\}^{1/2} = \epsilon_x \quad \text{Ecuación 24}$$

4.4 APLICACIÓN DEL CRITERIO DE FRACTURA

Varios de los programas para elementos finitos tienen incorporados los criterios de fractura, en el caso particular de la investigación los criterios de Cockroft y Latham normalizado y el de Oyane son parte del software que se va a utilizar. Los programas tienen sus propias librerías de materiales y también brindan la posibilidad de incorporar materiales nuevos a través de diferentes opciones de curvas que relacionan el comportamiento del esfuerzo luego de obtener su caracterización y eso es lo que se

realiza con el duraluminio y el acero inoxidable AISI 304 que a pesar de que se encuentran materiales de la misma familia, no responden a las características de los ensayados.

La estrategia por utilizarse para realizar las simulaciones será la siguiente:

- Tracción con el criterio de Cockroft y Latham para el duraluminio y el acero inoxidable
- Tracción con el criterio de Oyane
- Compresión con el criterio de Cockroft y Latham.
- Compresión con el criterio de Oyane para los dos materiales.

4.5 ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Para realizar la simulación es necesario definir elementos que conducen a obtener la simulación adecuada, estos son: el número de elementos finitos, en el caso de la compresión la influencia de la fricción; y, el criterio de fractura.

4.5.1 NÚMERO DE ELEMENTOS FINITOS

Al realizar una simulación es importante el número de elementos finitos puesto que de aquello depende la calidad de los resultados tanto en el desarrollo de la aplicación de la carga como en la evolución del desplazamiento, a pesar de la bondad de un alto número de elementos finitos, se debe guardar cierto equilibrio ya que los tiempos de simulación pueden ser muy altos (Kiran, 2014).

En tres simulaciones previas para el duraluminio con el criterio de Cockroft y Latham se prueban con 25 000, 50 000 y 75 000 elementos finitos y se puede ver variaciones en los resultados del desplazamiento y no así respecto a la carga máxima. En la figura 51 se puede visualizar las curvas generadas para la tracción del duraluminio con tres variaciones en el número de elementos finitos.

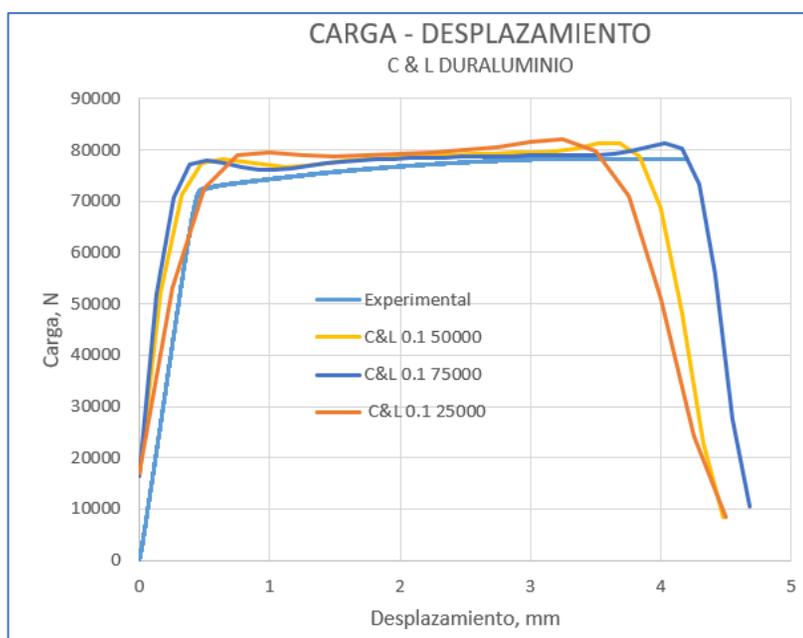


Figura 51 Curvas carga - desplazamiento según el número de elementos finitos

Si se cuantifica las variaciones que se produce en los valores de carga y desplazamiento se puede observar en la tabla 16, en cuanto a la carga prácticamente ésta no varía en los tres casos, en tanto que en el desplazamiento si se producen variaciones en cuanto al error.

Tabla 16*Parámetros y constantes para el número de elementos finitos*

Ensayo		Tracción			
Material		Duraluminio			
Criterio de fractura		Cockroft & Latham			
Valor del daño		0.1			
No. Element. finitos	Carga (N)	Desplaz. (mm)	tiempo (min)	error % carga	error % despl.
25000	81941	3.25	5	-4.7	22.6
50000	81400	3.68	11	-4.0	12.4
75000	81281	4.03	16	-3.9	4.0
Valor experimental	78234	4.2			

Se observa además que en la zona plástica cualquiera que sea el número de elementos finitos, las curvas generadas avanzan simultáneamente con la experimental lo cual da cierta libertad para utilizar el número de elementos que faciliten obtener una curva con mejor ajuste. De esta manera se puede concluir que el ajuste de la curva se lo puede ir mejorando cambiando el valor del daño.

Con la finalidad de lograr un equilibrio entre el número de elementos finitos utilizados para determinar la carga y el desplazamiento realizan simulaciones con 50000 elementos finitos y en simulaciones previas con 25000 hasta ir determinando la tendencia adecuada que mejor se aproxime a la curva experimental.

4.5.2 LA FRICCIÓN

En los procesos de conformado la fricción constituye un factor importante a considerar pues establece o determina la energía que se disipa en el proceso, la carga

que se debe aplicar, el acabado superficial e inclusive el desgaste de las herramientas, si es un proceso con arranque de viruta.

En los ensayos de compresión a realizarse se utiliza teflón con la finalidad de disminuir el rozamiento entre los platos de compresión y las probetas y esto contribuye a lograr el abarrilamiento característico en estos ensayos. Se analiza a continuación la influencia de la fricción en duraluminio.

En la figura 52 se ha graficado tres curvas de carga y desplazamiento generadas al simular la compresión del duraluminio según el criterio de Cockroft y Latham, con igual valor de daño y 25000 elementos finitos y se observa que la curva con mayor rozamiento se desprende hacia abajo de la curva experimental, disminuyendo los valores de carga y desplazamiento.

Si se desprecia el rozamiento la curva no tiene convergencia en carga y desplazamiento, pero para valores menores al desplazamiento máximo obtenido en el ensayo, la curva tiende a acercarse a la curva experimental.

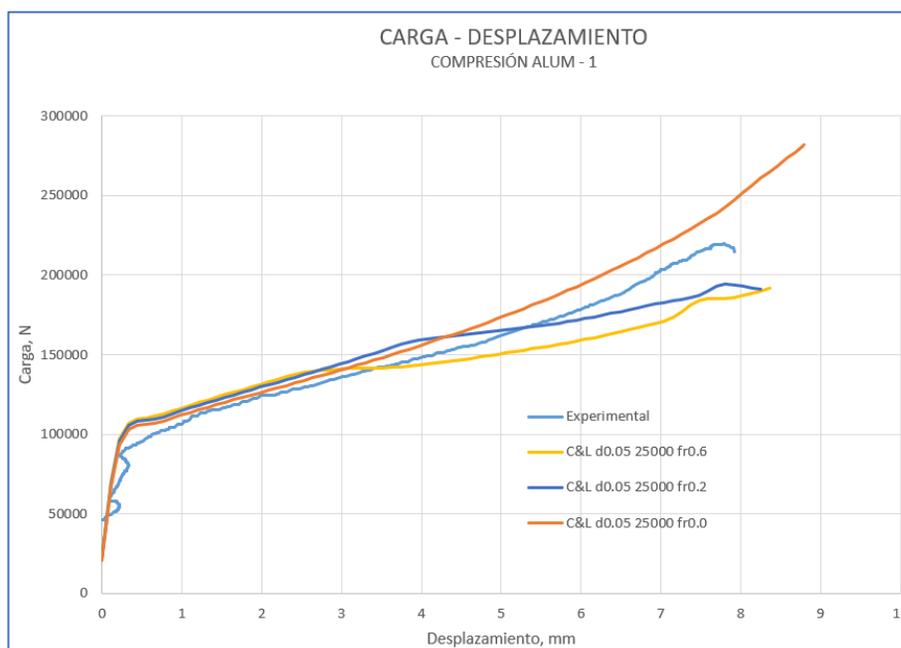


Figura 52 Carga – desplazamiento con diferentes coeficientes de fricción

En la tabla 17 se resume la incidencia del rozamiento para los valores simulados en la compresión del duraluminio

Tabla 17

Incidencia del coeficiente de rozamiento en la simulación de compresión

Ensayo	Compresión			
Material	Duraluminio			
Criterio de fractura	Cockroft & Latham			
Valor del daño	0.05			
Coef.de fricción	Carga (N)	Desplazamiento (mm)	error% carga	error % despl.
0	indeterminado	indeterminado		
0.2	194327	7.81	11.5	-0.4
0.6	185551	7.8	15.5	-0.3
Valor experimental	219592	7.78		

Los altos valores de error porcentual muestran que la fricción constituye una de las variables que requieren mayor número de simulaciones a realizarse antes de llegar al ajuste adecuado.

4.5.3 CRITERIOS DE FRACTURA

Al realizar una simulación de un ensayo de tracción o de compresión es importante establecer cuál es el criterio de fractura más idóneo que logre una mejor aproximación a la curva carga y desplazamiento que se genera de un proceso experimental.

Al utilizar el criterio de Cockroft y Latham, existe una sola constante como es el daño que se debe determinar para lograr la mejor aproximación al ensayo experimental, se observa en la figura 53 en tres simulaciones que a medida que aumenta el valor del daño los valores de fractura se alejan del experimental o si éste es pequeño la simulación hace fallar a la probeta antes de lo previsto. La búsqueda del valor del daño adecuado permitirá lograr el ajuste adecuado de la curva.

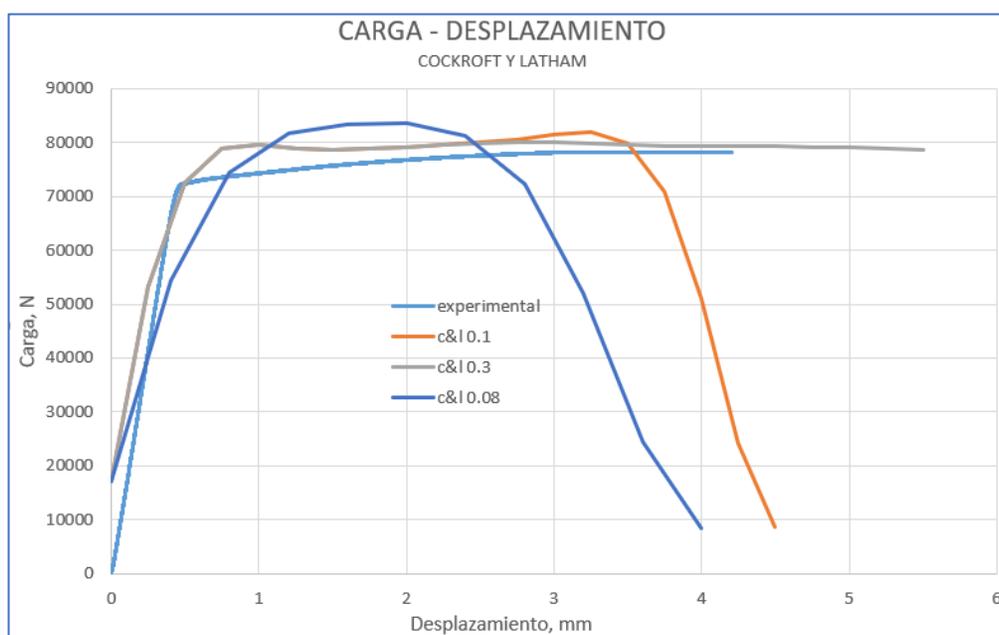


Figura 53 Influencia del valor del daño en el criterio de Cockroft y Latham

Para el caso de Oyane se presenta tres simulaciones previas que ayuden a establecer una tendencia para saber cómo las constantes del criterio están relacionadas.

Tomando un valor fijo del daño y probando el valor de a_0 se generan las gráficas de la figura 54 en donde se observa que a medida que aumenta a_0 , el valor del desplazamiento también lo hace.

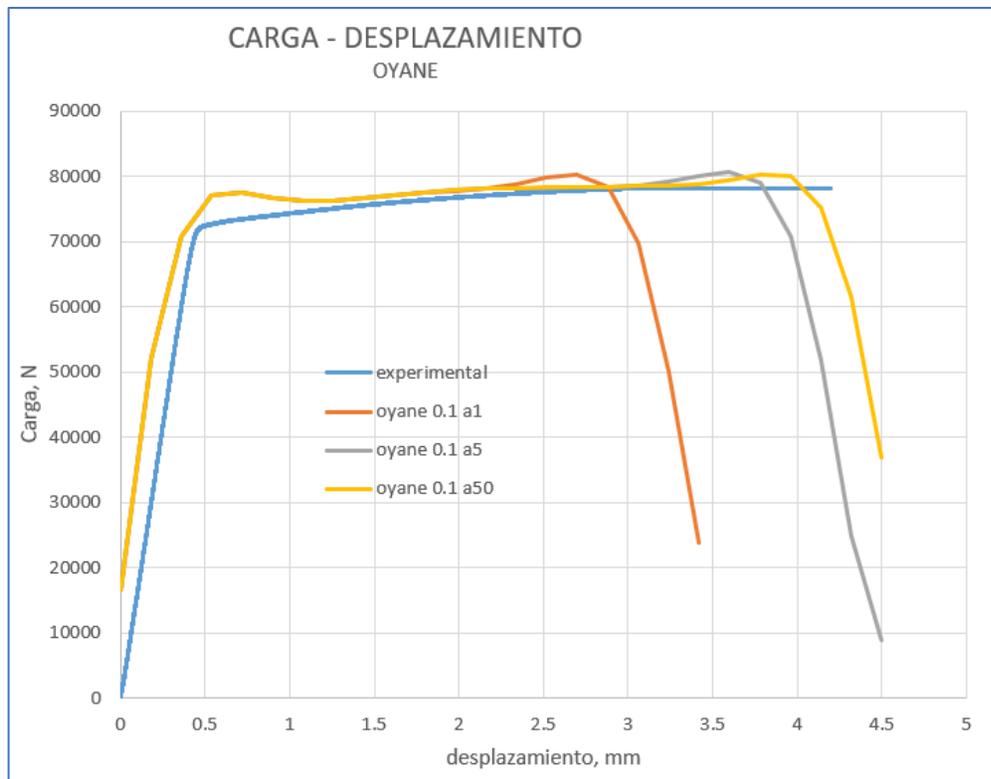


Figura 54 Influencia de la constante a_0 en el criterio de Oyane

4.6 PARÁMETROS Y CONDICIONES PARA LA ETAPA DE PREPROCESO

Una vez definido los parámetros que inciden en la simulación, se resume en la tabla 18 los valores que deberán ingresarse para tal efecto.

Tabla 18

Síntesis de parámetros y valores a ingresarse en las simulaciones

ENSAYO	TRACCIÓN		COMPRESIÓN	
	Duraluminio	Inox. AISI 304	Duraluminio	Inox. AISI 304
MATERIAL				
CONSTANTES	K=850.09; n=0.0798	m=1827.5; b=276.81	K=850.09; n=0.0798	m=1827.5; b=276.81
GEOMETRÍA	L=50 mm; dp=12.5 mm	L=50 mm; dp=12.5 mm	dp=14 mm; H=16 mm	dp=8 mm; H=16 mm
No. ELEMEN. FINIT.	50 000	50 000	50 000	50 000
FRICCIÓN (SHEAR)	0.2	0.2
DAÑO. C&L	0.1	0.52	0.05	0.05
DAÑO Y ao. OYANE	0.11 y 10	0.52 y 20	0.05 y 10	0.05 y 10
CRITER. FLUEN.	Von Mises	Von Mises	Von Mises	Von Mises
MOD. ENDURECIM.	Isotrópico	Isotrópico	Isotrópico	Isotrópico

Debe aclararse que la simulación es un proceso iterativo para llegar a definir los valores que establezcan la mejor aproximación a los experimentales.

En el presente trabajo se realizaron varios intentos antes de llegar al resultado final, la tabla 19 muestra el número de simulaciones realizadas.

Tabla 19

Número de simulaciones realizadas

SIMULACIONES	DURALUMINIO		ACERO INOXIDABLE		Total parcial
	C&L	OYANE	C&L	OYANE	
Tracción	12	17	12	18	59
Compresión	15	13	15	20	63
TOTAL					122

4.7 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En esta sección se presentan gráficamente los resultados de las simulaciones considerando el ensayo, el tipo de material ensayado y el criterio de fractura aplicado para la simulación.

Las siguientes figuras muestran las gráficas generadas en el software y el sitio y la forma de la fractura que se produce. Se presenta una gráfica por cada material en el cual se juntan el ensayo experimental y las gráficas producidas por cada criterio de fractura y finalmente para cada caso se adjunta una tabla que resume los errores causados por las simulaciones.

4.7.1 TRACCIÓN PARA EL DURALUMINIO

En las figuras 55 y 56 se visualiza la falla producida por la simulación de los dos criterios para tracción del duraluminio

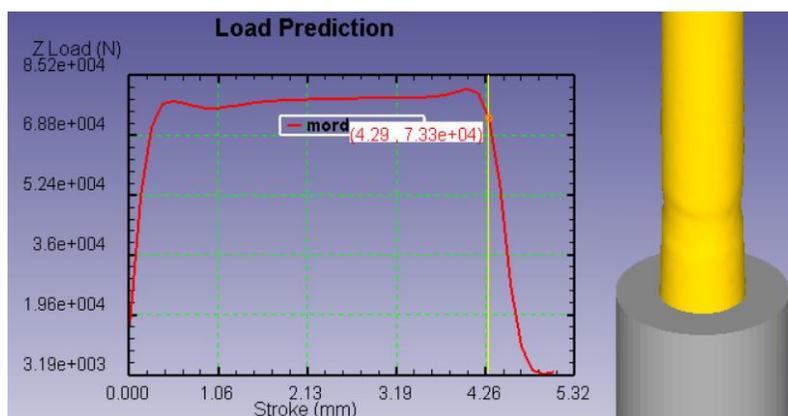


Figura 55 Carga – desplazamiento y fractura del duraluminio a tracción, C&L

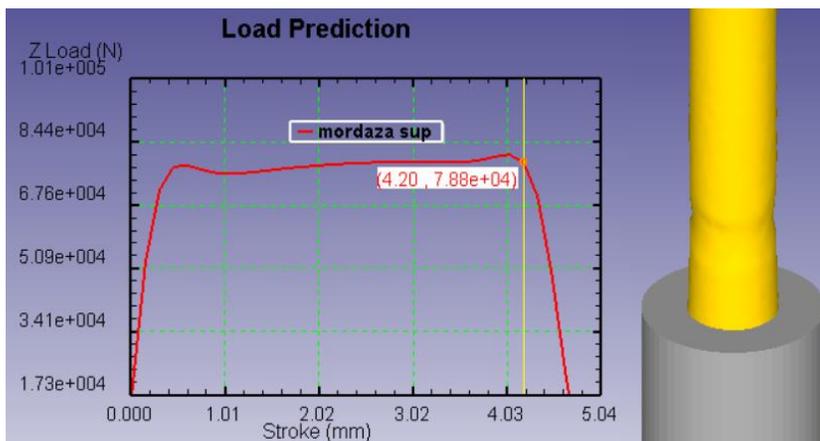


Figura 56 Carga – desplazamiento y fractura del duraluminio a tracción, Oyane

La figura 57 resume la gráfica experimental y las gráficas de los dos criterios de fractura para el duraluminio a tracción

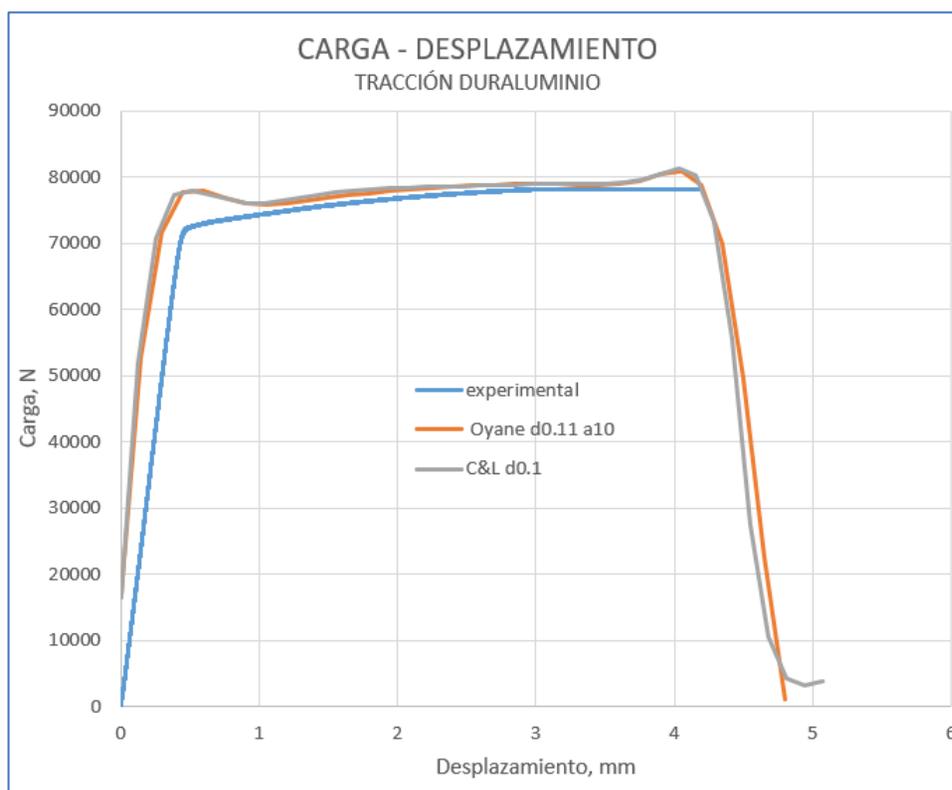


Figura 57 Carga – desplazamiento experimental y simuladas del duraluminio

En la tabla 20 se realiza la comparación de los valores experimentales con los generados por los criterios de fractura

Tabla 20

Resultados experimentales. y criterios de fractura del duraluminio

TRACCIÓN DURALUMINIO	Carga fractura (N)	Desplaz. Máx. (mm)	error en carga %	error en desplaz. %
Experimental	78133	4.2		
Cockroft y Latham	80213	4.16	-2.7	1.0
Oyane	78792	4.2	-0.8	0

Se puede observar que los dos criterios de fractura se ajustan con una buena aproximación a la experimentación, siendo el de Oyane el que mejor se acopla.

4.7.2 TRACCIÓN PARA EL ACERO INOXIDABLE AISI 304

El acero inoxidable muestra una falla asociada a fractura dúctil, que se puede observar en las figuras 58 y 59.

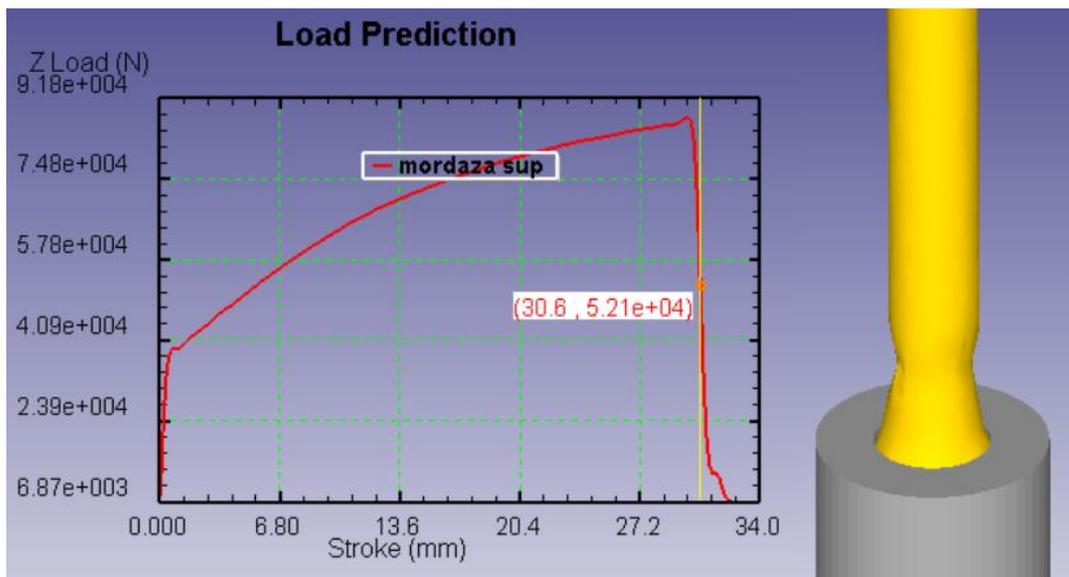


Figura 58 Carga – desplazamiento y fractura del acero inox. a tracción según C&L

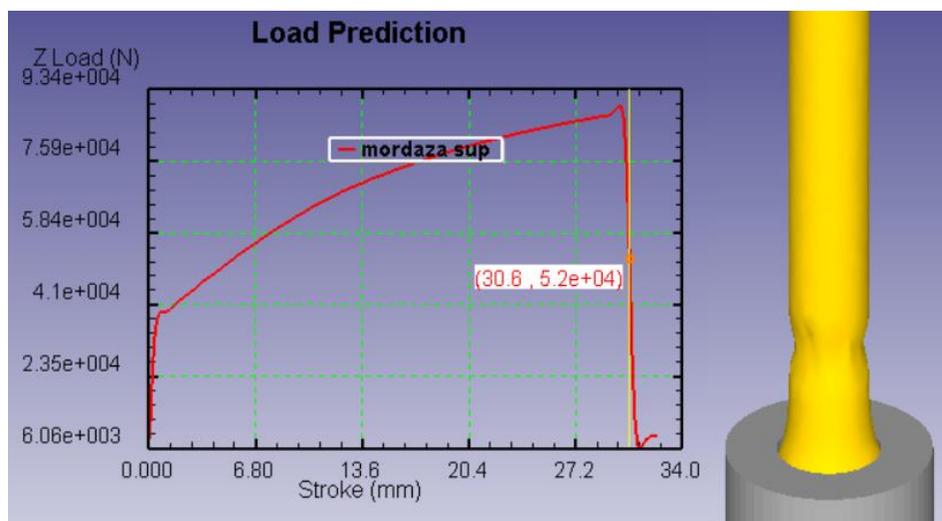


Figura 59 Carga – desplazamiento y fractura del acero inoxidable, Oyane

La figura 60 resume la gráfica experimental y las gráficas de los dos criterios de fractura para el acero inoxidable a tracción.

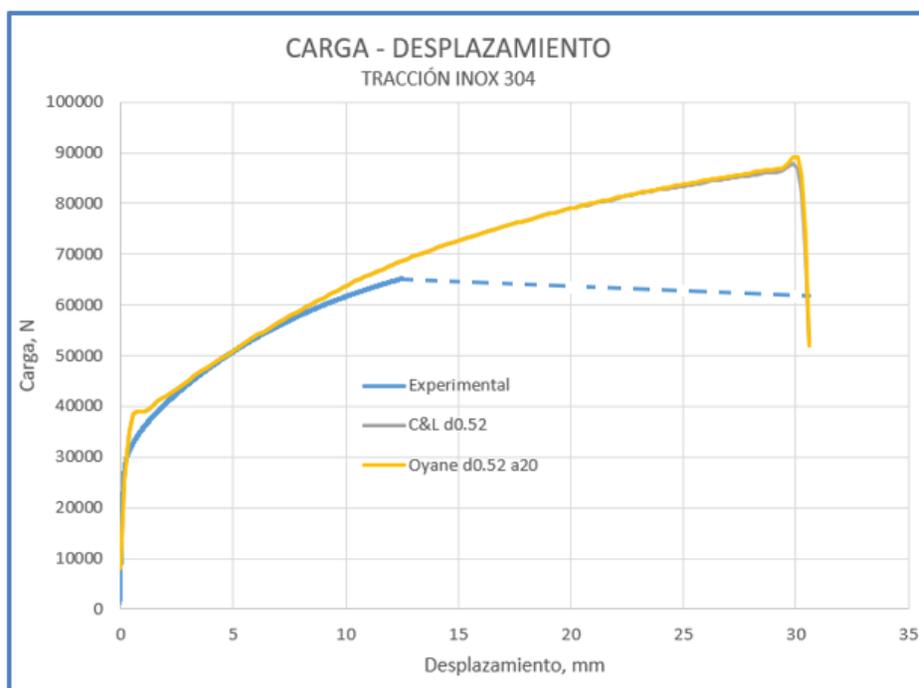


Figura 60 Carga – desplazamiento experimental y simuladas del acero inox.

Tabla 21

Resultados experimentales y criterios de fractura para el acero inoxidable

TRACCIÓN ACERO INOX.	Carga fractura (N)	Desplaz. Máx. (mm)	error en carga %	error en desplaz. %
Experimental	61918	30.6		
Cockroft y Latham	60522	30.5	2.3	0.3
Oyane	60730	30.5	1.9	0.3

Observado los errores producidos, los dos criterios tienen una buena aproximación, inclusive en la figura 60 que es de resumen, prácticamente se produce una superposición entre los dos criterios.

4.7.3 COMPRESIÓN PARA EL DURALUMINIO

La figura 61 permite observar claramente la falla del duraluminio simulada con el criterio de Cockroft y Latham, en tanto la figura 62 indica una probeta menos afectada para similares valores de desplazamiento.

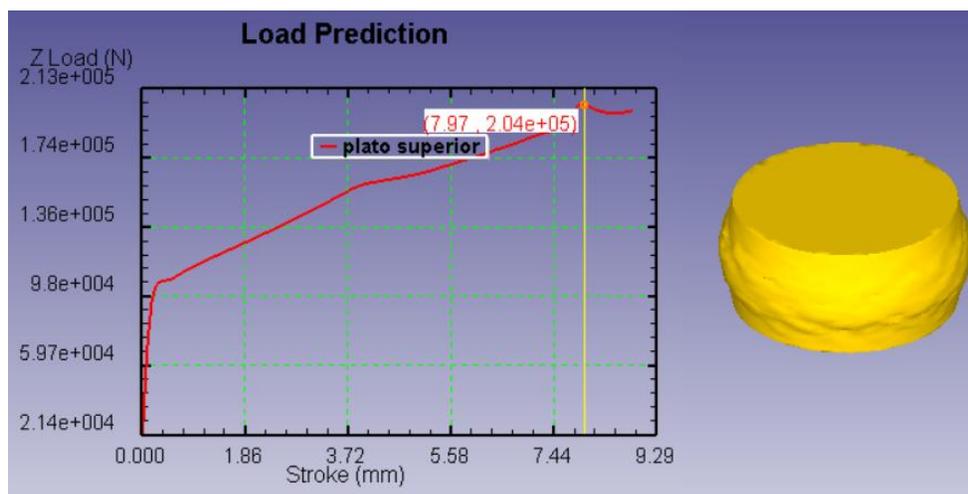


Figura 61 Carga – desplazamiento y fractura del duraluminio a compresión, C&L

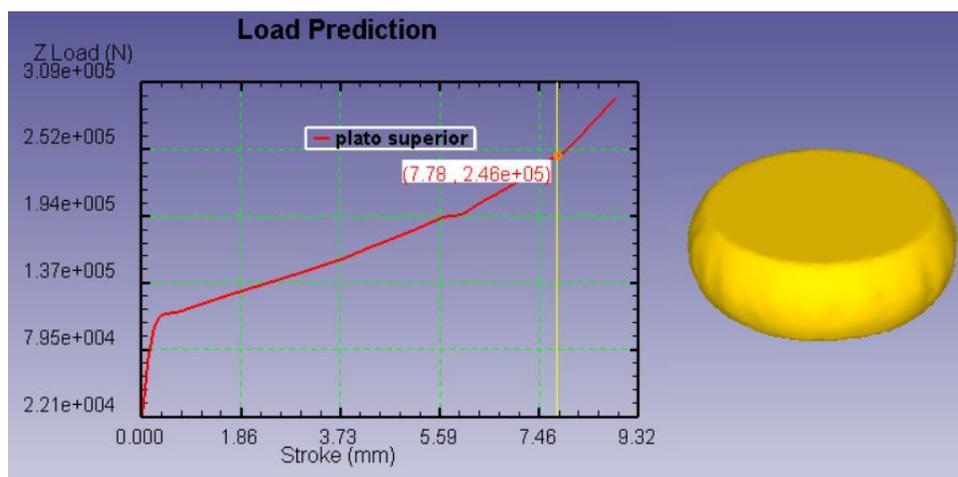


Figura 62 Carga – desplazamiento y fractura del duraluminio a compresión, Oyane

La figura 63 resume la gráfica experimental y las gráficas de los dos criterios de fractura para el duraluminio a compresión.

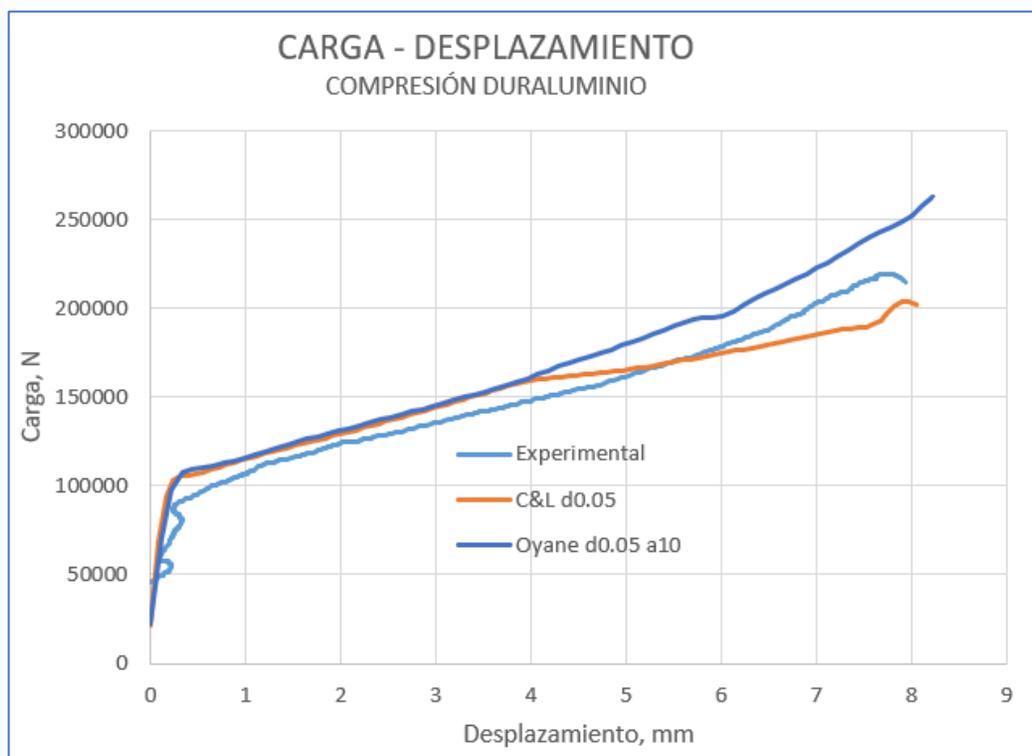


Figura 63 Carga – desplazamiento experimental y simulada del duraluminio

Tabla 22

Resultados experimentales y criterios de fractura para el duraluminio

COMPRESIÓN DURALUMINIO	Carga fractura (N)	Desplaz. Máx. (mm)	error en carga %	error en desplaz. %
Experimental	219592	7.78		
Cockroft y Latham	203650	7.89	7.3	-1.4
Oyane	245909	7.77	-12.0	0.1

Los errores de carga permiten ver que el criterio de Cockroft y Latham se ajusta de mejor manera al ensayo experimental, en tanto que el de Oyane, si bien avanza

paralelamente al ensayo el valor de la carga de fractura no tiene un buen margen de error.

4.7.4 COMPRESIÓN PARA EL ACERO INOXIDABLE AISI 304

En las figuras 64 y 65 se muestran en el valor del desplazamiento máximo la deformación de la probeta según los dos criterios.

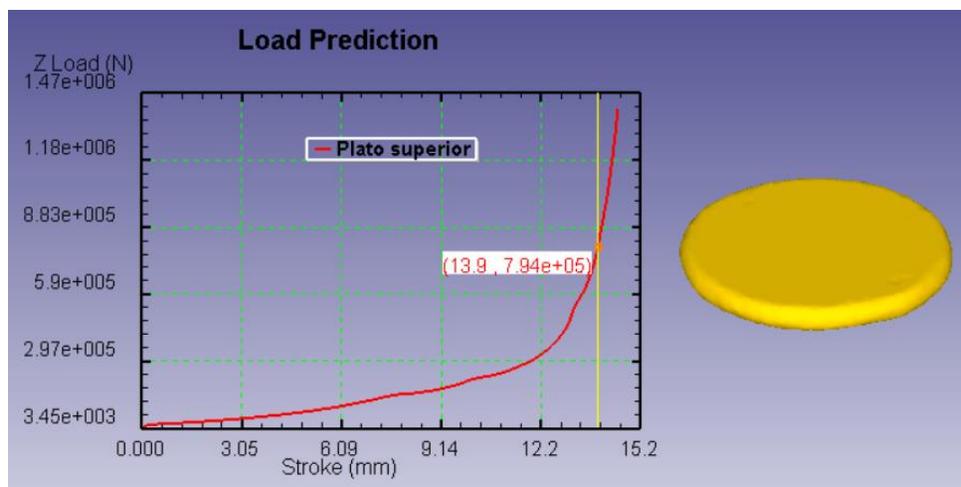


Figura 64 Carga - desplazamiento y fractura del acero inoxidable, C&L

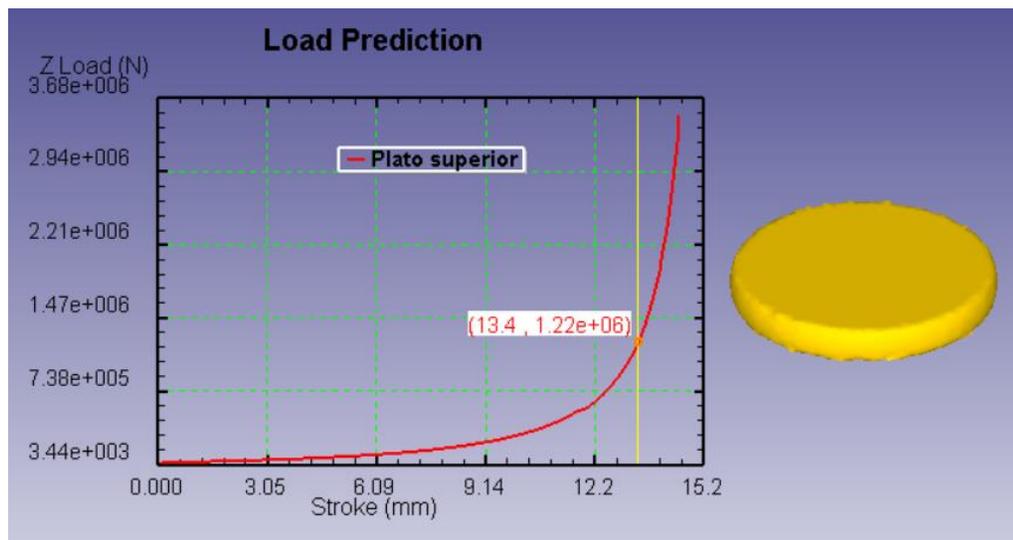


Figura 65 Carga – desplazamiento y fractura del acero inoxidable, Oyane

La figura 66 muestra la curva experimental y la de los dos criterios para el acero inoxidable a compresión.

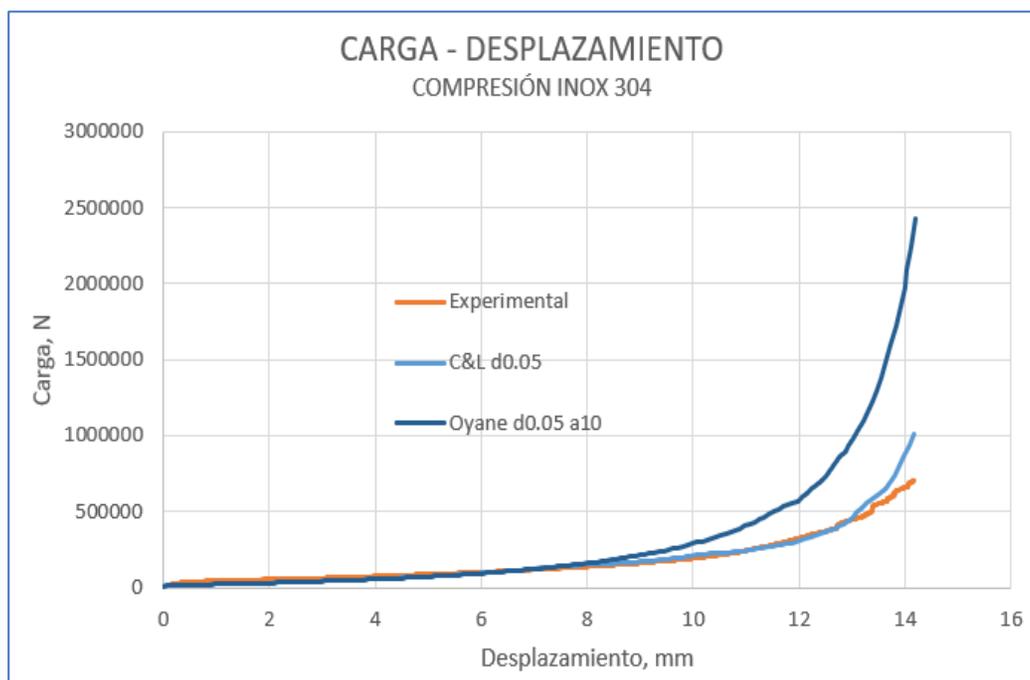


Figura 66 Carga – desplazamiento experimental y simulada del acero inox.

Tabla 23

Resultados experimentales y criterios de fractura para el acero inox.

COMPRESIÓN ACERO INOX	Carga fractura (N)	Desplaz. Máx. (mm)	error en carga %	error en desplaz. %
Experimental	691073	13.91		
Cockroft y Latham	622083	13.53	10.0	2.7
Oyane	594121	12.06	14.0	13.3

En este caso se observa que los valores de carga de Cockroft y Latham poseen un error aceptable en el ajuste de la curva, en tanto que la simulación con Oyane posee un error alto en la fractura que prácticamente no se ajusta al ensayo experimental en su parte final.

La figura 67 muestra que, en la cercanía de la carga máxima experimental, el criterio de Oyane no presenta signos de fractura, lo cual ratifica que la aproximación por este criterio al final del ensayo no es buena.

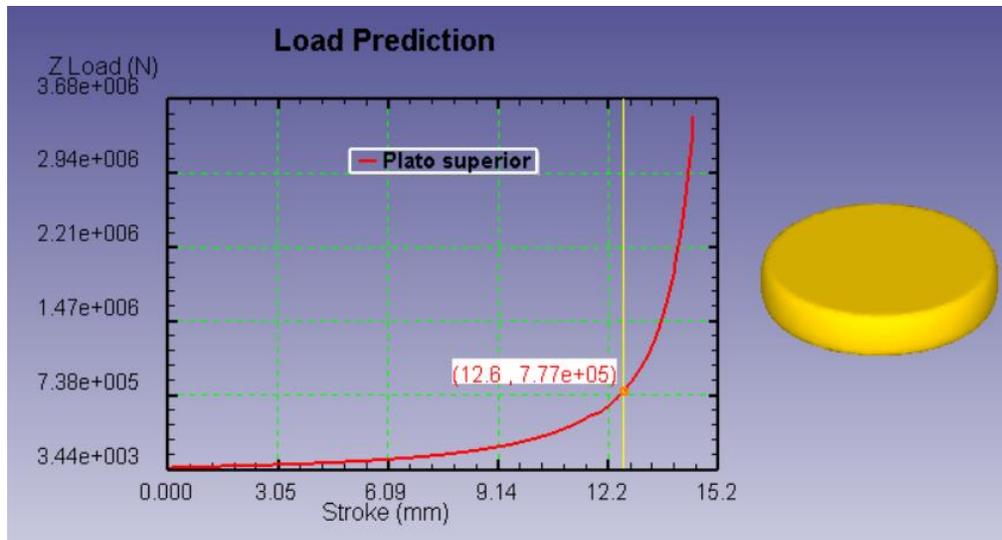


Figura 67 Oyane para compresión del acero inox. en la cercanía de la falla

En la figura 68 se muestra algunas de las simulaciones realizadas para mejorar el ajuste de la curva con el criterio de Oyane. Se observa que, al variar los parámetros como el daño, la constante a_0 y la fuerza de rozamiento, existe la misma tendencia, por esa razón se toma a la que se considera la más adecuada para comparación con el ensayo experimental y el Cockroft y Latham

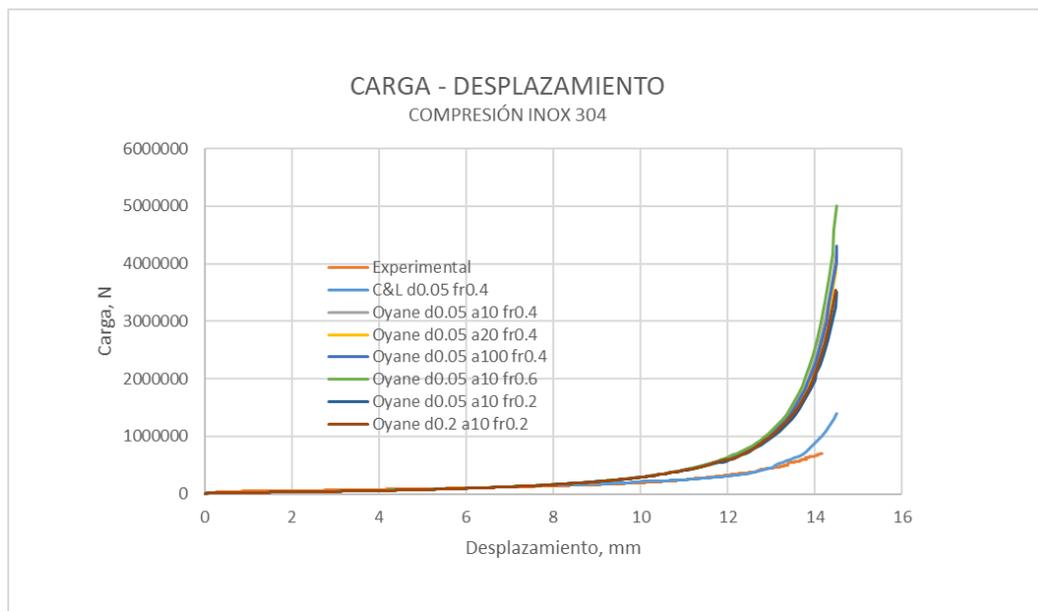


Figura 68 Ajuste de la curva de compresión para el acero inoxidable, Oyane

CAPÍTULO V

5. DISCUSIÓN

En este capítulo se realiza el análisis y discusión de los resultados experimentales y los de la simulación.

Para los resultados experimentales se considera las propiedades mecánicas obtenidas y se las compara con los valores proporcionados por el proveedor de los materiales y los encontrados en bibliografía, de la misma manera la composición química y la metalografía de los materiales ensayados. También se hace un análisis de cómo se consigue realizar adecuadamente las curvas esfuerzo y deformación reales como un proceso previo a las simulaciones. Se finaliza la discusión de los resultados experimentales con el tipo de fractura y la morfología de la falla.

Finalmente se realiza la evaluación de los criterios de fractura en base al diagrama deformación equivalente versus triaxialidad y la comparación entre la deformación efectiva obtenida por simulación y la experimental.

5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación, se realiza un análisis y comparaciones de los resultados encontrados de manera experimental con valores hallados en otras fuentes, esto permite tener claridad de la calidad de los ensayos realizados.

5.1.1 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas del duraluminio y el acero inoxidable AISI 304 obtenidas mediante el ensayo de tracción permiten conocer claramente al material se está

realizando en la investigación, puesto que los valores encontrados en bibliografía y los proporcionados por el proveedor de los materiales no concuerdan, ver el Anexo 1.

En el caso del duraluminio ensayado tiene un 8% de elongación en 50 mm que comparado con el rango de 2.5 a 4.5% del proveedor, es mayor; en tanto que el módulo de elasticidad obtenido si concuerda con el encontrado en bibliografía.

En el caso del acero inoxidable sucede algo parecido, por ejemplo, si se compara entre los valores experimentales y los de bibliografía el porcentaje de elongación es el doble comparado con el de la bibliografía; en tanto, el valor del módulo de elasticidad si concuerda.

En la tabla 24 se resume los resultados de resistencia mecánica obtenidas experimentalmente, los valores suministrados por el proveedor y los de bibliografía.

Tabla 24

Propiedades mecánicas obtenidas según tres fuentes de información

PROPIEDADES MECÁNICAS	DURALUMINIO			ACERO INOXIDABLE		
	Experimental	Proveedor	Bibliografía	Experimental	Proveedor	Bibliografía
Límite de fluencia (Mpa)	610	290 - 340	167 - 431	325	220	460 - 1100
Resistencia a la tracción (Mpa)	660	320 - 380	304 - 490	715	520	540 - 750
% de elongación (en 50 mm)	8.4	2.5 - 4.5	8.0 - 37	62	N/R	30
Módulo de elasticidad (Mpa)	73580	70000	71500	194000	N/R	193000

N/R (No reportado)

Del análisis presentado se concluye que para este tipo de investigaciones es necesario determinar experimentalmente las propiedades mecánicas del material a ser estudiado, garantizando de esta manera la confiabilidad de los resultados a alcanzarse.

5.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA

El análisis químico por espectrometría de chispa permite realizar comparaciones entre los porcentajes de los elementos químicos presentes en los materiales estudiados. Las siguientes tablas 25 y 26 resumen la composición química del duraluminio y el acero inoxidable determinada experimentalmente, suministrada por el proveedor y obtenida en bibliografía.

Tabla 25

Análisis químico del duraluminio

ANÁLISIS QUÍMICO (%)	DURALUMINIO				
	Aluminio: Al	Zinc: Zn	Cobre: Cu	Magnesio: Mg	Manganeso: Mn
Experimental	89.36	5.743	2.057	2.225	0.091
Proveedor	El resto	5.5	N/R	1.5	N/R
Bibliografía	El resto	N/R	2.5 - 4.5	0.3 - 1	0.5 - 0.8

N/R (No reportado)

Tabla 26

Análisis químico del acero inoxidable

ANÁLISIS QUÍMICO (%)	ACERO INOXIDABLE				
	Carbono: C	Manganeso: Mn	Silicio: Si	Cromo: Cr	Níquel: Ni
Experimental	0.097	1.435	0.522	12.79	9.346
Proveedor	0.05 máx	1.4	0.5	19	10
Bibliografía	0.08 máx.	2 máx	1 máx	18 - 20	8 - 10.5

En forma general, a pesar de ciertas diferencias, se puede ver que químicamente los materiales son compatibles en las tres fuentes de información.

5.1.3 METALOGRAFÍA

Las microestructuras revisadas previamente en bibliografía si corresponden a las establecidas experimentalmente para el duraluminio y para el acero inoxidable, comparando entre ellas se puede verificar su similitud.

Para el duraluminio se verifica la similitud juntando las figuras 1 y 22 en la figura 69, en los dos casos se presenta la estructura dendrítica.

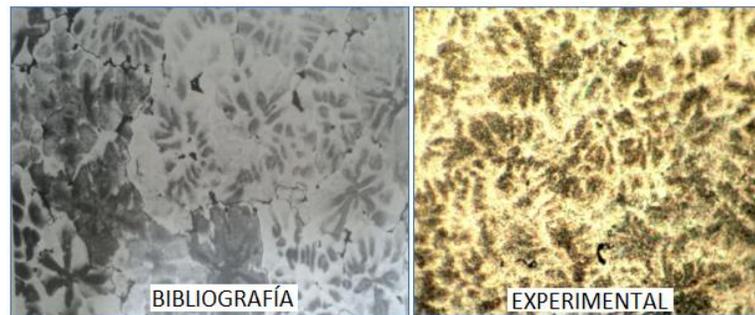


Figura 69 Microestructuras comparadas del duraluminio

Para el acero inoxidable, juntando las figuras 2 y 23 en la figura 70 se observa la equiaxialidad de los granos.

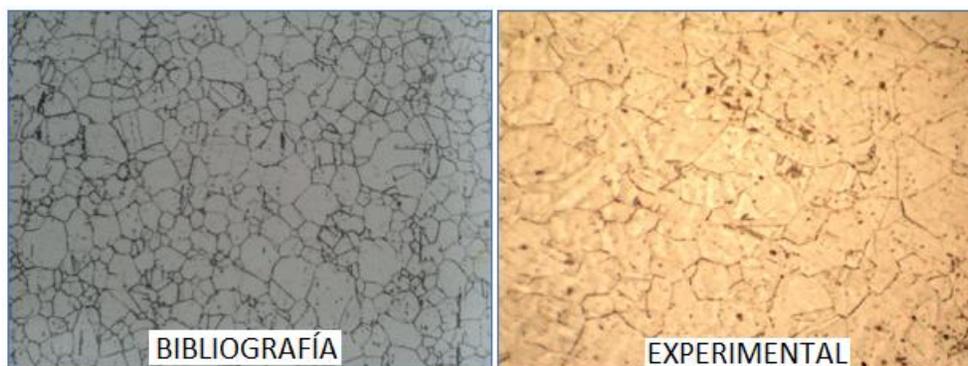


Figura 70 Microestructuras comparadas del acero inoxidable

5.1.4 ESFUERZO Y DEFORMACIÓN REAL

En la figura 71, se junta el diagrama esfuerzo – deformación real para algunos materiales referido en la figura 11 del capítulo 2 como información bibliográfica, con los diagramas obtenidos experimentalmente para los dos materiales citados en las figuras 32 y 38 con la finalidad de ser analizados.

Para el caso del duraluminio este tiene un comportamiento similar al aluminio 2024 T-36 en cuanto a los valores de esfuerzo real, en tanto que la deformación del duraluminio ensayado es menor. Para el caso del acero inoxidable el valor de la fractura se aproxima al de bibliografía, pero la deformación real obtenida experimentalmente es menor.

Esto permite establecer que los materiales ensayados no coinciden plenamente con los encontrados en bibliografía.

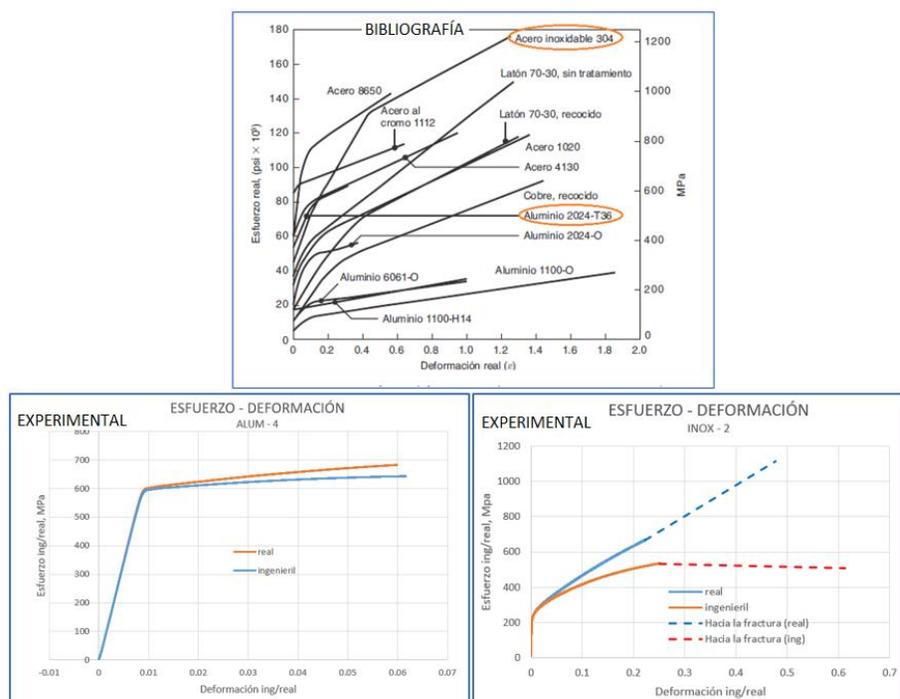


Figura 71 Diagramas esfuerzo - deformación real comparados

5.1.5 TIPO Y MORFOLOGÍA DE LA FRACTURA

El tipo de fractura por tracción que presentan los materiales ensayados corresponde para el duraluminio una fractura frágil en comparación con el acero inoxidable que es una fractura dúctil, en un inicio se puede diferenciar por el tipo de estricción que presenta cada material luego del ensayo.

En la figura 72 se presenta una probeta de aleación de Aluminio que corresponde a un material dúctil (Li, 2011), la cual muestra dos puntos de observación en el SEM en donde se aprecian las micro cavidades profundas que muestran que hubo un desgarre las cuales son perpendiculares a la carga aplicada.

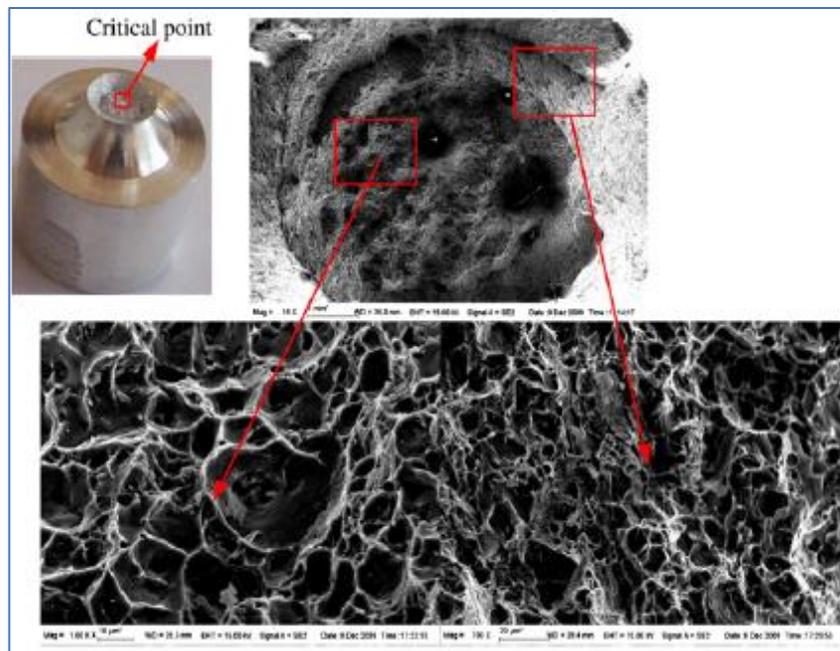


Figura 72 Fractura dúctil por tracción según

Fuente: (Li, 2011)

En la figura 73 se muestra la probeta fracturada de acero inoxidable que corresponde a un ensayo realizado en la presente investigación, en la misma se indica los puntos observados en el SEM.

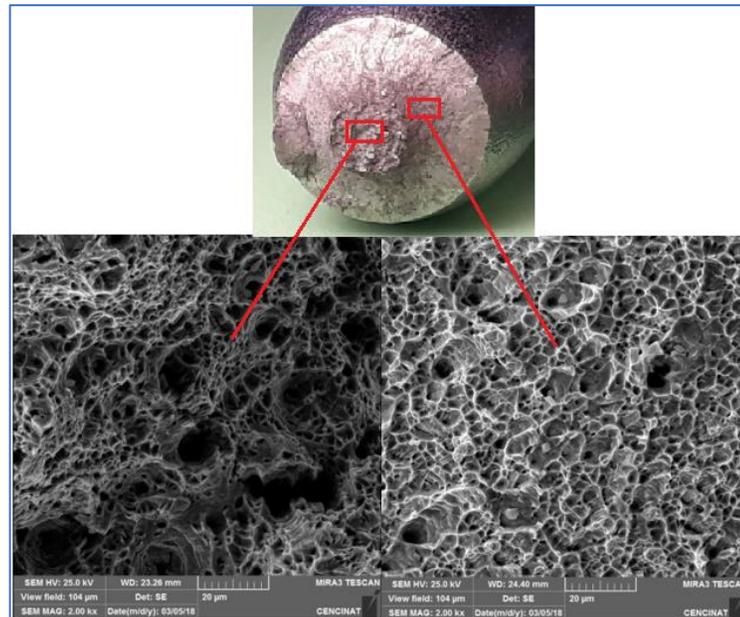


Figura 73 Fractura dúctil por tracción para el acero inoxidable

Comparando las dos figuras se determina claramente que estos materiales responden a una fractura dúctil en correspondencia con el análisis hecho para este efecto.

Para el caso de compresión, en el duraluminio es fácil identificar el instante de la fractura, el cual es audible y el registro de los datos muestra ese momento. Para el caso del acero inoxidable, la ductilidad del material no permite identificar claramente el instante

de la fractura puesto que el material continúa comprimiéndose sin hacer notar ese momento.

En la figura 74 se observa la fractura obtenida por compresión para una aleación de Aluminio, en la misma se puede observar el alargamiento de las micro cavidades, por ende, el desplazamiento de los planos ocurridos en el lugar del corte.

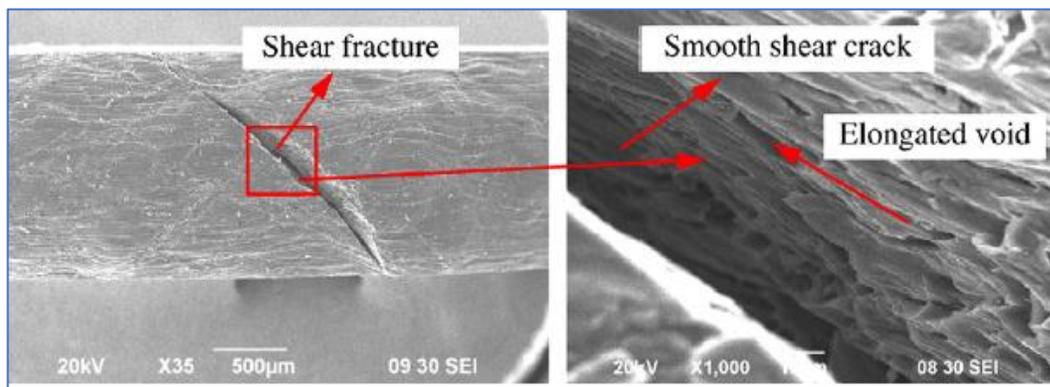


Figura 74 Fractura por cortante en compresión

Fuente: (Li, 2011)

La figura 75 muestra la fractura del duraluminio sometida a compresión ensayada en el presente trabajo, es notorio la falla por cortante, y también se nota el desplazamiento de los planos producido durante la falla por cortante, por lo tanto, la coalescencia de las micro cavidades.

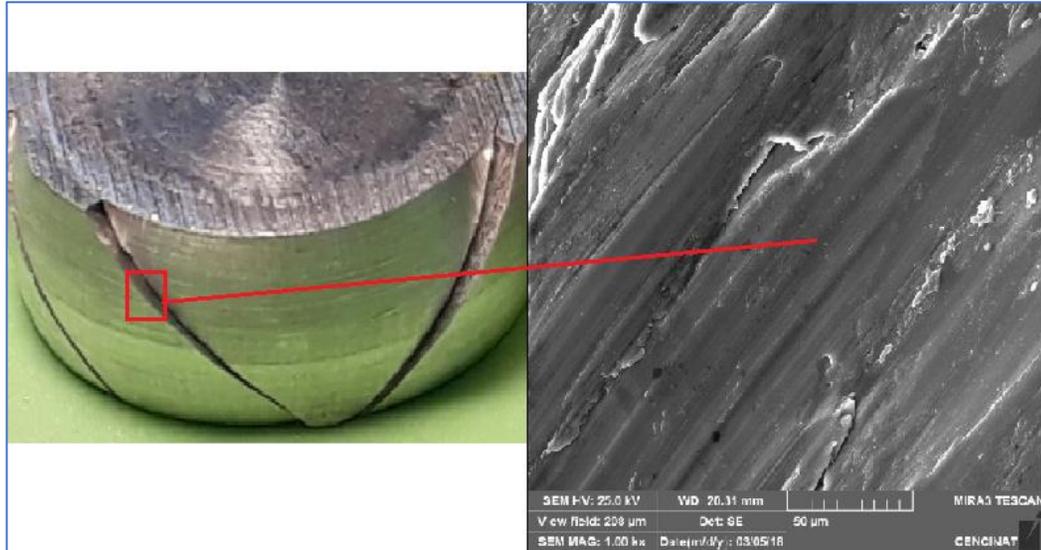


Figura 75 Fractura por cortante en el duraluminio

En los dos casos se observan situaciones similares que, aun siendo materiales diferentes, la forma de deslizamiento de los planos de corte y la coalescencia ocurren de la misma manera.

5.2 ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES

Las simulaciones realizadas deben ser comparadas entre sí y con los resultados experimentales.

5.2.1 COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES Y LOS EXPERIMENTALES

En el capítulo 4 se graficó conjuntamente la curva carga – desplazamiento obtenida de manera experimental, según criterio de Cockroft y Latham y según Oyane y se estableció el error generado en la carga de fractura y el desplazamiento máximo.

Acorde con este comentario, en la tabla 27 se presenta un resumen de la calidad del ajuste logrado por las simulaciones, en función de una escala cualitativa, correspondiente con el error generado al comparar con los resultados experimentales obtenidos en la fractura del material

Tabla 27

Calidad del ajuste en las simulaciones según el criterio de fractura

ESCALA CUALITATIVA	Error carga de fractura	CALIDAD DEL AJUSTE	DURALUMINIO		ACERO INOXIDABLE	
			C&L	OYANE	C&L	OYANE
Muy adecuado	0 - 5%	Tracción	Muy adecuado	Muy adecuado	Muy adecuado	Muy adecuado
Adecuado	5 - 10%	Compresión	Adecuado	Poco adecuado	Adecuado	Poco adecuado
Poco adecuado	10 - 15%					

Con esto se concluye que para tracción los criterios proporcionan un ajuste muy adecuado referente a la curva experimental de fuerza y desplazamiento, en tanto, que para compresión el criterio de Cockroft y Latham proporciona un mejor ajuste que el de Oyane.

Se debe destacar que la forma de curva obtenida en la simulación corresponde plenamente a las curvas experimentales a lo largo de todo el ensayo, especialmente en la zona plástica que es el interés de la investigación.

5.2.2 EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE FRACTURA

En este análisis se procederá a evaluar el criterio de fractura de Cockroft y Latham, el cual según la bibliografía es válido para valores negativos de triaxialidad o visto de otra manera aplicable para ensayos de compresión (Riofrío Villena, 2014).

Por lo tanto, para la evaluación del criterio se parte de los resultados del ensayo de compresión para verificar su validez y analizar si se ajusta para tracción.

En este análisis se presenta el lugar geométrico y la concordancia del criterio de fractura de Cockroft y Latham con los resultados experimentales de tracción y de compresión utilizando el diagrama de la deformación equivalente versus la triaxialidad según la ecuación 17 citada nuevamente a continuación.

$$\bar{\epsilon}_f = \frac{C_8}{\sqrt{3}} \frac{3\eta + \sqrt{12 - 27\eta^2}}{2(1 + \eta\sqrt{12 - 27\eta^2})} \quad \text{Ecuación 17}$$

En primer lugar, para Cockroft y Latham el valor de la constante para la ecuación de la deformación efectiva es:

$$C_8 = \frac{3}{4} \text{ Daño} \quad \text{Ecuación 25}$$

En cuanto a la triaxialidad (η), esta se determina como una relación entre el esfuerzo principal medio (σ_m) y el esfuerzo equivalente en la fractura ($\bar{\sigma}$).

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \text{Ecuación 27}$$

Siendo $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ los esfuerzos principales.

También se estableció en el capítulo 4 en la ecuación 23, citada nuevamente, que:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} [(\sigma_x)^2]^{1/2} = \sigma_x \quad \text{Ecuación 23}$$

Por lo tanto, para un estado uniaxial de carga ($\sigma_1 = \sigma_x$) como lo son los ensayos de tracción y de compresión:

$$\sigma_1 = \bar{\sigma} \quad \text{y} \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

Y, reemplazando en la ecuación de la triaxialidad se tiene que:

$$\text{Para tracción:} \quad \eta = \frac{1}{3}$$

$$\text{Para compresión:} \quad \eta = -\frac{1}{3}$$

Para la deformación efectiva ($\bar{\epsilon}$), se cita a la ecuación 24 que para un estado uniaxial de carga ($\sigma_1 = \sigma_x$), tanto de tracción como de compresión, se tiene:

$$\bar{\epsilon} = \left\{ \frac{2}{3} \left[\epsilon_x^2 + \frac{\epsilon_x^2}{4} + \frac{\epsilon_x^2}{4} \right] \right\}^{1/2} = \epsilon_x \quad \text{Ecuación 24}$$

Además, se conoce que la deformación efectiva en la fractura es:

$$\bar{\epsilon} = LN \left(\frac{long.final}{long.inicial} \right)$$

Ecuación 28

Con este análisis se procede a evaluar el criterio fractura de Cockroft y Latham para cada uno de los materiales ensayados.

5.2.2.1 DURALUMINIO

En las simulaciones realizadas para el ensayo de compresión del duraluminio se llegó a determinar que el valor del daño para Cockroft y Latham es de 0.05, con estos valores se procede a graficar la deformación efectiva versus la triaxialidad, como se observa en la figura 76.

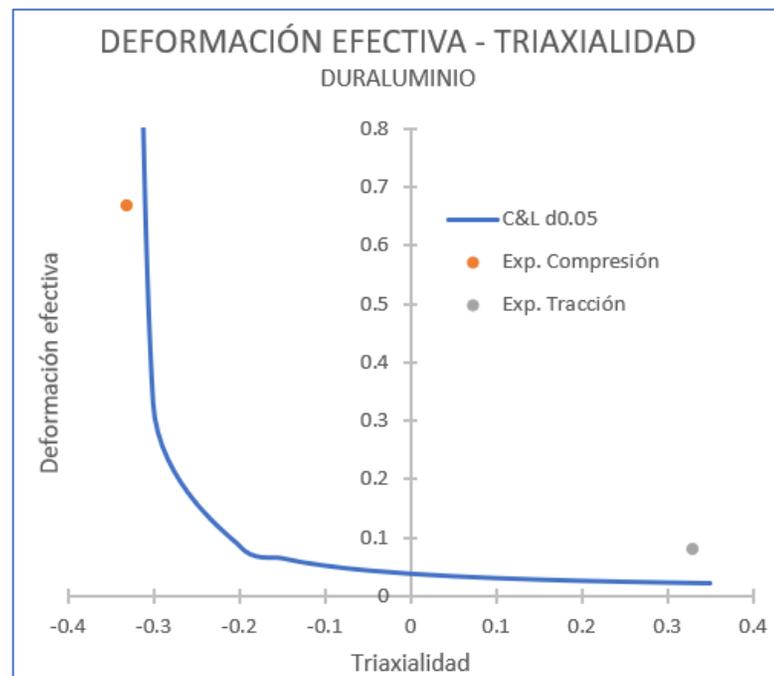


Figura 76 Lugar geométrico de los criterios de fractura para el duraluminio

Además, en la tabla 28 se resume los valores de deformación efectiva y triaxialidad calculados a partir de las ecuaciones presentadas anteriormente. Estos valores de deformación efectiva son determinados a partir de las longitudes iniciales y finales de las probetas ensayadas tanto para tracción como para compresión. En cuanto a los valores de triaxialidad también están asignados según el análisis ya realizado

Tabla 28

Valores de deformación efectiva y de triaxialidad para el duraluminio

DURALUMINIO							
Tracción		Compresión		Deformación efectiva		Triaxialidad	
Long. inicial	Long. final	Long. inicial	Long. final	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)				
50	54.2	16	8.22	0.08	0.67	0.33	-0.33

En la gráfica se puede observar el lugar geométrico para tracción y para compresión y con ello se puede realizar la evaluación del criterio de fractura.

Se puede comprobar que el Criterio de Cockroft y Latham es aplicable para valores de triaxialidad negativos correspondiente a la compresión del duraluminio.

Para tracción el criterio no se ajusta adecuadamente al valor experimental.

5.2.2.2 ACERO INOXIDABLE

Para el acero inoxidable en el ensayo de compresión se llegó a determinar que el valor del daño para Cockroft y Latham es de 0.05, con estos valores se realiza la gráfica correspondiente como se observa en la figura 77.

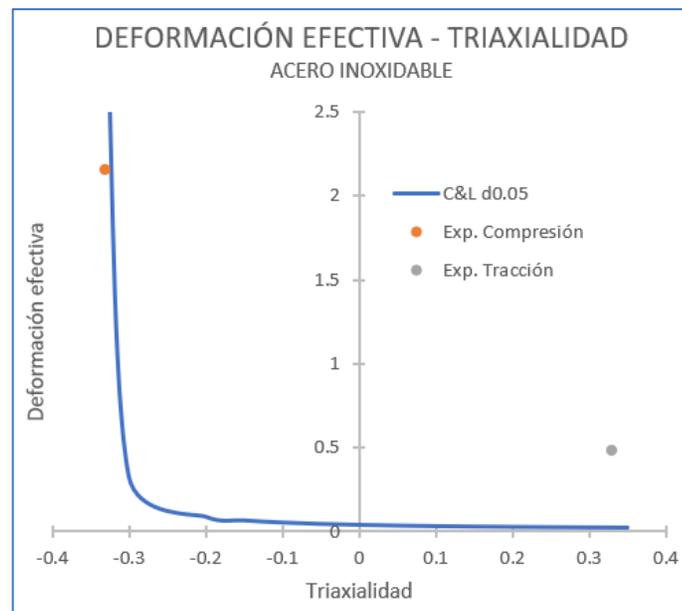


Figura 77 Lugar geométrico de los criterios de fractura para el acero inoxidable

En la tabla 29 se resume los valores de deformación efectiva y triaxialidad tanto para tracción como para compresión. El valor de la triaxialidad también está asignado según el análisis ya realizado.

Tabla 29

Deformación efectiva y de triaxialidad para el acero inoxidable

ACERO INOXIDABLE AISI 304								
Tracción		Compresión		Deformación efectiva		Triaxialidad		
Long. inicial (mm)	Long. final (mm)	Long. inicial (mm)	Long. final (mm)	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión	
50	80.6	16	1.86	0.48	2.15	0.33	-0.33	

Para el acero inoxidable también se puede comprobar que el Criterio de Cockroft y Latham es aplicable para valores de triaxialidad negativos correspondiente a la compresión.

Para tracción el criterio no se ajusta al valor experimental, se observa que este valor queda muy distante del lugar geométrico del criterio de fractura.

5.2.3 EVALUACIÓN DEL DAÑO

En la tabla 30 se resume el valor del daño obtenido en cada una de las simulaciones, según el ensayo, el material y el criterio de fractura aplicado.

Tabla 30

Valor del daño de las simulaciones realizadas

VALOR DEL DAÑO	DURALUMINIO			ACERO INOXIDABLE		
	C&L	OYANE		C&L	OYANE	
Tracción	0.1	0.11	10	0.52	0.52	20
Compresión	0.05	0.05	10	0.05	0.05	10

De los valores encontrados se pueden hacer algunas comparaciones:

- Para el duraluminio, el valor del daño obtenido para tracción es el doble respecto a compresión en los dos criterios de fractura.
- Para el acero inoxidable, el valor del daño es 10 veces mayor que el de compresión.
- El valor del daño de un material está en función de la ductilidad, un material muy dúctil como el acero inoxidable posee un mayor daño.
- Para compresión, el daño causado sobre los dos materiales tiene el mismo valor.

- Según el criterio de Oyane, la constante a_0 en tracción y compresión es igual para el duraluminio, en tanto que para el acero inoxidable es el doble en tracción respecto a compresión.

Estas comparaciones realizadas pueden orientar para predecir las relaciones existentes entre los ensayos de tracción y compresión respecto al daño entre materiales con diferencias en la ductilidad.

5.2.4 EVALUACIÓN DE LA DEFORMACIÓN EFECTIVA

A continuación, se muestra la deformación efectiva obtenida en cada una de las simulaciones finales. Para el caso de la figura 78, la deformación efectiva en el momento de la fractura está representado por la línea curva continua amarilla presente en la probeta que se representa con la letra D que corresponde a un valor de 0.0750.

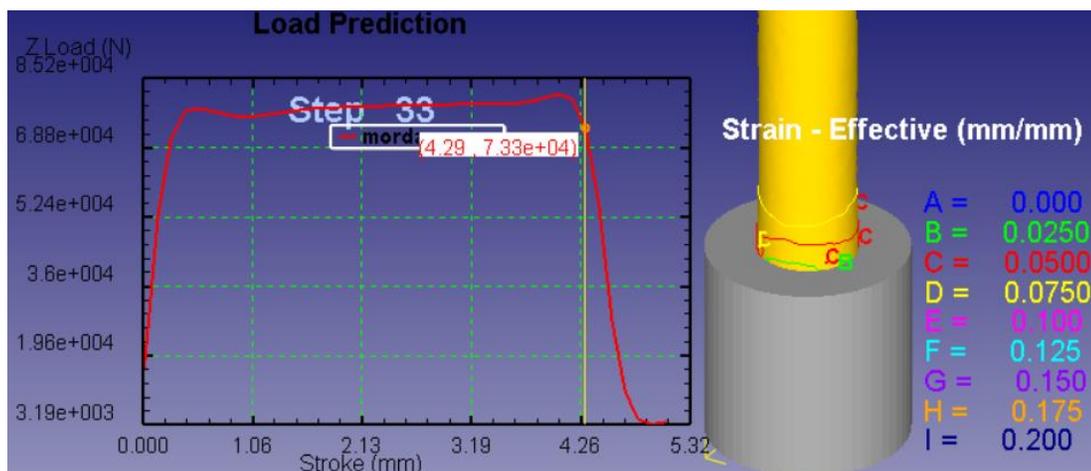


Figura 78 Deformación efectiva del duraluminio a tracción según C&L

En las siguientes figuras 79, 80 y 81 se hace un análisis similar.

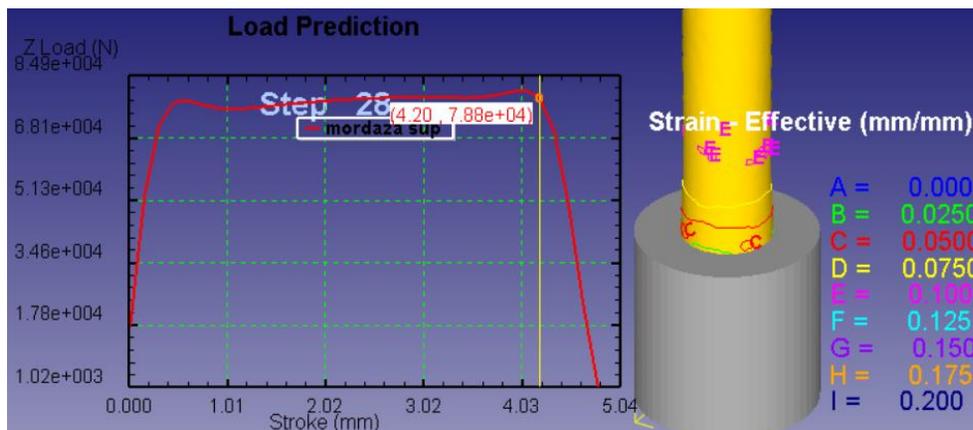


Figura 79 Deformación efectiva del duraluminio a tracción según Oyane

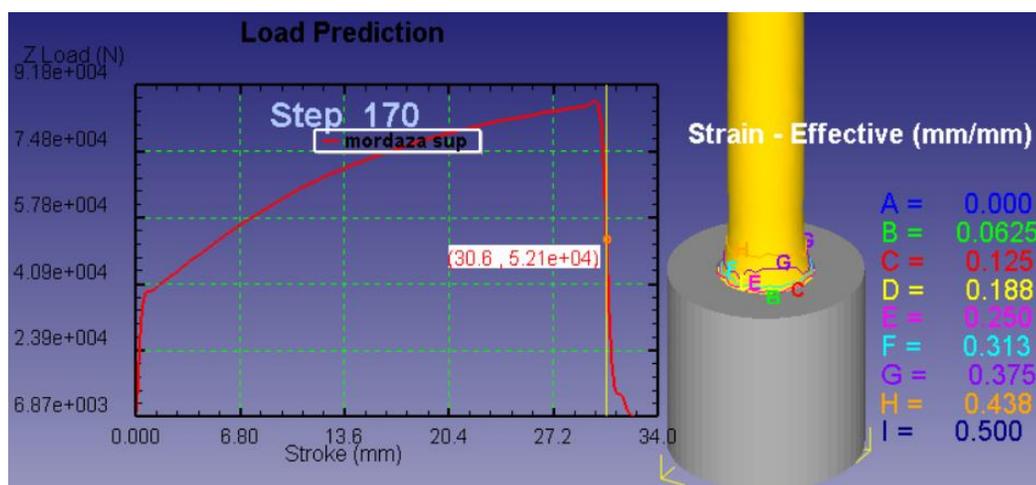


Figura 80 Deformación efectiva del acero inoxidable a tracción según C&L

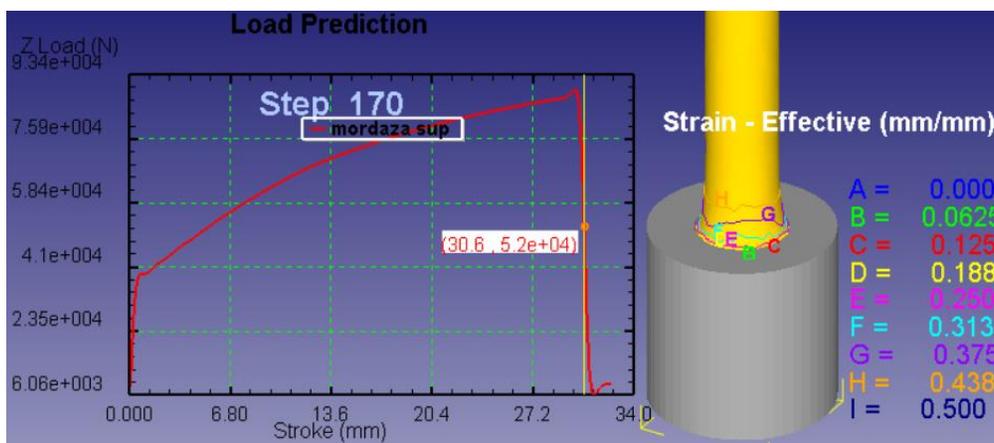


Figura 81 Deformación efectiva del acero inoxidable a tracción según Oyane

Para las probetas sometidas a compresión, figuras 82, 83, 84 y 85, la deformación efectiva se halla presente en diferentes puntos, se verifica que exista aquella cercana al experimental, en este caso se selecciona $H=0.700$.

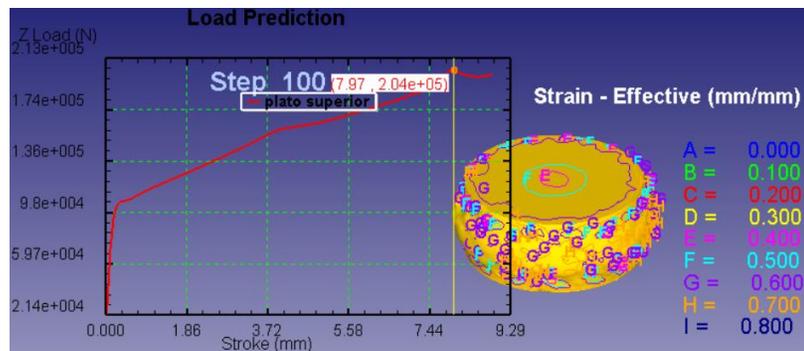


Figura 82 Deformación efectiva del duraluminio a compresión según C&L

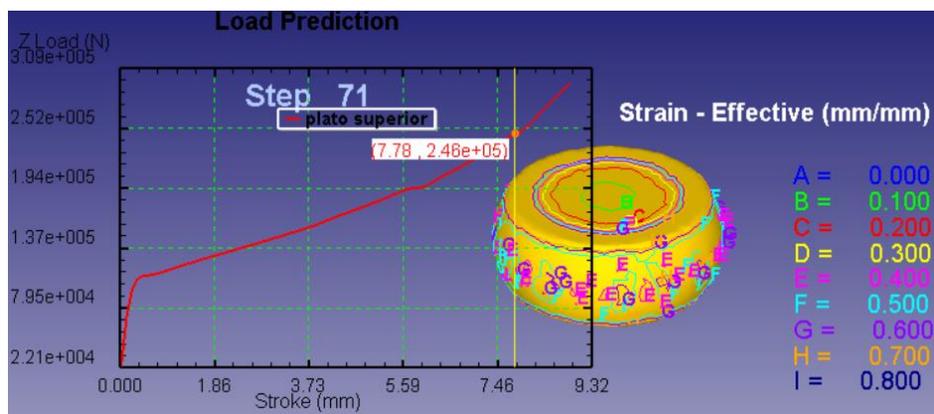


Figura 83 Deformación efectiva del duraluminio a compresión según Oyane

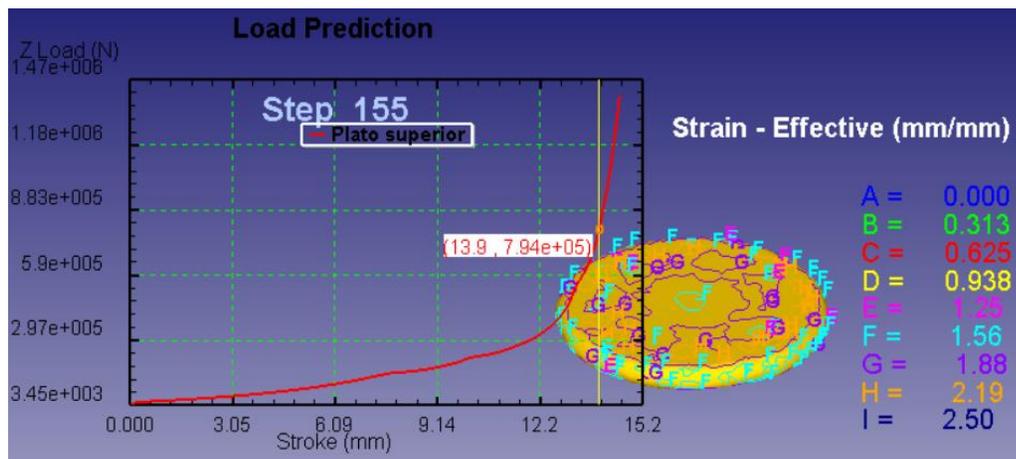


Figura 84 Deformación efectiva del acero inoxidable a compresión según C&L

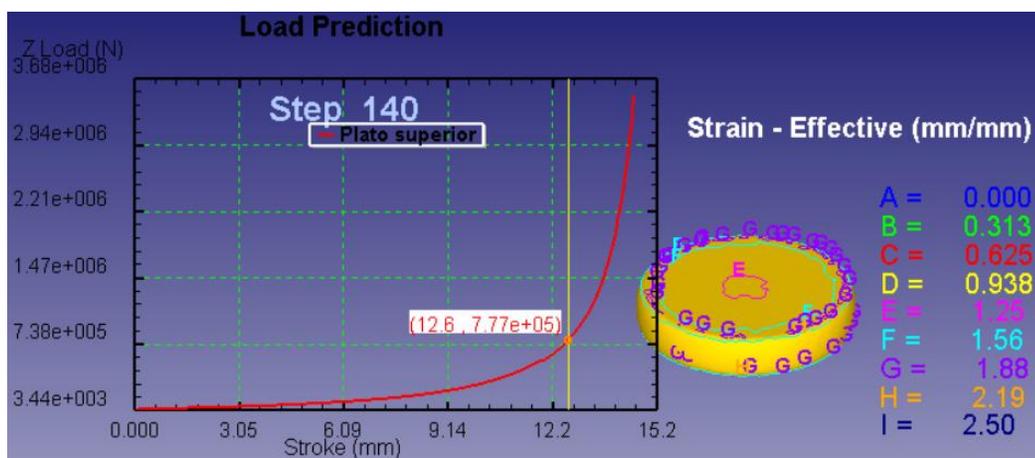


Figura 85 Deformación efectiva del acero inoxidable a compresión según Oyane

Finalmente, en la tabla 31 se resume los valores de deformación efectiva encontradas experimentalmente y los valores encontradas por simulación según sea el caso.

Tabla 31
Deformación efectiva experimental y simuladas

DEFORMACIÓN EFECTIVA	DURALUMINIO		ACERO INOXIDABLE	
	Tracción	Compresión	Tracción	Compresión
Experimental	0.081	0.67	0.477	2.152
Cockroft y Latham	0.075	0.7	0.438	2.19
Oyane	0.075	0.6	0.438	2.19

De los resultados que se observan en la tabla se puede concluir que la deformación efectiva al momento de la fractura lograda por simulación es similar a los valores experimentales con un error menor al 1%.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se ha cumplido con el objetivo de evaluar los criterios de fractura mediante la simulación por el elemento finito logrando el ajuste de la curva esfuerzo – deformación real obtenida a través de los ensayos de tracción y compresión aplicados al duraluminio y acero inoxidable AISI 304.
- Las propiedades mecánicas del material obtenidas experimentalmente no coinciden con la información proporcionada por el proveedor y la encontrada en bibliografía, excepto el módulo de elasticidad que si coincide para los dos materiales ensayados.
- El análisis químico y metalográfico determinaron que los materiales ensayados corresponden plenamente al duraluminio y acero inoxidable hallados en bibliografía o a su vez suministrados por el proveedor.
- La aproximación que mejor sintonizó con el diagrama esfuerzo – deformación real para los materiales ensayados a tracción fueron: para el duraluminio la curva potencial con un error de 0.3% generado en el esfuerzo máximo en el ajuste y para el acero inoxidable la función lineal con un error del 2.9%. Estas aproximaciones tuvieron mejor resultado al discriminar aproximadamente un 80% de los datos obtenidos para la zona elástica.
- La observación macroscópica de la falla permitió ratificar el tipo de fractura para los dos materiales, el acero inoxidable demostró ser un material de gran ductilidad

y el duraluminio de menor, en ambos casos la estricción generada por la fractura y el tipo de superficie evidencian esta situación. Para compresión, en el duraluminio se identificó plenamente el instante de la fractura y además presentó un plano de corte muy definido, en tanto que, en el acero inoxidable no se lo identificó claramente estos detalles debido a su gran ductilidad.

- La observación microscópica complementó la determinación del tipo de fractura obtenida por tracción, la profundidad de las micro cavidades y la orientación de estas según el sitio de observación, hacen la diferencia entre la ductilidad de los dos materiales. En el caso de compresión fue notoria la fricción existente en los planos de corte y la coalescencia de las micro cavidades producto de la fractura.
- Las simulaciones realizadas para tracción según los dos criterios se ajustan plenamente en forma y en el valor de carga de fractura, los errores generados por el ajuste son menores al 5% para tracción. Para compresión el criterio de Cockroft y Latham genera un error entre el 5 y el 10%, en tanto que Oyane genera errores en la carga de fractura mayores al 10%. La deformación efectiva lograda por simulación con los dos criterios de fractura es similar a los determinados experimentalmente, su error es menor al 1%.
- El daño causado sobre los dos materiales ensayados resulta ser mayor en tracción que en compresión, para el duraluminio el valor del daño es el doble en tanto que, para el acero inoxidable el daño en tracción es 10 veces mayor, independientemente del criterio de fractura.

- Se verifica que el criterio de Cockroft y Latham es adecuado para pequeños valores de triaxialidad negativa, se ajusta adecuadamente a los valores experimentales de compresión y de la misma manera se comprueba que no se ajustan los resultados de los ensayos de tracción en el lugar geométrico de la deformación efectiva versus la triaxialidad.
- Para los ensayos y las simulaciones realizadas el criterio de Cockroft y Latham se adapta mejor que el criterio de Oyane, puesto que para compresión Oyane no resulta ser un buen criterio.

6.2 RECOMENDACIONES

- Caracterizar el material que se pretende estudiar, puesto que las propiedades mecánicas difieren de la información que se pueda conseguir por otras fuentes, inclusive de aquellos que comercializan los materiales, de esta manera se puede ofrecer credibilidad de la investigación.
- Cuando se realice la experimentación de los ensayos de tracción para materiales de gran ductilidad se debe obtener la mayor cantidad de datos de carga y desplazamiento, para ello se debe utilizar extensómetro de mayor porcentaje de deformación y de ser posible máquinas universales de ensayos con extensómetro óptico incorporado.
- Al realizar los ensayos de compresión se debe probar para diferentes relaciones de diámetro y altura para identificar de mejor manera el instante de la fractura y por ende una mejor exactitud de los valores de la fractura.

- Para obtener la aproximación matemática del diagrama esfuerzo y deformación real se debe probar varias posibilidades y tomar en cuenta que los datos correspondientes a deformación plástica son los de mayor importancia al momento de evaluar los criterios de fractura.
- Para la simulación de los ensayos se debería utilizar otro tipo de software con la finalidad de tener un parámetro de comparación en función de la calidad del ajuste que se logren, con ello se puede alcanzar mayor confianza de los resultados a obtenerse.
- Con el fin de disminuir los tiempos de simulación, estas se deben iniciar con un número pequeño de elementos finitos y a medida que se va logrando el ajuste, se los puede ir incrementando hasta lograr el ajuste adecuado con respecto a una curva experimental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Budynas Richard G., N. J. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. (Octava edición ed.). Mexico: McGraw-Hill Interamericana.
- Dieter, G. E. (2003). *Handbook of workability and process design*. United States of America: ASM international.
- Ferdinand P., B. E. (2012). *Mechanics of Materials* (sexta edición ed.). New York: editorial McGraw -Hill.
- Hosford, W. (2005). *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press.
- Hu, J. a. (2002). *Mechanics of sheet metal forming*. Great Britain: Editorial Butterworth – Heinemann.
- Kalpakjian, S. a. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Mexico: Editorial Prentice Hall.
- Kiran, R. a. (2014). Computational Models for Ductile Fracture Prediction in Structural Engineering Applications. *Procedia Materials Science*.
- Li, H. a. (2011). Ductile fracture: experiments and computations. *International journal of plasticity*.
- Lou, Y. a. (2011). Formability prediction of advanced high strength steel with a new ductile fracture criterion. En *AIP Conference Proceedings*.

Metals-Handbook. (1985). *Metallography and Microstructures*. (Novena Edición ed., Vol. Volumen 9). USA: American Society for Metals.

Navarro Cortés, A. (2013). *UPCommons. Portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC*. Obtenido de Universidad Politécnica de Cataluña: <http://hdl.handle.net/2099.1/23287>

Riofrío Villena, G. P. (2014). *Experimentación y simulación de la fractura en el ensayo de doblado-estirado de aceros doble fase considerando anisotropía*. México: Tecnológico de Monterrey.

Schey, J. A. (2002). *Procesos de manufactura* (Tercera edición ed.). Mexico: Editorial McGraw Hill.

Spaniel M, P. A. (2014). Calibration of fracture locus in scope of uncoupled elastic--plastic-ductile fracture material models. *Advances in Engineering Software*.

Valberg, H. S. (2010). *Applied metal forming: including FEM analysis*. New York: Cambridge University Press.

Wierzbicki, T. a.-W. (2005). Calibration and evaluation of seven fracture models. *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(4-5).